

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

КОНВЕРТЕРНЕ ВИРОБНИЦТВО СТАЛІ В ПРИКЛАДАХ І ЗАДАЧАХ
Навчальний посібник з дисципліни «Технологія процесів за фахом» для
студентів спеціальності 136 – Металургія (бакалавр)

Друкується за Планом видань навчальної та навчально-методичної літератури,
затвердженим Вченою радою НМетАУ
Протокол № 2 від 05.02.2018

УДК 669.18

Конвертерне виробництво сталі в прикладах і задачах: Навч. посібник / Укл.: О.Г. Величко, Б.М. Бойченко, Є.В. Синегін, Л.С. Молчанов, С.В. Журавльова. – Дніпро: НМетАУ, 2018. – 98 с.

Викладені основи теорії і практики киснево-конвертерного процесу, які включають теорію розрахунку надзвукових течій і сопла Лавалю, гідродинаміку конвертерної ванни при продувці, розчинення твердих матеріалів в шлаковому і металевому розплавах та теплові явища конвертерного процесу. Наведено удосконалений розрахунок матеріального і теплового балансу конвертерної плавки із використанням сучасних видів скрапу.

Призначений для студентів спеціальності 136 – Металургія (бакалавр), а також може бути корисним студентам інших спеціальностей та інженерам-металургам.

Іл. 2. Табл. 14. Бібліогр.: 7 найм.

Друкується за авторською редакцією.

Рецензенти: О.С. Вергун, канд. техн. наук, доц. (ІЧМ НАНУ)
В.В. Бочка, д-р техн. наук, проф. (Національна металургійна академія України)

-8736-08-7

© Національна металургійна академія
України, 2018

© Величко О.Г., Бойченко Б.М.,
Синегін Є.В., Молчанов Л.С.,
Журавльова С.В., 2018

ЗМІСТ

Вступ	5
Перелік умовних позначень	6
1 Розрахунок розмірів реакційної зони, сопла й основних параметрів киснево-конвертерної фурми.....	9
1.1 Аеродинаміка звукового кисневого струменя	9
1.2 Розрахунок сопла Лаваля	11
1.3 Розрахунок основних параметрів киснево-конвертерної фурми.....	14
1.4 Розрахунок розмірів реакційної зони.....	16
1.5 Задачі	18
1.6 Питання для самоперевірки	20
2 Гідродинаміка конвертерної ванни.....	21
2.1 Потужність переміщування конвертерної ванни.....	21
2.2 Поверхня контакту фаз в умовах конвертерного процесу.....	22
2.3 Виноси бризок і пилу з конвертера	24
2.4 Задачі	25
2.5 Питання для самоперевірки	28
3 Основи кінетики масообміну і рафінування сталі від домішок у киснево-конвертерному процесі.....	29
3.1 Розчинення твердих речовин у рідкій фазі.....	29
3.2 Видалення домішок у шлакову фазу.....	33
3.3 Задачі	35
3.4 Питання для самоперевірки	41
4 Теплова робота конвертерного агрегату і шихтовка плавки	43
4.1 Теплоємність речовин.....	43
4.2 Залежність теплового ефекту від температури.....	46
4.3 Розрахунок витрати охолоджувачів і регулювання температури ванни	49
4.4 Задачі	51
4.5 Питання для самоперевірки	57
5 Розрахунок матеріального і теплового балансів киснево-конвертерної плавки.....	59
5.1 Завдання на розрахунок.....	59
5.2 Розрахунок матеріального балансу періоду продувки.....	60
5.3 Розрахунок розкислення сталі	72

5.4 Розрахунок теплового балансу плавки (до розкислення)	76
5.5 Розрахунок коригуючих добавок	79
Додаток А	82
Додаток Б	83
Додаток В	88
Додаток Г	89
Додаток Ґ	90
Додаток Д	92
Додаток Е	93
Рекомендована література.....	95

ВСТУП

З часу видання першого видання навчального посібника минуло понад 25 років. За цю чверть століття з його допомогою авторами та колективом кафедри було підготовлено понад 1000 інженерів металургів та наукових співробітників, які плідно працюють на теренах України та за її межами. Однак технології не стоять на місці, змінюючись разом із стандартами вищої освіти та вимогами роботодавців до підготовки інженерних та наукових кадрів.

У другому виданні навчального посібника оновленим авторським колективом враховані сучасні особливості технології киснево-конвертерного процесу. Основною метою видання є поглиблення і закріплення студентами знань з питань теорії й практики конвертерних процесів.

Перші чотири розділи починаються основними теоретичними положеннями та формулами, які необхідні для вирішення завдань і закінчуються переліком контрольних запитань для самоперевірки студентом ступеня засвоєння пройденого матеріалу. Усього в навчальному посібнику 129 задач, які згруповані у тематичні розділи:

- розрахунок розмірів реакційної зони, сопла Лаваля й параметрів киснево-конвертерної фурми;
- гідродинаміка конвертерної ванни, умови виносу часток дисперсних фаз з конвертера;
- процеси масопереносу, шлакоутворення й десульфурації металу;
- теплова робота конвертерного агрегату і шихтовка плавки.

Розмірності фізичних величин надані, здебільшого, у Міжнародній системі одиниць (SI), але в ряді випадків використані деякі несистемні одиниці, які наразі широко використовуються в металургії (г-моль, ккал, атм та ін.). У додатку в табличній формі наведені співвідношення між системними й несистемними одиницями фізичних величин, а також деякі довідкові дані, необхідні для вирішення завдань.

В останньому п'ятому розділі наведено розрахунок матеріального і теплового балансу конвертерної плавки із використанням різних видів охолоджувачів ванни (звичайний, кремнистий або зашлакований скрап, чушковий чавун). Початкові дані для розрахунку відповідають актуальним вимогам до складу шихтових матеріалів конвертерного процесу, футеровки агрегату та складу готової сталі.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

У навчальному посібнику використовується система символів і скорочень, що є загальноживаними у природничих науках і сталеплавильному виробництві зокрема. Більшість з позначень, що використовуються у формулах, складається з символу й нижнього та, інколи, верхнього індексів, які конкретизують його суть. Для зручності пояснення символів і індексів їх надано окремо у алфавітному порядку. Символи, суть яких невід'ємно пов'язана із їхнім індексом, наведені разом з рештою символів.

Перелік латинських символів

a – кількість міксерного шлаку, %;
 a – активність речовини;
 b – забруднення лому, %;
 B – основність шлаку;
 c – окалина лому, %;
 c – питома теплоємність, Дж/(моль·К);
 C – масова концентрація, кг/м³;
[%E] – масова частка, %;
 d – діаметр (середній розмір), м;
 D – коефіцієнт дифузії, м²/с;
 E – питома енергія, Дж/кг;
 $F_{ван}$ – флюсуюча здатність вапна;
 g – прискорення вільного падіння, м/с²;
 G – садка конвертера, т;
 G_{O_2} – масова інтенсивність вдування кисню, кг/с;
 G_{CO} – масова інтенсивність виділення монооксиду вуглецю в ванні, кг/с;
 h – висота, м;
 H – ентальпія, Дж/кг;
 $h_{ван-г}$ – висота від рівня ванни до горловини конвертера, м;
 i – імпульс струменя, Н;
 i_{O_2} – питома інтенсивність продувки, нм³/(т·хв.)^{*};

I_{O_2} – інтенсивність продувки, м³/хв.;
 k – адіабатична стала;
 K – параметр нерозрахунковості;
 k_{O_2} – ступінь засвоєння ванною кисню, %;
 K_p – константа рівноваги реакції;
 $K_{шл}$ – рафінувальний потенціал шлаку, т;
 l – довжина, м;
 \bar{l}_h – довжина початкової ділянки струменя, калібрів;
 L – коефіцієнт розподілу домішки між шлаком і металом;
 m – маса, кг;
 M – відносна маса (до маси металу або на 100 кг металошихти), %;
 n – кількість, параметр нерозрахунковості;
 n_{O_2} – чистота кисню дуття, %;
 N – потужність перемішування, Вт;
 P – тиск, Па;
 q – теплота плавлення, Дж/кг;
 Q – питома кількість теплоти, Дж/моль;
 Q_m – потік маси, кг/с;
 r – радіус, м;
 $R = 8,31$ – універсальна газова стала, Дж/(моль·К);
 $R_2 = \frac{8,31}{\mu_2}$ – питома газова стала, Дж/(кг·К);
 S – площа, м²;
 $t(T)$ – температура, °С(К);

* літера “н” перед метрами читається як нормальні метри кубічні, що означає об'єм кисню, наведений для нормальних умов.

U – внутрішня енергія системи, Дж/кг;
 V – об'єм, м³;
 V_C – швидкість окислення вуглецю, %/хв;
 $V_m = 22,4 \cdot 10^{-3}$ – молярний об'єм, м³/моль;
 w – швидкість, м/с;
 Y – угар елемента–розкислювача;

Перелік грецьких символів

α – кут, градус;
 α – ступінь допалювання СО до СО₂, %;
 β – коефіцієнт масопередачі, м/с;
 δ – товщина приграничного шару (м);
ступінь рафінування металу (%);
 $\Delta Fe_{втр}$ – втрати заліза з димовими газами,
викидами, зі шлаком у формі оксидів і
корольків металу, %;
 ζ – коефіцієнт аеродинамічного опору;
 λ – коефіцієнт швидкості;
 μ – молярна маса, кг/моль;
 ν – число молей речовини;
 ξ – безрозмірна швидкість;
 ρ – густина, кг/м³;
 $\bar{\rho}$ – параметр неізотермічності струменя;
 Σ – сумарний, загальний;
 τ – час, тривалість, с;
 φ – кут між осями сусідніх сопел, градус;
 χ – втрати заліза з випаровуванням (у
формі парів Fe₂O₃), %;
 ψ – частка кінетичної енергії струменів, що
витрачається на перемішування ванни, %;
 ω – ступінь відновлення фосфору зі шлаку
в період розкислення, %;

Перелік скорочень індексів

тах – максимальний;
P – за сталого тиску;
V – за сталого об'єму;
agl – агломерат;
б – бульбашка;
в – верхня межа;

в.к.в – викиди металу, корольки металу в
шлаку і виплески;
ван – ванна;
вап – вапно;
вел – великий;
витр – витрата;
вих – вихід;
відн – відновлення;
втр – втрати;
вуг – матеріали, що містять вуглець;
вх – вхід;
г – газ;
д.г – димові гази;
дис – дисоціація;
диф – дифузор;
дут – дуття;
E – будь який елемент або хімічна сполука;
забр – забруднення лому;
зв – звук;
зв.бр – звичайний брукт;
зг – згоряння;
іст – істиний;
к – кінцевий;
кін – кінетична;
конф – конфузор;
кр – критичний (переріз сопла);
крап – крапля;
кр.бр – кременистий брукт;
м – метал;
м.бр – металобрукт;
м.ш – міксерний шлак;
мет.ш – металошихта;
мал – малий;
н – нижня межа;
нав – навколишній;
надх – надходження;
нас – насичення;
н.у – нормальні умови (0 °С і 1 атм);
о – початкова величина параметра;
ок – окалина;

окат – окатиші;
n – початковий;
n.ш – плавиковий шпат;
нал – паливо;
перв – первинний;
пил – пил;
пл – плавлення;
пов – повалка;
пр – продукти реакції;
р.з – реакційна зона;
р.п – робочій простір;
реаг – реагенти;
реак – реакція;
рід – рідкий;
розк – розкислення;
розч – розчин;
соп – сопел;
сп – спуск (шлаку);
сплив – спливання;
ст – сталь;
с.у – стандартні умови (25 °С і 1 атм);

сум – суміш;
тв – твердий;
утв – утворення;
ф – фурма;
фер – феростатичний;
фіз – фізичний;
фут – футерівка;
хім – хімічний;
ч – часточка;
чав – чавун;
ших – шихта;
шл – шлак;

Числа подоби

$$\text{Ar} \equiv \frac{gl^3 \beta_t \Delta \rho}{v^2 \rho_p} \text{ – число Архімеда;}$$

$$\text{Ka} \equiv \frac{\rho_{\text{вих}}}{\rho_{\text{рід}}} \cdot \frac{w^2}{gd_{\text{вих}}} \text{ – число Казанцева;}$$

$$\text{M} \equiv \frac{w}{w_{3в}} \text{ – число Маха.}$$

Апострофом « ' » позначені параметри, які в ході подальшого розрахунку будуть уточнюватись, наприклад $M'_{\text{чав}}$.

Довжина або глибина, що позначені зверху горизонтальною лінією (\bar{L} , \bar{h}), мають розмірність *калібр* – відношення відстані (довжини, глибини) до діаметру сопла.

Дужками позначено речовини:

(...) – розчинені в шлаковій фазі;

[...] – розчинені в металі;

{...} – в газовій фазі;

⟨...⟩ – у твердому стані.

1 РОЗРАХУНОК РОЗМІРІВ РЕАКЦІЙНОЇ ЗОНИ, СОПЛА Й ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОЇ ФУРМИ

1.1 Аеродинаміка звукового кисневого струменя

Кисневий струмінь зазвичай характеризується наступними параметрами на виході з сопла: швидкістю $w_{вих}$, густиною $\rho_{вих}$, температурою $t_{вих}$, тиском $P_{вих}$, а також співвідношенням останнього з тиском навколишнього середовища $P_{нав}$, величина якого може бути прийнята на рівні $1 \cdot 10^5$ Па (1 атм).

У випадку витікання газу із циліндричних сопел (багатоканальні фурми для продувки мартенівської ванни) швидкість газового струменя досягає критичної величини, яка дорівнює місцевій швидкості звуку у даному середовищі

$$w_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot R_2 T_o}, \text{ м/с}, \quad (1.1)$$

де $k = \frac{c_p}{c_v}$ – адіабатична стала (для одноатомних газів складає 1,3; для двохатомних – 1,4; для газів з 3-ох і більше атомів – 1,67)*;

$$R_2 = \frac{8,31}{\mu_2} \text{ – питома газова стала, Дж/(кг·К);}$$

T_o – початкова температура газу перед соплом, К.

Досягнення критичної швидкості можливе лише за умови досягнення газом у вихідному перерізі величини критичного тиску

$$P_{кр} = P_o \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \text{ Па}, \quad (1.2)$$

де P_o – тиск газу перед соплом, Па.

На практиці часто використовують три безрозмірні швидкості:

– число Маха:

$$M \equiv \frac{w}{w_{38}} = \frac{w}{\sqrt{kR_2 T_o}}, \quad (1.3)$$

* величина адіабатичної сталої несуттєво змінюється залежно від складу газу і температури. Її точні значення для деяких газів можна знайти у довідковій літературі [1].

де $w_{зв}$ – швидкість звуку, м/с;
– коефіцієнт швидкості:

$$\lambda \equiv \frac{w}{w_{кр}}, \quad (1.4)$$

– безрозмірна швидкість:

$$\xi \equiv \frac{w}{w_{\max}}, \quad (1.5)$$

де $w_{\max} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot R_o T_o}$ – максимальна швидкість газового струменя при його витіканні у вакуум, м/с.

Слід також відзначити, що на відміну від числа Маха **M**, де у чисельнику може використовуватися швидкість у будь-якому місці струменя, у формулі коефіцієнта швидкості λ у чисельнику зазвичай використовують швидкість струменя у вихідному перерізі сопла.

Густину і температуру газу при досягненні струменем критичної швидкості визначають за формулами

$$\rho_{кр} = \rho_o \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \text{ кг/м}^3, \quad (1.6)$$

$$T_{кр} = T_o \cdot \frac{2}{k+1}, \text{ К}, \quad (1.7)$$

де ρ_o – густина газу перед соплом, що для нормальних умов може бути взята з додаткової літератури або розрахована з рівняння Менделєєва-Клапейрона

$$\rho_o = \frac{P}{R_o T}, \text{ кг/м}^3. \quad (1.8)$$

На практиці швидкість кисневого струменя на виході з циліндричного сопла ($w_{кр}$) зазвичай коливається в межах 290...300 м/с.

Після досягнення струменем критичної швидкості й подальшого підвищення тиску газу перед соплом температура газу залишається сталою

($T_{кр}$), а статичний тиск у струмені на зрізі сопла постійно підвищується відповідно до виразу

$$\frac{P_{вих}}{P_o} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (1.9)$$

Густина газу, що витікає також зростає.

1.2 Розрахунок сопла Лаваля

Сопла в багатоканальних фурмах для продувки в кисневому конвертері зазвичай мають форму сопла Лаваля, що забезпечує трансформацію всієї статичної енергії кисню в динамічну, збільшення далекобійності струменя й глибини його проникнення в метал навіть при розташуванні фурми на значній висоті над рівнем ванни.

Початковими даними для розрахунку сопла Лаваля зазвичай є інтенсивність продувки, тиск кисню перед соплом та навколишнього середовища, у яке витікає струмінь, температура кисню. У цьому підрозділі наведено алгоритм розрахунку основних розмірів сопла Лаваля за переліченими вище параметрами.

Перш за все слід визначити параметри кисневого струменю у критичному перерізі сопла:

- швидкість визначається за формулою (1.1);
- тиск визначається за формулою (1.2);
- температура визначається за формулою (1.7);
- густина визначається за формулою (1.6) або за рівнянням (1.8) Менделєєва-Клапейрона для умов у критичному перерізі сопла.

Знаючи ці параметри та інтенсивність продувки розраховуємо діаметр критичного перерізу сопла з формули

$$G_{O_2} = \frac{i_{O_2} \cdot \rho_{O_2}}{60} = \rho_{кр} \cdot w_{кр} \cdot \frac{\pi d_{кр}^2}{4}, \text{ кг/с.} \quad (1.10)$$

де ρ_{O_2} – густина кисню за нормальних умов, кг/м³.

За критичним перерізом сопла Лаваля (рис. 1.1) статичний тиск, густина і температура газу зменшуються, а швидкість стає надзвуковою. Залежно від

співвідношення площ вихідного $S_{вих}$ і критичного $S_{кр}$ перерізів сопла змінюється коефіцієнт швидкості газу λ .

$$\frac{S_{вих}}{S_{кр}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \left(\frac{\frac{2}{k+1}}{1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (1.11)$$

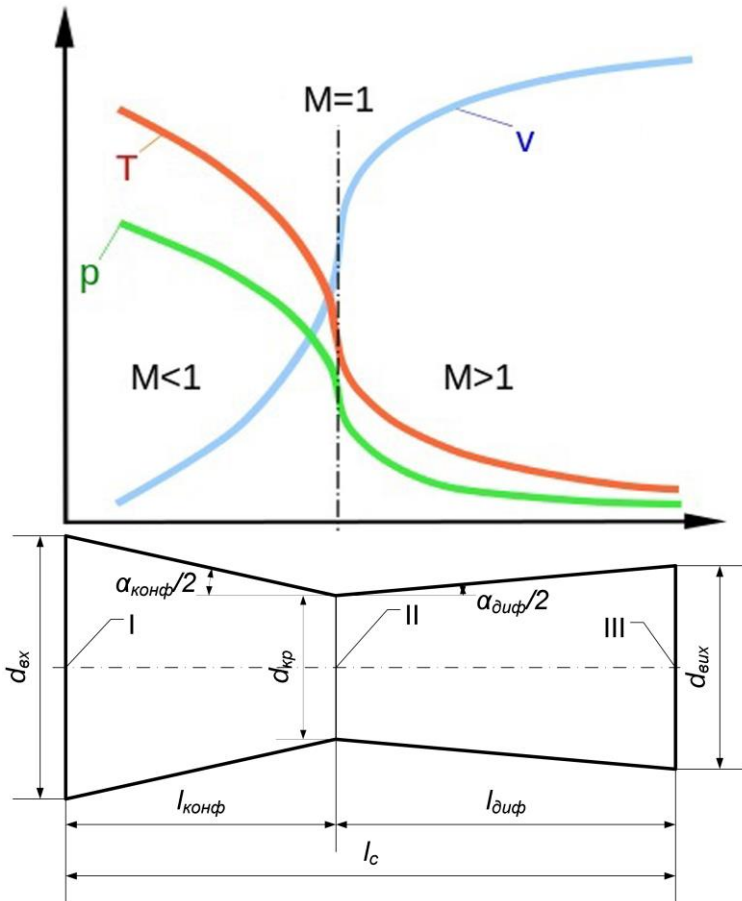


Рисунок 1.1. Схема сопла Лаваля:

- I – вхідний переріз сопла
- II – критичний переріз сопла
- III – вихідний переріз сопла

Наступним кроком розраховують параметри кисневого струменя на виході з сопла:

- коефіцієнт швидкості

$$\lambda = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{нав}}{P_o} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (1.12)$$

- швидкість струменя визначають з формули (1.4);

- тиск

$$P_{вих} = P_o \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}} = P_{кр} \left[\frac{k+1}{2} \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)\right]^{\frac{k}{k-1}}, \text{ Па}, \quad (1.13)$$

- густина

$$\rho_{вих} = \rho_o \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} = \rho_{кр} \left[\frac{k+1}{2} \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)\right]^{\frac{1}{k-1}}, \text{ кг/м}^3, \quad (1.14)$$

- температура

$$T_{вих} = T_o \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right) = T_{кр} \cdot \frac{2}{k+1} \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right), \text{ К}. \quad (1.15)$$

Для визначення діаметра вихідного перерізу параметри кисню на виході з сопла підставляють у формулу (1.10).

Відношення $n = \frac{P_{вих}}{P_{нав}}$ називається параметром нерозрахунковості. Якщо

$n > 1$ струмінь є недорозширеним, а у випадку $n < 1$ – перерозширеним. У останньому випадку відбувається відрив струменя в стінок дифузора та затягування зовнішньої атмосфери у сопло. За $n < 0,5$ тиск струменя стає надто малим і струмінь витікає у звуковому режимі.

Діаметр вхідного перерізу сопла визначають також з формули (1.10) для параметрів кисню перед соплом за умови, що швидкість кисню на вході в сопло дорівнює швидкості в трубі фурми. Звичайно ця величина знаходиться в діапазоні $w_{\phi} = 50 \dots 100$ м/с.

Кут розкриття дифузора може бути обраний у межах $5 \dots 16^\circ$ (зазвичай $8 \dots 10^\circ$). Довжина дифузора розраховується за формулою*

$$l_{диф} = \frac{d_{вих} - d_{кр}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_{диф}}{2}}, \text{ м}. \quad (1.16)$$

*Розрахунок тангенсу на калькуляторах слід виконувати в режимі DEG, а в програмі *Microsoft Excel* переводити градуси у радіани за допомогою функції РАДИАНЫ.

Кут розкриття конфузора не повинен перевищувати 40° і зазвичай становить 20...30°. Довжина конфузора

$$l_{\text{конф}} = \frac{d_{\text{вх}} - d_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_{\text{конф}}}{2}}, \text{ м.} \quad (1.17)$$

Довжина сопла дорівнює:

$$l_c = l_{\text{конф}} + l_{\text{диф}}, \text{ м.} \quad (1.18)$$

Для приблизних розрахунків можна використовувати статистичні формули

$$d_{\text{вх}} = d_{\text{кр}} \left(5,14 + \frac{t_o}{717} - 1,9 \lg w_{\text{вх}} \right), \text{ мм,} \quad (1.19)$$

$$d_{\text{вух}} = \frac{d_{\text{кр}} \cdot P_o^{0,277}}{1,372}, \text{ мм.} \quad (1.20)$$

Інколи на практиці за необхідності розміщення вхідних перерізів сопел у кисневій трубі обмеженого розміру частково або повністю усувають конфузор. Це приводить до зниження динамічного напору струменя на 20 %.

1.3 Розрахунок основних параметрів киснево-конвертерної фурми

Основними параметрами головки кисневої фурми є кількість сопел Лавалю, кут їх нахилу до вертикальної осі та кут між осями сусідніх сопел. В основу розрахунку числа сопел n_{con} і кута α_{con} нахилу сопел до вертикальної осі, щоб уникнути заметалювання горловини, кесона й втрат металу з димовими газами, покладене запобігання суттєвого виносу металевих крапель із конвертера. При цьому інтенсивність продувки $I_{O_2.con}$ на одне сопло, що має визначний вплив на висоту вильоту краплі, обирається відповідно до відстані $h_{\text{ван-г}}$ від рівня спокійної ванни до горловини конвертера. Аналіз даних про співвідношення $I_{O_2.con}$ й $h_{\text{ван-г}}$ показав, що ці величини пов'язані залежністю

$$I_{O_2.con} = 1,45 h_{\text{ван-г}}^{2,33}, \text{ м}^3/\text{хв.} \quad (1.21)$$

Величина $h_{ван-г}$ може бути розрахована за статистичною моделлю, отриманою шляхом узагальнення конструкції чисельних конвертерів

$$h_{ван-г} = 2,1545 \cdot G^{0,2289}, \text{ м.} \quad (1.22)$$

Знаючи величину $I_{O_2.con}$, можна розрахувати кількість сопел n_{con} кисневої фурми конвертера для обраної інтенсивності подачі кисню I_{O_2}

$$n = \frac{I_{O_2}}{I_{O_2.con}}, \text{ шт.} \quad (1.23)$$

де I_{O_2} – загальна інтенсивність продувки через всі сопла

$$I_{O_2} = K' P_o S_{кр}, \text{ м}^3/\text{хв}, \quad (1.24)$$

де $K' = 1,02...1,08$ – коефіцієнт пропорційності, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^2)$;

$S_{кр}$ – площа вихідного перерізу сопла, см^2 .

Округляти число сопел, якщо немає особливих міркувань, слід у бік більших значень, що дозволить зменшити винос металу й збільшити вихід придатного.

Розрахунок кута α_{con} нахилу сопла до вертикальної осі здійснюють, враховуючи необхідність уникнення злиття реакційних зон. Як показали дослідження, на "холодних" й "гарячих" моделях, при багатоканальній продувці особливо важливо запобігти злиттю сусідніх первинних реакційних зон, оскільки це призводить до формування цілісної зони, збільшенню глибини її проникнення й висоти сплесків металу.

Розрахунки геометрії взаємодії сусідніх реакційних зон у ванні дозволяють виразити ступінь розведення прилеглих сопел через кут φ , що залежить від кількості сопел і кута їхнього нахилу до вертикальної осі α_{con}

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \sin \alpha_{con} \cdot \sin \frac{180^\circ}{n_{con}}. \quad (1.25)$$

Незлиття сусідніх первинних реакційних зон виконується за умови

$$\text{tg} \frac{\varphi}{2} \geq \frac{d_{перв.р.з}}{2(h_\varphi + L'_1)}, \quad (1.26)$$

де $d_{перв.р.з}$ – діаметр первинної реакційної зони, см;

h_{ϕ} – висота фурми над ванною, см;

L'_1 – відстань від поверхні ванни, на якій $d_{перв.р.з}$ досягає максимуму, см.

За даними "гарячого" моделювання величина L'_1 у рівнянні (1.26) звичайно змінюється в межах $(0...0,5)L_1$ (L_1 – довжина первинної реакційної зони). Найбільш безпечної з погляду злиття зон величиною, яку можна приймати у розрахунках, є нуль.

Діаметр первинної реакційної зони визначають за формулою, що отримана при обробці результатів "гарячого" моделювання й експериментальних даних у діапазоні дугтьових режимів, які зустрічаються на практиці

$$d_{перв.р.з} = 6,8I_{O_2.con}^{0,4}, \quad (1.27)$$

При відомих витратах кисню на одне сопло $I_{O_2.con}$ й висоти фурми h_{ϕ} над ванною "безпечний" кут ϕ визначається за формулою (1.26). Знаючи величину ϕ та кількість сопел n_{con} з формули (1.25) визначають кут α_{con} нахилу сопла до вертикальної осі.

Статистична обробка даних з 18 вітчизняних і закордонних конвертерів дозволила встановити, що при звичайних для практики положеннях фурми (30...35 калібрів) величина ϕ звичайно обирається в межах 17...19°.

1.4 Розрахунок розмірів реакційної зони

Розміри зони взаємодії кисневого струменя з металом значною мірою визначають гідродинаміку ванни й процеси, що протікають у ній. Дослідження розмірів реакційної зони у кисневому конвертері ускладнене відсутністю технічної можливості прямого їх вимірювання. Більшість моделей для їх розрахунку отримані методами "холодного" моделювання на водяних моделях. Однак вони не враховують збільшення об'єму газу в об'ємі ванни внаслідок окислення вуглецю та не дозволяють досягти одночасної подоби на моделі і натури чисел Маха і Архімеда. Тому результати розрахунку за наведеними нижче моделями можуть дещо відрізнятись. Нижче наведені деякі з найбільш відомих математичних моделей. Формули (1.28) і (1.29) отримані за результатами моделювання на металевому розплаві, а отже претендують на найвищу точність..

Глибина реакційної зони $L_{p.3}$ може бути визначена з наступних виразів

$$\bar{L}_{p.3}(\bar{h}_\phi + \bar{L}_{p.3})^2 = \frac{2 \cdot \zeta \cdot \bar{l}_h^2 \cdot \text{Ka} \cdot \cos^2 \alpha_{con}}{\pi}, \text{ калібрів [2]}, \quad (1.28)$$

$$L_{p.3}(h_\phi + L_{p.3})^2 = 205,3 \cdot \frac{i_{вих}}{\rho_m \cdot g \cdot \cos \alpha_{con}}, \text{ м [3]}, \quad (1.29)$$

$$\bar{L}_{p.3} = 2,1 \cdot \frac{\text{Ka}^{0,4}}{1 + \frac{h_\phi}{60}}, \text{ калібрів}, \quad (1.30)$$

за інтенсивного зневуглецьовування [4],

$$L_{p.3} = 8,9 \cdot h_\phi \cdot \left(\frac{i_{вих}}{\rho_m \cdot g \cdot h_\phi^3} \right)^{0,584}, \text{ м}, \quad (1.31)$$

наприкінці продувки [4],

$$L_{p.3} = 12,7 \cdot h_\phi \cdot \left(\frac{i_{вих}}{\rho_m \cdot g \cdot h_\phi^3} \right)^{0,584}, \text{ м}, \quad (1.32)$$

де $\zeta \approx 1$ – коефіцієнт аеродинамічного опору;

\bar{l}_h – довжина початкової ділянки струменя, яка для різного типу струменів визначається за формулами:

$$\text{для дозвукового} \quad \bar{l}_h = 6,1 \cdot \bar{\rho}^{-0,147}, \quad (1.33)$$

$$\text{для звукового} \quad \bar{l}_h = 7,1 \cdot \bar{\rho}^{-0,22}, \quad (1.34)$$

$$\text{для понадзвукового} \quad \bar{l}_h = 6,8 \cdot \bar{\rho}^{-0,50}, \quad (1.35)$$

$\bar{\rho} \equiv \frac{\rho_{нав}}{\rho_{вих}}$ – параметр неізотермічності струменя;

$i_{вих} = \frac{\pi d_{вих}^2}{4} \cdot [\rho_{вих} w_{вих}^2 + (P_{вих} - P_{нав})]$ – імпульс надзвукового струменя на виході з сопла, Н.

Глибина реакційної зони з формул (1.28) і (1.29) може бути знайдена за формулою (1.36). Зверніть увагу, що у формулі (1.28) висота фурми і глибина реакційної зони наведені в калібрах, а у формулі (1.29) в метрах. Ті ж розмірності слід використовувати і в формулі (1.36).

$$L_{p.z} = -\frac{2}{3} \cdot h_{\phi} + \left\langle \left[\left(\frac{h_{\phi}}{3} \right)^3 + \frac{f}{2} \right] + \sqrt{\left[\left(\frac{h_{\phi}}{3} \right)^3 + \frac{f}{2} \right]^2 - \left(\frac{h_{\phi}}{3} \right)^6} \right\rangle^{1/3} - \left\langle \left[\left(\frac{h_{\phi}}{3} \right)^3 + \frac{f}{2} \right] + \sqrt{\left[\left(\frac{h_{\phi}}{3} \right)^3 + \frac{f}{2} \right]^2 - \left(\frac{h_{\phi}}{3} \right)^6} \right\rangle^{1/3}, \quad (1.36)$$

де f – права частина рівнянь (1.28) і (1.29).

Помітно, що на відміну від решти формули (1.32) не враховують кут нахилу сопла. Для визначення глибини реакційної зони при продувці через сопло, нахилене до вертикалі на кут α_{con} використовують формулу

$$L_{p.z.\alpha} = L_{p.z} \cdot \cos \alpha_{con}, \text{ м.} \quad (1.37)$$

Діаметр реакційної зони можна розрахувати за формулами

$$\frac{d_{p.z}}{d_{вих}} = 36 + 10P_o, \quad (1.38)$$

або

$$d_{p.z} = 3,31 \sqrt{\frac{i_{вих}}{\rho_m g}}, \quad (1.39)$$

де P_o – тиск газу перед соплом, атм.

1.5 Задачі

1) Визначити кількість сопел Лавалю у фурмі для продувки в конвертері ємністю 350 т з питомою інтенсивністю подачі кисню 3,5 нм³/(т·хв).

- 2) Визначити оптимальний кут нахилу сопел Лавалю до вертикалі в кисневій фурмі для продувки з питомою інтенсивністю $3 \text{ нм}^3/(\text{т}\cdot\text{хв})$ в 150-тонному конвертері.
- 3) Розрахувати профіль сопла Лавалю при критичному діаметрі сопла 30 мм і тиску кисню на вході в сопло й навколишнього середовища відповідно 10 й 1,1 ата, початкова температура кисню $20 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 4) Розрахувати тиск, густину, температуру і швидкість кисню на виході з сопла Лавалю, якщо перед соплом його тиск і температура становлять відповідно 6 ата і $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Тиск газового середовища в порожнині конвертера 1,06 ата.
- 5) Визначити тиск, густину, температуру і швидкість кисню на виході з циліндричного сопла, якщо перед соплом його тиск і температура становлять відповідно 6 ата і $20 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 6) Визначити критичний діаметр сопла Лавалю кисневої фурми, призначеної для продувки сталі з питомою інтенсивністю $3,6 \text{ нм}^3/(\text{т}\cdot\text{хв})$ в 250-тонному конвертері. Тиск кисню перед соплами 12 ата, а його температура $22 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 7) Визначити, на скільки необхідно збільшити число сопел кисневої фурми при переході на продувку з питомою інтенсивністю $4 \text{ нм}^3/(\text{т}\cdot\text{хв})$ замість нині діючої $3 \text{ нм}^3/(\text{т}\cdot\text{хв})$. Ємність конвертера 350 т.
- 8) Визначити глибину реакційної зони при продувці через сопло Лавалю з вихідним діаметром 3 см, що розташовано вертикально над ванною на висоті 1 м. Швидкість газу на виході з сопла та його густина становлять відповідно 455 м/с і $2,57 \text{ кг/м}^3$. Тиск кисню на виході з сопла та внутрішньої атмосфери конвертера прийняти 1,05 і 1,03 атм відповідно. Густина внутрішньої атмосфери конвертера $0,3 \text{ кг/м}^3$.
- 9) Визначити вертикальну глибину зони взаємодії кисневого струменя з металом, якщо вихідний діаметр сопла, розташованого під кутом 15° до вертикалі, становить 3,5 см, а його висота над ванною 1,2 м. Швидкість газу на виході з сопла, його тиск та густина становлять відповідно 463 м/с, 1,04 атм та $2,64 \text{ кг/м}^3$. Густина і тиск внутрішньої атмосфери конвертера становить відповідно $0,25 \text{ кг/м}^3$ та 1,05 атм.

10) Визначити діаметр реакційної зони при продувці ванни киснем через сопло Лаваля з вихідним діаметром 35 мм та тиском перед соплом 8 ата.

11) Визначити глибину й діаметр реакційної зони при продувці через сопло Лаваля з вихідним діаметром 2,5 см, яке розташоване вертикально на висоті 1,5 м від рівня спокійної ванни. Швидкість газу на виході з сопла, його густина і тиск становлять відповідно 459 м/с, 2,69 кг/м³ і 1,07 ата. Тиск внутрішньої атмосфери конвертера 1,02 ата.

1.6 Питання для самоперевірки

- 1) Що таке число Маха і коефіцієнт швидкості? За якими формулами визначаються, які їх одиниці вимірювання й чому дорівнюють їх величини для сопел різного профілю?
- 2) Що таке адіабатична стала? За якими формулами визначаються й чому дорівнюють її величини для кисню, аргону і метану?
- 3) Що таке критична і максимальна швидкість газу, її одиниці вимірювання й приблизна величина для кисню? Від яких параметрів залежить її величина?
- 4) З яких частин складається сопло Лаваля? Яка величина кутів розкриття його окремих фрагментів?
- 5) Яка звичайна величина кута нахилу осей сопел до вертикалі α і кута між осями сусідніх сопел φ ? До чого призведе недотримання оптимальної величини цих кутів?
- 6) Від якого параметра залежить максимально допустима інтенсивність вдування кисню через сопло Лаваля? До чого призведе її перевищення?
- 7) Від чого залежить глибина й діаметр реакційної зони?
- 8) Які параметри використовуються при розрахунку основних розмірів сопла Лаваля?
- 9) Чому дорівнює величина універсальної газової сталої і які її одиниці вимірювання? Чому дорівнює величина питомої газової сталої для кисню?
- 10) Як змінюються основні параметри газового струменя уздовж вісі сопла?
- 11) Про що свідчить витікання кисню з сопла Лаваля з величиною тиску на виході з сопла рівною / більшою / меншою за навколишнє середовище?

2 ГІДРОДИНАМІКА КОНВЕРТЕРНОЇ ВАННИ

2.1 Потужність перемішування конвертерної ванни

Циркуляцію конвертерної ванни викликають здебільшого:

- 1) безпосередній вплив кисневого струменя (струменів);
- 2) дія спливаючих бульбашок монооксиду вуглецю.

Потужність перемішування ванни кисневим струменем при верхній продувці розраховують за формулою

$$N_{\text{двт}} = G_{O_2} E_{\text{кін}} \psi, \text{ Вт}, \quad (2.1)$$

де $\psi = 0,20 \dots 0,25$ – частка кінетичної енергії струменів, що витрачається на перемішування ванни.

У випадку застосування сопел Лавалля розширення газу в каналі сопла відбувається адіабатично й величина $E_{\text{кін}}$ визначається за формулою

$$E_{\text{кін}} = \frac{k}{k-1} \cdot R_2 T_o \left[1 - \left(\frac{P_{\text{наг}}}{P_o} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \text{ Дж/кг}. \quad (2.2)$$

Перемішування ванни бульбашками монооксиду вуглецю при їхньому спливанні з глибини h_o здійснюється завдяки ізотермічному розширенню газу

$$L_{\text{ізом}} = - \int_{P_1}^{P_2} V dP = R_{CO} T_m \cdot \ln \frac{P_{\text{наг}} + P_{\text{фер}}}{P_{\text{наг}}}, \text{ Дж/кг}, \quad (2.3)$$

де $P_{\text{наг}} = 1,05 \cdot 10^5$ – тиск атмосфери конвертера і шару шлаку, Па;

$P_{\text{фер}} = \rho_m g h_o$ – феростатичний тиск металу, що діє на бульбашку, Па;

$h_o \approx 0,5 h_{\text{ван}}$ – середня дистанція, яку долає бульбашка CO впродовж спливання, приймається близько половини глибини спокійної ванни, м.

Питома потужність перемішування ванни бульбашками CO складає

$$N_{CO} = G_{CO} L_{\text{ізом}}, \text{ Вт/т}, \quad (2.4)$$

де G_{CO} – масова інтенсивність виділення оксиду вуглецю в ванні на 1 т сталі

$$G_{CO} = \frac{1000 \cdot 28 \cdot V_C}{100 \cdot 60 \cdot 12}, \text{ кг/(т} \cdot \text{с)}. \quad (2.5)$$

Інтенсифікація перемішування ванни бульбашками інертного газу (зазвичай аргону) при комбінованій продувці за схемою «кисень зверху + інертний газ знизу» відбувається не лише за рахунок ізотермічного розширення газу, а й за рахунок поліпшення умов протікання реакції окислення вуглецю в об'ємі металу. Цьому сприяє перебування у розплаві газових бульбашок з низьким парціальним тиском монооксиду вуглецю та із значною площею поверхні. Оскільки розрахунок процесів кінетики реакції окислення вуглецю є доволі складним, то при вирішенні задач у цьому розділі достатньо прийняти, що перемішування ванни бульбашками інертного газу відбувається аналогічно до випадку перемішування ванни бульбашками монооксиду вуглецю.

2.2 Поверхня контакту фаз в умовах конвертерного процесу

Більша швидкість окислювання домішок конвертерної ванни (на два порядки вище, ніж у мартенівській) пов'язана зі значною площею поверхні контакту реагуючих фаз. Зміни об'ємів і поверхні контакту реагуючих фаз впродовж продувки впливають на гідродинамічний стан ванни й умови масопереносу в ній. Перелічене вище залежить здебільшого від питомої інтенсивності продувки i_{O_2} , м³/(т·хв) металу киснем.

Найбільш надійні результати з розрахунку об'єму й площі поверхні фаз можуть бути отримані в умовах, що відповідають за часом середині продувки. До цього моменту частково стабілізуються неконтрольовані параметри й фактори, характерні для початку процесу (склад і температура чавуну, вид, кількість й якість охолоджувачів і флюсів тощо). Деякі параметри процесу, необхідні для розрахунків (швидкість окислення вуглецю, температура ванни, кількість рідкої шлакової фази, збільшення об'єму ванни), можна або визначити, якщо виходити з заданої інтенсивності продувки, наприклад швидкість окислення вуглецю V_C й збільшення глибини ванни $\Delta h_{ван}$, або прийняти як найбільш імовірні для середини процесу продувки (температура металу t_m й маса шлаку $M_{шл}$). Крім цього, величини розмірів крапель металу й шлаку, бульбашок кисню й монооксиду вуглецю, поверхневого натягу металу й шлаку, параметрів реакційної зони та ін., що використовуються у розрахунках, є більш надійними.

Виходячи зі сказаного вище та керуючись інформацією з роботи [2], приймаємо наступні умови:

- 1) швидкість циркуляційних потоків і спливання одиночних бульбашок кисню й монооксиду вуглецю в металі становить близько 1 м/с; середні швидкості спливання в реакційній зоні 5...10 м/с;
- 2) фронт зародження бульбашок монооксиду вуглецю й початок руху спливаючих бульбашок кисню перебувають на глибині 50 % від глибини спокійної ванни;
- 3) середній розмір крапель металу $\bar{r}_m = 0,1$ мм, шлаку $\bar{r}_{шл} = 2$ мм, бульбашок кисню й монооксиду вуглецю $\bar{r}_b = 1$ см;
- 4) приєднана до кисневого струменя маса крапель металу $m_{крап} / m_{O_2} = 3$ кг/кг O_2 ;
- 5) рівень й об'єм ванни збільшуються в середині продувки втричі;
- 6) у збільшенні об'єму ванни беруть участь бульбашки кисню й монооксиду вуглецю відповідно до їх обсягу. В окремих випадках можна приймати їхній внесок однаковим (коли немає даних для розрахункового визначення одного з них);
- 7) густина $\rho_{шл}$ і кількість шлаку $M_{шл}$ становлять відповідно 3 т/м³ й 10 % від маси металу;
- 8) глибина спокійної ванни конвертера з верхньою продувкою може бути визначена за його садкою G за статистичною моделлю

$$h_{ван} = 0,439G^{0,251}, \text{ м.} \quad (2.6)$$

- 9) швидкість окислення вуглецю $V_C \approx 0,1 \cdot i_{O_2}$, %/хв;

- 10) температура металу в середині продувки приймається 1500 °С.

Через деяку довільність у виборі окремих параметрів запропоновані розрахунки є орієнтовними, тому отримані результати можуть відрізнятися від відповідей, але не більш ніж в 1,5...2 рази.

Поверхня контакту фаз у струмені на 1 м³ кисню, що вдувається

$$\sum S_{крап} = \bar{S}_{крап} \cdot n_{крап} = \frac{m_{крап}}{r_m \rho_m} = \frac{3m_{O_2}}{r_m \rho_m}, \text{ м}^2. \quad (2.7)$$

Сумарний об'єм бульбашок кисню, що перебувають у ванні*

$$\sum V_{\bar{o}.O_2} = \frac{i_{O_2} GRT \tau_{сплив}}{60 \cdot V_m \cdot P_{\bar{o}}}, \text{ м}^3. \quad (2.8)$$

Сумарна площа поверхні бульбашок кисню у ванні

$$\sum S_{\bar{o}.O_2} = \frac{\bar{S}_{\bar{o}.O_2} \cdot \sum V_{\bar{o}.O_2}}{V_{\bar{o}.O_2}} = \frac{4\pi \bar{r}_{\bar{o}}^{-2} \cdot \sum V_{\bar{o}.O_2}}{\frac{4}{3}\pi \bar{r}_{\bar{o}}^{-3}} = \frac{3 \cdot \sum V_{\bar{o}.O_2}}{\bar{r}_{\bar{o}}}, \text{ м}^2. \quad (2.9)$$

Аналогічні формули для визначення площ поверхонь бульбашок монооксиду вуглецю й поверхні контакту шлак-метал:

$$\sum S_{\bar{o}.CO} = \frac{3 \cdot \sum V_{\bar{o}.CO}}{\bar{r}_{\bar{o}}}, \text{ м}^2, \quad (2.10)$$

$$\sum S_{шл} = \frac{3 \cdot \sum V_{шл}}{r_{шл}}, \text{ м}^2. \quad (2.11)$$

де $\sum V_{\bar{o}.CO}$ – сумарний об'єм бульбашок монооксиду вуглецю в ванні, що є вдвічі більшим за сумарний об'єм бульбашок кисню, розрахований за формулою (2.8), м³.

2.3 Виноси бризок і пилу з конвертера

В умовах інтенсивного газовиділення з конвертера спостерігаються виноси часток металу, шлаку й сипучих. Максимальний розмір цих часток можна розрахувати з умови рівноваги сил інерції, що рухають часточку, та її ваги, яка виражається відомим рівнянням швидкості витання

$$w_2 = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{gd_u(\rho_u - \rho_2)}{\zeta \rho_2}}, \text{ м/с}, \quad (2.12)$$

де ζ – коефіцієнт аеродинамічного опору, що залежить від форми часток, їхньої шорсткості й величини критерію Рейнольдса.

В аеродинамічних умовах конвертерної плавки, приймаючи форму всіх часток за сферичну й без шорсткості, значення ζ близько до одиниці.

* Середній тиск у бульбашці дорівнює феростатичному тиску металу на неї (див. пояснення до формули (2.3)).

Отже, максимальний розмір часточок металу, шлаку і сипучих, які можуть бути винесені з конвертер димовими газами впродовж продувки, може бути знайдений з формули (2.12). Швидкість руху конвертерних газів у робочому просторі конвертера $w_{p.n.}$ і горловині w_z становить

$$w = \frac{V_{d.z} \cdot T_{d.z}}{60 \cdot S \cdot 273}, \text{ м/с}, \quad (2.13)$$

де $V_{d.z}$ і $T_{d.z}$ – відповідно об'єм (м^3) і температура (К) димових газів, склад яких можна прийняти як 100 % монооксиду вуглецю;

S – залежно від швидкості, що розраховується (у робочому просторі чи в горловині), площа відповідно горизонтального перерізу робочого простору або горловини, м^2 .

Розрахунки за цими формулами наближені, оскільки приймається, що газовиділення рівномірне по площі ванни, а воно найбільш інтенсивно протікає у зоні біля фурми. Крім того, через горловину будуть винесені лише ті частки, які можуть витати в порожнині конвертера, де швидкість димових газів менша.

2.4 Задачі

- 1) Визначити потужність перемішування ванни кисневим струменем, що витікає з сопла Лаваля, за питомої інтенсивності продувки $3 \text{ нм}^3/(\text{т} \cdot \text{хв})$, тиску дуття перед соплом та навколишнього середовища відповідно 9 і 1,05 ата та температурі 20°C .
- 2) Визначити потужність перемішування ванни кисневим струменем за умовою задачі 1, але за питомої інтенсивності продувки 6 і $9 \text{ нм}^3/(\text{т} \cdot \text{хв})$.
- 3) На скільки збільшиться потужність перемішування ванни кисневим струменем за умовою задачі 1, за тиску перед соплом 15 ата?
- 4) Визначити потужність перемішування ванни кисневим струменем, використовуючи умови задачі 1, якщо продувка здійснюється в конвертері з тиском у робочому просторі 4 ата.
- 5) Визначити питому потужність перемішування ванни бульбашками монооксиду вуглецю для конвертерів ємністю 100 і 350 т при температурі ванни 1400°C , якщо швидкість окислення вуглецю в обох конвертерах може змінюватись в межах $0,1 \dots 0,3 \text{ \%}/\text{хв}$.

- 6) Визначити питому потужність перемішування конвертерної ванни бульбашками монооксиду вуглецю, якщо тиск у робочому просторі конвертера ємністю 60 т становить 4 ата, температура 1400 °С, а швидкість окислення вуглецю 0,1 %/хв.
- 7) Визначити питому потужність перемішування конвертерної ванни бульбашками монооксиду вуглецю в середині продувки за питомої інтенсивності продувки $3 \text{ нм}^3/(\text{т}\cdot\text{хв})$, температурі 1550 °С. Ємність конвертера 250 т.
- 8) Яка швидкість окислення вуглецю в конвертері ємністю 350 т за температури металу 1550 °С, якщо питома потужність перемішування ванни бульбашками монооксиду вуглецю 35 кВт/т?
- 9) Реакційна зона, що утворилася при продувці киснем з питомою інтенсивністю $4,2 \text{ нм}^3/(\text{т}\cdot\text{хв})$, має глибину 0,8 м. Припускаючи, що вся маса монооксиду вуглецю виділяється навколо реакційної зони, визначити потужність перемішування ванни бульбашками монооксиду вуглецю при температурі 1500 °С.
- 10) Для умов верхньої продувки з питомою інтенсивністю $3 \text{ нм}^3/(\text{т}\cdot\text{хв})$ розрахуйте, у скільки разів питома потужність перемішування конвертерної ванни кисневим струменем більша або менша за потужність перемішування ванни бульбашками монооксиду вуглецю. Температура і тиск кисню перед соплом становлять відповідно 20 °С і 11 ата. Тиск атмосфери у робочому просторі конвертера ємністю 100 т становить 1,07 ата, температура металу 1500 °С.
- 11) Для умов задачі 10 розрахуйте, на скільки збільшиться сумарна потужність перемішування ванни при переході з верхньої на комбіновану продувку (кисень зверху + аргон знизу) з питомою інтенсивністю продувки аргоном $0,05 \text{ нм}^3/(\text{т}\cdot\text{хв})$.
- 12) Визначити поверхню контакту фаз у струмені на 1 м^3 кисню.
- 13) На скільки збільшиться об'єм газошлакометалевої емульсії при збільшенні швидкості окислення вуглецю в середині продувки з 0,2 до 0,3 %/хв у конвертері ємністю 130 т.
- 14) На скільки об'єм, який займає шлак, менше об'єму металу наприкінці продувки при кількості шлаку 14 %?

- 15) Які сумарний і питомий об'єми бульбашок кисню в конвертерній ванні ємністю 350 т за питомої інтенсивності продувки $3 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{хв})$?
- 16) Які сумарна й питома поверхні бульбашок кисню в конвертерній ванні за умов задачі 15?
- 17) Питомий об'єм конвертера ємністю 350 т становить $0,73 \text{ м}^3/\text{т}$. Визначити, за якої інтенсивності продувки газошлакометалева емульсія займе весь обсяг конвертера. Середній тиск у бульбашках монооксиду вуглецю обчислити з урахуванням повного спінювання шлаку й 25 % маси металу.
- 18) Знайти максимальний розмір часток металу, шлаку і вапна, що виносяться з конвертера ємністю 130 т, за питомої інтенсивності продувки $2 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{хв})$, діаметру горловини 2,5 м і температури $1500 \text{ }^\circ\text{C}$. Густину шлаку і вапна прийняти відповідно 3500 й 2500 кг/м^3 .
- 19) Як зміниться максимальний розмір часток вапна, що виносяться з конвертера ємністю 130 т, при збільшенні діаметра горловини з 2,4 до 2,9 м за питомої інтенсивності продувки $2 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{хв})$ і температури $1500 \text{ }^\circ\text{C}$?
- 20) Як зміниться максимальний розмір часток вапна, що виносяться з конвертера ємністю 130 т з діаметром горловини 2,5 м, при збільшенні питомої інтенсивності продувки з 2 до $10 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{хв})$ за температури $1500 \text{ }^\circ\text{C}$?
- 21) При виплавці сталі в конвертері ємністю 160 т з діаметром горловини 2,8 м застосовують сортоване вапно фракцією не більше 30 мм. Визначити граничну інтенсивність продувки, за якої не буде спостерігатися винос вапна, якщо температура димових газів складає $1500 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 22) За однакової питомої інтенсивності продувки $5 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{хв})$ і температури $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ визначити максимальний розмір часток металу, що виносяться з конвертерів ємністю 160 й 350 т, які мають горловини діаметром 3,1 й 4,3 м відповідно.
- 23) Визначити швидкість окислення вуглецю при температурі $1550 \text{ }^\circ\text{C}$ у конвертері ємністю 350 т, якщо діаметр його горловини 4 м, максимальний розмір часток вапна, що виносяться через горловину, складає 10 мм.
- 24) У конвертері ємністю 350 т, що має горловину діаметром 3,5 м, здійснюють продувку з питомою інтенсивністю $5 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{хв})$. Як зміниться максимальний розмір часток металу, що виносяться через горловину за температури $1500 \text{ }^\circ\text{C}$, якщо тиск у порожнині конвертера збільшити в 4 рази?

25) Побудувати графік впливу питомої інтенсивності продувки на максимальний розмір часток вапна, що виносяться димовими газами з температурою 1500 °С з конвертера ємністю 160 т, через горловину діаметром 2,7 м. Діапазон зміни питомої інтенсивності продувки прийняти з 2 до 11 м³/(т·хв) з кроком 1,5 м³/(т·хв).

26) Побудувати графік залежності від температури максимального розміру часток металу, що виносяться з конвертера ємністю 160 т через горловину діаметром 2,5 м, за питомої інтенсивності продувки 2,5 м³/(т·хв). Діапазон зміни температури прийняти з 1300 до 1650 °С з кроком 50 °С.

2.5 Питання для самоперевірки

- 1) Чи впливає температура конвертерних газів на максимальний розмір часток, що виносяться з конвертера? Якщо так, то поясніть, як і чому.
- 2) Які процеси призводять до виникнення інтенсивного перемішування конвертерної ванни?
- 3) Які швидкості руху металу в мартенівській і конвертерній ванні?
- 4) Який середній розмір крапель металу, шлаку і газових бульбашок у газошлакометалевій емульсії?
- 5) Від яких параметрів залежить максимальний розмір часток, що виносяться з конвертера під час продувки?
- 6) Від чого залежить кінетична енергія газового струменя, що витікає з сопла, й потужність перемішування металу?
- 7) Від чого залежить потужність перемішування ванни бульбашками монооксиду вуглецю?
- 8) Поясніть істотне розходження в тривалості конвертерної й мартенівської плавки.
- 9) Часточки якого матеріалу: металу, вапна або шлаку, легше будуть виноситися димовими газами через горловину конвертера за однакових розмірах часток й умовах продувки? Відповідь обґрунтуйте.
- 10) Що є причиною збільшення рівня й об'єму конвертерної ванни в середині продувки? У скільки разів збільшуються ці показники?
- 11) Чи існує взаємозв'язок між інтенсивністю продувки й об'ємом газів, що виходять з конвертера за одиницю часу? Якщо так, то поясніть який.

3 ОСНОВИ КІНЕТИКИ МАСООБМІНУ І РАФІНУВАННЯ СТАЛІ ВІД ДОМІШОК У КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОМУ ПРОЦЕСІ

3.1 Розчинення твердих речовин у рідкій фазі

У практиці сталеплавильного виробництва протікають процеси розчинення скрапу, графіту, феросплавів у металі, вапна й інших шлакоутворюючих матеріалів у шлаку тощо, від інтенсивності протікання яких залежать хід і результати процесу плавки.

Швидкість розчинення твердих тіл у рідині найчастіше лімітується дифузиею речовини, що розчиняється, у рідкій фазі. Відповідно до досліджень Нернста, кількість речовини, що розчиняється в рідині в одиницю часу (*потік маси*), може бути визначена за формулою:

$$Q_m = \frac{D}{\delta} (C_{нас} - C_o) S, \text{ кг/с}, \quad (3.1)$$

де C_o – початкова масова концентрація домішки в розчині, кг/м³;

S – площа поверхні тіла, що розчиняється, м².

Концентрацією насичення називається така концентрація, за якої розчинення домішки припиняється, а розчин гетерогенізується.

Відповідно до теорії Нернста, у дифузійному шарі рідина нерухома, зміна концентрацій відбувається за лінійним законом. Тоді

$$Q_m = \beta (C_{нас} - C_o) S, \text{ кг/с}, \quad (3.2)$$

де $\beta = \frac{D}{\delta}$ – коефіцієнт масопередачі, м/с.

Коефіцієнт масопередачі характеризує масу речовини (кг), яка передається дифузиею від поверхні розділу фаз площею 1 м² у навколишнє середовище або навпаки за час величиною 1 с за різниці масових концентрацій між поверхнею розділу фаз та у навколишньому середовищі в 1 кг/м³. З визначення цього терміну випливає його розмірність

$$\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (3.3)$$

Величина коефіцієнта масопередачі залежить від форми та розміру часточки, що розчиняється, швидкості руху середовища уздовж часточки та його в'язкості, а також коефіцієнту дифузії матеріалу часточки у середовищі за даних умов.

Рівняння (3.2) може бути застосоване для описання процесу розчинення оксиду кальцію вапна в шлаку

$$\frac{d(\text{CaO})}{d\tau} = \frac{Q_{m.\text{CaO}}}{V_{\text{шл}}} = \beta[(\text{CaO})_{\text{нас}} - (\text{CaO})] \cdot \frac{S_{\text{вап}}}{V_{\text{шл}}}, \%/\text{с}, \quad (3.4)$$

де $(\text{CaO})_{\text{нас}}$ і (CaO) – відповідно масова частка оксиду кальцію в шлаку біля поверхні шматків вапна (концентрація насичення) і середня в шлаку, %.

Розчинення твердих речовин може бути інтенсифіковане за рахунок їх подрібнення, отже, збільшення поверхні контакту рідини з часточками. При однаковій масі твердої фази сумарна площа поверхні часток збільшується зворотно пропорційно до їх ефективного розміру. Для часток сферичної форми відношення площі поверхні часточки до її об'єму

$$\frac{S_q}{V_q} = \frac{\pi d_q^2}{\pi d_q^3 / 6} = \frac{6}{d_q} = \frac{3}{r_q}, 1/\text{м}. \quad (3.5)$$

Тоді сумарна площа поверхні всіх часток

$$\sum S_q = S_q \cdot n_q = \frac{6V_q n_q}{d_q} = \frac{6\sum V_q}{d_q} = \frac{6\sum m_q}{d_q \rho_q}, 1/\text{м}. \quad (3.6)$$

Взаємозв'язок розмірів великих шматків $d_{\text{вел}}$ і подрібнених часток $d_{\text{мал}}$, що мають однакову загальну масу, може бути знайдена з виразу

$$\frac{\pi d_{\text{вел}}^3}{6} \cdot \rho_q = n_q \cdot \frac{\pi d_{\text{мал}}^3}{6} \cdot \rho_q, 1/\text{м}, \quad (3.7)$$

звідки

$$d_{\text{мал}} = \frac{d_{\text{вел}}}{\sqrt[3]{n_q}}, \text{м}. \quad (3.8)$$

Тоді за інших рівних умов відношення швидкості розчинення твердої фази однакової маси, що складає з дрібних або великих часток дорівнює

$$\frac{d_{\text{мал}}}{d_{\text{вел}}} = \sqrt[3]{n_q}. \quad (3.9)$$

Навіть для орієнтовної оцінки часу розчинення твердих фаз різних матеріалів у металі або шлаку сталеплавильної ванни необхідно враховувати різницю концентрацій і фізичні властивості рідини біля поверхні твердих часток, тобто властивості насиченого розчину.

Якщо концентрація речовини, що дифундує, у рідині мала порівняно з її концентрацією у твердому тілі, то маса речовини, що розчиняється, в одиницю часу приблизно дорівнює дифузійному потоку (*потоку маси*):

$$-\frac{dm}{d\tau} = -\frac{dr}{d\tau} S C_{\text{мс}} = \beta S (C_{\text{нас}} - C_o), \text{ кг/с.} \quad (3.10)$$

Лінійна швидкість розчинення

$$-\frac{dr}{d\tau} = \frac{\beta(C_{\text{нас}} - C_o)}{C_{\text{мс}}}, \text{ м/с.} \quad (3.11)$$

Масову концентрацію C можна перерахувати у більш вживану на виробництві масову частку $[\%C]$ з формули

$$C = \frac{[\%C] \rho_{\text{розч}}}{100}, \text{ кг/м}^3. \quad (3.12)$$

Тоді для вмісту домішки, вираженому в масових відсотках, лінійна швидкість розчинення складає

$$-\frac{dr}{d\tau} = \frac{\beta([\%C]_{\text{нас}} - [\%C]_o) \rho_{\text{рід}}}{[\%C]_{\text{мс}} \rho_{\text{мс}}}, \text{ м/с.} \quad (3.13)$$

де $[\%C]_{\text{нас}}$, $[\%C]_o$, $[\%C]_{\text{мс}}$ – відповідно масові частки домішки у насиченому шлаку, фактична у шлаку та у твердому матеріалі, що розчиняється, %;
 $\rho_{\text{рід}}$ – густина рідини, у якій розчинюється домішка, кг/м³.

При розчиненні чистого матеріалу $C_{\text{мс}} = \rho_{\text{мс}}$ і $[\%C]_{\text{мс}} = 100\%$, тоді

$$-\frac{dr}{d\tau} = \frac{\beta(C_{нас} - C_o)}{\rho_{мс}} = \frac{\beta([\%C]_{нас} - [\%C]_o)\rho_{pid}}{100\rho_{мс}}, \text{ м/с.} \quad (3.14)$$

Наведені рівняння, на жаль, недостатньо точні, оскільки не враховують масу компонента C у розчиненій частині твердого тіла, тобто необхідно враховувати повний баланс маси. Це вкрай важливо при аналізі кінетики розчинення вапна в шлаку, коли масова концентрація оксиду кальцію й вапна в шлаку близькі за величиною. Рівняння лінійної швидкості розчинення, що враховує повний баланс маси, яке може бути застосоване за будь-якої концентрації розчину $[\%C]$, має вигляд

$$-\frac{dr}{d\tau} = \frac{\beta(C_{нас} - C_o)}{C_{мс} - \frac{\rho_{мс}}{\rho_{pid}} \cdot C_o} = \frac{\beta([\%C]_{нас} - [\%C]_o)\rho_{pid}}{([\%C]_{мс} - [\%C]_o)\rho_{мс}}, \text{ м/с.} \quad (3.15)$$

Якщо маса твердих часток незначна порівняно з масою всієї рідини, тобто за сталої концентрації розчину під час розчинення часток, то при постійному значенні час розчинення сферичної частки

$$\tau = \frac{(r_{н.ч} - r_{к.ч})([\%C]_{мс} - [\%C]_o)\rho_{мс}}{\beta([\%C]_{нас} - [\%C]_o)\rho_{pid}}, \text{ с.} \quad (3.16)$$

На основі (3.16) можна розраховувати час повного розчинення кускових і порошкоподібних матеріалів у металі й шлаках (для $r_{к.ч} = 0$).

Кінетика розчинення матеріалів, що містять вуглець, у рідкому металі вимагає додаткових уточнень, сутність яких зводиться до наступного. По-перше, концентрація вуглецю в рідкому металі на поверхні з графітом буде, вочевидь, близька до концентрації насичення $[\%C]_{нас}$, величина якої залежить від температури

$$[\%C]_{нас} = 1,34 + 2,54 \cdot 10^{-3} t, \text{ \%}. \quad (3.17)$$

По-друге, вміст вуглецю в матеріалах, що містять вуглець, близький до 100 %, а в металі під час науглецьовування зазвичай не перевищує 2 %.

Виходячи зі сказаного й беручи до уваги те, що процес розчинення матеріалу, що містить вуглець, в рідкому металі лімітується переносом вуглецю в прилягаючому до твердої фази прикордонному шарі рідкого металу, масову й

лінійну швидкості розчинення можна з достатньою точністю визначати за формулами:

$$-\frac{dm}{d\tau} = \frac{\beta_C([\%C]_{нас} - [\%C]_o)\rho_{cm}S}{100}, \text{ кг/с}, \quad (3.18)$$

$$-\frac{dr}{d\tau} = -\frac{1}{S} \cdot \frac{dV}{d\tau} = -\frac{dm}{d\tau} \cdot \frac{1}{\rho_{вуг}S} = \frac{\beta_C([\%C]_{нас} - [\%C]_o)\rho_{cm}}{100\rho_{вуг}}, \text{ м/с}, \quad (3.19)$$

$\rho_{вуг} = 1700$ – густина матеріалу, що містить вуглець, кг/м³.

3.2 Видалення домішок у шлакову фазу

Ефективність рафінування сталі шлаками в сталеплавильних процесах залежить від кількості взаємодіючого шлаку (% від маси металу) і його здатності поглинати домішку, що має бути видалена з металу. Останнє характеризується коефіцієнтом розподілу домішок між шлаком і металом.

$$L_E = \frac{(\%E)}{[\%E]}. \quad (3.20)$$

Повноту видалення домішок, яка характеризується кінцевим (*залишковим*) вмістом домішки в металі або відношенням кількості вилученої домішки до початкового її вмісту, називають *ступенем рафінування* δ :

$$\delta_E = \frac{[\%E]_n - [\%E]_к}{[\%E]_n} \cdot 100, \%, \quad (3.21)$$

На практиці розрахункові формули для визначення можливого ступеня рафінування металу шлаками можуть бути отримані з рівнянь балансу розглянутої домішки в системі метал-шлак. При одношлаковому процесі рівняння має вигляд

$$[\%E]_{шух} = [\%E]_к + 0,01M_{шл}(\%E)_к, \%. \quad (3.22)$$

З урахуванням формули (3.20) з балансового рівняння (3.22) можна отримати формулу для визначення кінцевого вмісту домішки в металі

$$[\% E]_k = \frac{[\% E]_{шух} - [\% E]_{сн} \pm [\% E]_z}{1 + 0,01M_{шл}L_E}, \%, \quad (3.23)$$

де $[\% E]_{шух}$, $[\% E]_{сн}$, $[\% E]_z$ – відповідно кількість домішки, внесеної всіма шихтовими матеріалами і добавками впродовж плавки, видаленої зі спущеним шлаком, поглиненої (+) або вилученої (–) в газову фазу, % від маси металу.

У сталеплавильних процесах можливі спуск і наведення нового шлаку. Якщо прийняти, що на кожній стадії використовується однакова кількість шлаку, досягаються однакові величини коефіцієнтів розподілу, а шлаки після кожної стадії повністю відокремлюються від металу, то справедливе рівняння

$$[\% E]_k = \frac{[\% E]_{шух}}{(1 + 0,01M_{шл.о}L_E)^{n_{сн}+1}}, \%, \quad (3.24)$$

де $M_{шл.о}$ – одноразова порція шлаку, %;

$n_{сн}$ – кількість операцій спуску й наступного наведення шлаку.

Зазвичай, обмежуються одно- рідше дворазовим оновленням шлаків. Для цього у випадку різних значень $M_{шл}$ та L_E у двох окремих стадіях процесу користуються балансовим рівнянням

$$[\% E]_{кін} = \frac{[\% E]_{шух}}{(1 + 0,01M_{шл.1}L_{E.1})(1 + 0,01M_{шл.2}L_{E.2})}, \%, \quad (3.25)$$

де $M_{шл.1}$, $M_{шл.2}$ – кількість шлаку на першій і другій стадіях процесу;

$L_{E.1}$, $L_{E.2}$ – коефіцієнт розподілу домішки між шлаком і металом на першій і другій стадіях процесу.

Добуток L_E і $M_{шл}$ називають показником рафінувальної здатності або рафінувальним потенціалом шлаку $K_{шл}$. Він монет бути застосованим для аналізу технології різних сталеплавильних процесів:

$$K_{шл} = M_{шл}L_E, \text{ т.} \quad (3.26)$$

Для аналізу впливу низки технологічних факторів на дефосфорацію з погляду термодинаміки процесу можна використати константу рівноваги реакції окислення фосфору, що за даними Вінклера й Чипмена може бути розрахована за рівнянням:

$$\lg K_p = \lg \frac{a_{(4CaO \cdot P_2O_5)}}{[\%P]^2 a_{(FeO)}^5 a_{(CaO)}^4} = \frac{40067}{T} - 15,06. \quad (3.27)$$

Тоді при рівновазі металу зі шлаком

$$[\%P] = \sqrt{\frac{a_{(4CaO \cdot P_2O_5)}}{K_p a_{(FeO)}^5 a_{(CaO)}^4}}. \quad (3.28)$$

При визначенні режиму дефосфорації необхідно враховувати можливе відновлення фосфору під час розкислення, легування, випуску й розливання металу. Воно залежить від кількості й виду феросплавів, що присаджуються, а також від вмісту в них фосфору. Відновлення фосфору зі шлаку відбувається внаслідок зменшення вмісту (FeO) й основності шлаку через вигар феросплавів і розмивання футеровки ковша.

Зміну вмісту фосфору в металі внаслідок його відновлення зі шлаку $\Delta[\%P]_{відн}$ можна визначити з залежності

$$\Delta[\%P]_{відн} = 0,437 \cdot 10^{-4} M_{шл} (P_2O_5) \omega, \% \quad (3.29)$$

де $M_{шл}$ – кількість шлаку, що контактує з металом у період розкислення й легування, %; (P_2O_5) – початкова масова частка P_2O_5 у шлаку, %; ω – ступінь відновлення фосфору зі шлаку в період розкислення, %.

Ступінь відновлення фосфору в середньому 5 % при розкисленні тільки феромарганцем, при розкисленні спокійної сталі досягає 35 % і легованої сталі 75 %, якщо не вжити заходів задля уникнення рефосфорації.

3.3 Задачі

- 1) Визначити сумарну площу поверхні часточок вапна, якщо при дробленні 1 кг вапна отримали часточки: а) кубічної форми з довжиною ребра 10^{-3} см, б) сферичної форми діаметром $5 \cdot 10^{-4}$ см. Густина вапна $2,5$ г/см³.
- 2) Визначити число часточок, що утворяться при подрібненні 10 см³ графіту на правильні кубики з довжиною ребра $5 \cdot 10^{-3}$ см.
- 3) У скільки разів збільшиться площа поверхні часточок у результаті подрібнення графітового куба із довжиною ребра $0,2$ м до часточок кубічної форми з довжиною ребра $5 \cdot 10^{-2}$ см?

- 4) У скільки разів збільшиться швидкість розчинення в шлаку шматка вапна діаметром 80 мм при зменшенні його діаметра відповідно у 2; 10; 100; 1000 разів?
- 5) В результаті переходу на сортоване вапно фракцією 20 мм швидкість його розчинення збільшилася в 5 разів у порівнянні з використанням крупних шматків вапна. Визначити розмір крупних шматків вапна.
- 6) У результаті подрібнення й сортування вапна діаметр його сферичних часток склав 10 мм, а їх кількість збільшилась у 10 разів. Яким був діаметр шматків вапна до подрібнення?
- 7) Розрахувати час повного розчинення часточки графіту діаметром 0,1 мм у сталі з вмістом вуглецю 1 % при температурі 1440 °С, якщо коефіцієнт масопередачі становить 0,05 см/с, а вміст вуглецю в графіті 95 %.
- 8) Для умов попередньої задачі визначити час повного розчинення шматка графіту діаметром 100 мм.
- 9) Розрахувати час повного розчинення часточки вапна діаметром 0,1 мм у шлаку із вмістом оксиду кальцію 35 %, якщо коефіцієнт масопередачі становить 0,003 см/с, концентрація насичення шлаку оксидом кальцію 59 %, середня густина шлаку 3,5 г/см³, а вміст оксиду кальцію у вапні 90 %.
- 10) Для умов попередньої задачі визначити час повного розчинення шматка вапна діаметром 40 мм.
- 11) Розрахувати час повного розчинення часточки вапна діаметром 0,1 мм у шлаку із вмістом оксиду кальцію 50 %, якщо коефіцієнт масопередачі становить 0,003 см/с, концентрація насичення шлаку оксидом кальцію 55 %, середня густина шлаку 3,5 г/см³, а вміст оксиду кальцію у вапні 90 %.
- 12) Визначити діаметр часточки вапна, що повністю розчинилася в шлаку із вмістом оксиду кальцію 35 % за 10 с. Решту необхідних даних взяти з попередньої задачі.
- 13) Якого діаметра повинні бути шматки вапна в присадці вагою 5 т, щоб у конвертері ємністю 160 т при кількості шлаку 12 % вони повністю розчинилися за 5 хв, якщо коефіцієнт масопередачі становить 0,003 см/с, вміст оксиду кальцію та концентрація насичення ним шлаку складають відповідно 35 % і 55 %, а вміст оксиду кальцію у вапні становить 85 %.

- 14)** Якою буде концентрація оксиду кальцію в шлаку в результаті розчинення вапна за умов попередньої задачі?
- 15)** Якої величини повинні бути шматки вапна в поперечнику, щоб наступна порція вапна масою 5 т також розчинялася за 5 хв? Решту умов прийняти з задач 13 і 14.
- 16)** Побудувати графік зміни в часі вмісту оксиду кальцію у шлаку впродовж перших 6 хв розчинення порції вапна масою 6 т у конвертері садкою 250 т. Кількість шлаку та його густина становлять відповідно 12 % і $3,5 \text{ г/см}^3$, вміст оксиду кальцію в ньому перед присадкою порції вапна 25 %, концентрація насичення шлаку оксидом кальцію 55 %, вміст оксиду кальцію у шматках сортованого вапна розміром 40 мм становить 90 %, коефіцієнт масопередачі становить $0,003 \text{ см/с}$. Точки для побудови графіку визначати через кожні 2 хв.
- 17)** Визначити кінцевий вміст сірки в металі за величини коефіцієнта розподілу сірки 3, 6 та 9, якщо маса шлаку становить 10 %, якщо видалення сірки зі спущеним шлаком та її переніс у газову фазу не відбувається, а загальний вміст сірки у шихті становить 0,055 %.
- 18)** За якої кількості шлаку можна вдвічі знизити вміст сірки в металі, якщо загальний вміст сірки у шихті становить 0,05 %, коефіцієнт розподілу сірки 8, а видалення сірки зі спущеним шлаком та її переніс у газову фазу не відбувається?
- 19)** Визначити, за якого вмісту сірки у вапні, витрата якого становить 5 %, ступінь десульфурації наприкінці плавки буде дорівнювати нулю, якщо вміст сірки у шихті становить 0,04 %, коефіцієнт розподілу сірки 5, а кількість шлаку 10 % від маси металу. Видалення сірки зі спущеним шлаком та її переніс у газову фазу не відбувається.
- 20)** У скільки разів збільшиться ступінь десульфурації за одноразового спуску й наведення нового шлаку у кількості 5 % у порівнянні із процесом без спуску шлаку за тієї ж його кількості? Коефіцієнт розподілу сірки та її вміст у шихтових матеріалах становлять відповідно 8 і 0,05 %.
- 21)** У скільки разів збільшиться ступінь десульфурації за дворазового спуску й наведення нового шлаку у кількості 5 % у порівнянні із процесом без спуску шлаку за тієї ж його кількості? Коефіцієнт розподілу сірки та її вміст у шихтових матеріалах становлять відповідно 6 і 0,055 %.

- 22)** Визначити вміст сірки наприкінці плавки при роботі на одному шлаку, з одно- і дворазовим його спуском і наведенням, якщо вміст сірки в шихті 0,06 %, а коефіцієнт розподілу сірки і загальна кількість шлаку становлять відповідно 6 і 12 %.
- 23)** Визначити кінцевий вміст сірки в сталі при роботі без спуску шлаку та з одно- і дворазовим його спуском, якщо вміст сірки в шихті 0,06 %, а коефіцієнт розподілу сірки і загальна кількість шлаку становлять відповідно 8 і 15 %.
- 24)** Яка кількість шлаку потрібна для зниження удвічі вмісту сірки в сталі при роботі без спуску шлаку, з одно- і дворазовим його спуском і наведенням, якщо вміст сірки в шихті 0,06 %. а коефіцієнт розподілу сірки становить 8?
- 25)** Визначити необхідну кількість шлаку для десятикратного зниження вмісту фосфору в сталі при роботі без спуску шлаку, з одно- та дворазовим його спуском і наведенням, якщо вміст фосфору в шихті 0,3 %, а коефіцієнт розподілу фосфору становить 50.
- 26)** Якою має бути кількість шлаку для умов попередньої задачі, якщо коефіцієнт розподілу фосфору збільшиться вдвічі?
- 27)** Визначити кінцевий вміст фосфору в сталі при роботі без спуску шлаку, з одно- і дворазовим його спуском, якщо вміст фосфору в шихті 0,3 %, коефіцієнт розподілу фосфору 50, а загальна кількість шлаку 9 %.
- 28)** Для сталих величин вмісту фосфору в шихті 0,3 % та коефіцієнту розподілу фосфору 100 визначити вміст фосфору в металі перед розкисленням при кількості шлаку відповідно 8; 12; 16 %.
- 29)** За якої кількості шлаку можна в 10 разів знизити вміст фосфору в металі перед розкисленням, якщо його вміст у шихті 0,2 %, а коефіцієнт розподілу фосфору 50?
- 30)** Визначити припустимий вміст фосфору у шихті для одержання в металі перед розкисленням вмісту фосфору 0,02 %, якщо кількість шлаку 10 %, а коефіцієнт розподілу фосфору 50.
- 31)** Визначити загальну кількість шлаку за умови його дворазового наведення в рівних кількостях при переробці шихти із вмістом фосфору 0,8 % для одержання в металі перед розкисленням вмісту фосфору 0,015 %. Коефіцієнт розподілу фосфору в обох шлаках становить 50.

- 32)** Визначити загальну кількість шлаку за умови його дворазового наведення в рівних кількостях при переробці шихти із вмістом фосфору 0,8 % для одержання в металі перед розкисленням вмісту фосфору 0,015 %. Коефіцієнт розподілу фосфору в обох шлаках становить 100.
- 33)** Визначити загальну кількість шлаку за умови його дворазового наведення в рівних кількостях при переробці шихти із вмістом фосфору 0,6 % для одержання в металі перед розкисленням вмісту фосфору 0,015 %. Коефіцієнт розподілу фосфору на першій та другій стадії становить відповідно 50 і 150.
- 34)** Визначити кількість шлаку, якщо при вмісті фосфору в шихті 0,2 % вміст оксиду (V) фосфору в шлаку складає 3,5 %.
- 35)** Рафінувальний потенціал кінцевих шлаків конвертерної плавки становить 10000. Визначити вміст фосфору у шихті, якщо вміст фосфору перед розкисленням становить 0,01 %.
- 36)** При продувці чавуну з вмістом фосфору 0,15 % вміст оксиду (V) фосфору в шлаку складає 2,5 %. Визначити, за якої кількості шлаку ступінь дефосфорації металу шлаком може сягнути 90 %.
- 37)** У момент зупинки продувки чавуну в конвертері були досягнуті наступні результати: коефіцієнт розподілу фосфору 10, ступінь дефосфорації металу шлаком 90. За якої кількості шлаку можливе досягнення таких результатів?
- 38)** При продувці чавуну, що містить 0,2 % фосфору, 0,8 % марганцю та 0,04 % сірки, концентрація зазначених елементів знизилася відповідно в 10, 4 і 2 рази та утворилося 14 кг шлаку. Визначити сумарну концентрацію продуктів реакції видалення елементів у шлаку.
- 39)** В металі перед розкисленням необхідно одержати не більше 0,016 % фосфору і 0,020 % сірки. Яким має бути їх вміст у шихті, якщо кількість шлаку перед розкисленням 13 %, а вміст оксиду (V) фосфору й сірки в ньому відповідно 2,7 й 0,1 %?
- 40)** Скільки разів необхідно скачати й навести шлак, щоб при переробці чавуну із вмістом фосфору 1,5 % забезпечити вміст фосфору в металі перед розкисленням 0,026 %? На кожній стадії процесу використовують 6 % шлаку та досягають однакових значень коефіцієнтів розподілу фосфору 110.

- 41) Використовуючи дані задачі 32, визначити вміст фосфору після проведення кожної стадії рафінування.
- 42) При переробці чавуну із вмістом фосфору 1,5 % без скачування шлаку було отримано 18 % шлаку. Визначити вміст фосфору в кінцевому металі при коефіцієнті розподілу фосфору відповідно 110 і 330.
- 43) Яку кількість шлаку слід навести в ході продувки розплаву із вмістом фосфору 1,5 %, щоб забезпечити вміст фосфору в металі перед розкисленням 0,026 % при коефіцієнті розподілу фосфору відповідно 110 й 330.
- 44) Визначити граничні (максимально й мінімально можливі) концентрації фосфору в металі наприкінці томасівського процесу, впродовж якого спостерігаються наступні показники: кількість шлаку 20...26 %, вміст фосфору в чавуні 1,5...2 %, коефіцієнт розподілу фосфору 300...400. Визначити вміст оксиду (V) фосфору в шлаку для обох випадків.
- 45) Визначити граничні (мінімально й максимально можливі) концентрації фосфору в металі наприкінці киснево-конвертерного процесу, впродовж якого спостерігаються наступні показники: кількість шлаку 12...17 %, вміст фосфору в чавуні 0,06...0,3 %, коефіцієнт розподілу фосфору 80...200.
- 46) Яким може бути максимальний вміст фосфору в металі перед розкисленням при виплавці середньовуглецевої сталі, щоб забезпечити вміст фосфору в готовій сталі 0,04 %, якщо кількість шлаку в ковші 2 %, а вміст оксиду (V) фосфору в ньому 2 %?
- 47) Яка максимальна кількість конвертерного шлаку із вмістом оксиду (V) фосфору 1,5 % може потрапити в сталерозливний ківш при виплавці середньолегованої сталі без ризику перевищення вмістом фосфору встановленої межі, якщо вміст фосфору в металі перед розкисленням 0,02 %, а в готовій сталі 0,045 %?
- 48) На скільки зміниться рівноважний вміст фосфору в металі в результаті підвищення температури кінця процесу з 1600 до 1650 °С? Яким збільшенням активності оксиду заліза або оксиду кальцію можна компенсувати цей температурний вплив?
- 49) Причиною зниження рівноважного вмісту фосфору в металі в 1,5 рази виявилася зміна константи рівноваги реакції дефосфорації, активності оксиду

заліза та оксиду кальцію. Визначити, у скільки разів зміниться кожний з параметрів при їх однаковому внеску в зниження рівноважного вмісту фосфору в металі.

50) У скільки разів зміниться рівноважний вміст фосфору в металі в результаті підвищення температури кінця процесу з 1600 до 1650 °С? Яким збільшенням активності оксиду заліза або оксиду кальцію можна компенсувати цей вплив?

51) Визначити, у скільки разів зміниться концентрація фосфору в результаті зниження активності оксиду заліза та оксиду кальцію в 1,5 рази.

52) У результаті додувки на "фосфор" його вміст зменшився в 1,25 рази, температура підвищилася з 1580 до 1600 °С. Вважаючи, що виробничий ефект відбувся тільки за рахунок підвищення окисленості шлаку, визначити, у скільки разів має збільшитися величина активності оксиду заліза.

3.4 Питання для самоперевірки

- 1) Від яких параметрів залежить швидкість розчинення твердих тіл у рідині? Напишіть формулу, опишіть параметри, які до неї входять, та їх розмірність.
- 2) Що таке концентрація насичення і яка її розмірність?
- 3) Якими способами інтенсифікують процес розчинення в рідині твердих матеріалів?
- 4) Напишіть формулу для часу розчинення твердих матеріалів у рідині, опишіть параметри, які до неї входять, та їх розмірність.
- 5) Від чого і як залежить концентрація насичення вуглецю в залізовуглецевому розплаві?
- 6) Що таке коефіцієнт масопередачі, від чого він залежить та яка його розмірність?
- 7) Що таке ступінь десульфурації й дефосфорації? Від чого він залежить? Напишіть його формулу, опишіть параметри, які до нього входять, та їх розмірність.

- 8) Що таке масова концентрація домішки у розчині та яка її розмірність? Надайте формулу перерахунку масової концентрації у масову частку, опишіть параметри, які до неї входять, та їх розмірність.
- 9) Що таке коефіцієнт розподілу сірки (фосфору) між металом і шлаком? Від чого він залежить та яка його розмірність?
- 10) Напишіть рівняння реакції видалення фосфору в умовах конвертерної плавки та формулу константи рівноваги для неї. Як величина константи рівноваги цієї реакції залежить від температури?
- 11) Напишіть рівняння реакції видалення сірки в умовах конвертерної плавки та формулу константи рівноваги для неї. Як величина константи рівноваги цієї реакції залежить від температури?

4 ТЕПЛОВА РОБОТА КОНВЕРТЕРНОГО АГРЕГАТУ І ШИХТОВКА ПЛАВКИ

4.1 Теплоємність речовин

Питома теплоємність – це кількість теплоти, яку необхідно надати 1 кг речовини для збільшення його температури на 1 °С (1 К). Одиниці вимірювання [Дж/(кг·К)] Залежно від параметра, що характеризує кількість речовини, використовують також об'ємну [Дж/(м³·К)] і мольну [Дж/(моль·К)] теплоємність. Для переходу між цими трьома величина використовують густину речовини, її молярну масу та молярний об'єм.

У теплових розрахунках використовують або істинні теплоємності c_{icm} , тобто теплоємності речовин при даній температурі, або середні теплоємності \bar{c} в межах заданих температур $t_2 - t_1$. У дослідах зазвичай знаходять середню величину теплоємності в даному інтервалі температур. Припустимо, що для нагрівання 1 моль речовини від T_1 до T_2 знадобилась теплота Q . Тоді середня теплоємність

$$\bar{c} = \frac{Q}{T_2 - T_1}, \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}). \quad (4.1)$$

Істинна теплоємність є границею величини середньої теплоємності, коли різниця температур наближається до нескінченно малої величини ΔT :

$$c_{icm} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{Q}{\Delta T} = \frac{dQ}{dT}, \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}). \quad (4.2)$$

При розрахунках теплових балансів металургійних процесів звичайно користуються табличними даними середніх теплоємностей речовин від нуля до певної температури t . Точне значення середньої теплоємності для будь-яких меж температури обчислюють, використовуючи математичну залежність істинної або іншої теплоємності від температури. Ця залежність виражається поліномом виду:

$$c_{icm} = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n, \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}), \quad (4.3)$$

де a_0, a_1, a_2 – коефіцієнти, які визначаються експериментальним шляхом.

Для розрахунків зазвичай досить 2-3 членів цього поліному. У випадку підвищення температури від T_1 до T_2 кількість тепла, що поглинається визначається за формулою

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} c_{icm} dT, \text{ Дж/моль.} \quad (4.4)$$

Підставляючи формулу (4.3) істинної теплоємності у формулу (4.4), отримуємо

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} (a_o + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n) dT, \text{ Дж/моль.} \quad (4.5)$$

Такий самий результат можна одержати з виразу (4.1) для середньої теплоємності:

$$Q = \bar{c}(T_2 - T_1), \text{ Дж/моль.} \quad (4.6)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (4.5) та (4.6), отримаємо

$$\bar{c}(T_2 - T_1) = \int_{T_1}^{T_2} (a_o + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n) dT, \text{ Дж/моль,} \quad (4.7)$$

або

$$\begin{aligned} \bar{c}(T_2 - T_1) = & a_o(T_2 - T_1) + a_1 \frac{T_2^2 - T_1^2}{2} + \\ & + a_2 \frac{T_2^3 - T_1^3}{3} + \dots + a_n \frac{T_2^{n+1} - T_1^{n+1}}{n+1}, \text{ Дж/моль,} \end{aligned} \quad (4.8)$$

звідки

$$\begin{aligned} \bar{c} = & a_o + a_1 \frac{T_2 + T_1}{2} + a_2 \frac{T_2^2 + T_2 T_1 + T_1^2}{3} + \\ & + \dots + a_n \frac{T_2^n + T_2^{n-1} T_1 + \dots + T_2 T_1^{n-1} + T_1^n}{n+1}, \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Для деяких речовин у довідковій літературі наводять температурну залежність середніх теплоємностей із вказівкою інтервалів температур, тоді

відпадає необхідність в інтегруванні з урахуванням залежності істинної теплоємності речовин від температури. Для визначення істинної теплоємності з середньої у межах від 0 до T необхідно помножити середню теплоємність на температуру і виконати диференціювання по T :

$$c_{icm} = \frac{d}{dT}(\bar{c} \cdot T), \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}). \quad (4.10)$$

За відсутності таких даних теплоємність твердих речовин обчислюють по емпіричній формулі, відповідно до якої теплоємність твердих речовин підкоряється правилу адитивності, тобто дорівнює алгебраїчній сумі теплоємностей компонентів, що входять у дану речовину (суміш):

$$c_{cym} = \sum n_i c_i, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad (4.11)$$

де n_i – частка i -ого компонента, що входить у дану речовину¹;
 c_i – теплоємність i -ого компонента суміші, Дж/(кг·К).

У технологічних розрахунках широко застосовують метод визначення кількості поглиненої або виділеної в тому чи іншому процесі теплоти за тепловмістом даної речовини. При нагріванні одиниці маси речовини (кг, моль тощо) від T_1 до T_2 за сталого тиску ($P = \text{const}$)

$$Q_p = \bar{c}_p(T_2 - T_1) = \bar{c}_p T_2 - \bar{c}_p T_1, \text{ Дж}/\text{кг}. \quad (4.12)$$

Такий результат можна одержати, використовуючи для визначення кількості теплоти перший закон термодинаміки для ізобарного процесу:

$$Q_p = (U_\kappa - U_n) + P(V_\kappa - V_n) = (U_\kappa + PV_\kappa) - (U_n + PV_n), \text{ Дж}/\text{кг}. \quad (4.13)$$

Позначимо $U_\kappa + PV_\kappa = H_\kappa$ і $U_n + PV_n = H_n$ тоді

$$Q_p = H_\kappa - H_n, \text{ Дж}/\text{кг}, \quad (4.14)$$

Функція $H = U + PV$, що залежить тільки від стану системи, називається **ентальпією** або **тепловмістом**. Таким чином, якщо відомо ентальпію

¹В залежності від того, яку теплоємність необхідно розрахувати (масову, об'ємну чи мольну), використовується відповідна частка.

речовини за даних умов, то відповідає необхідність обчислювати теплоємність для тих же умов.

Величину ентальпії беруть з довідкової літератури. У розрахунках звичайно оперують не абсолютними, а відносними величинами ентальпії. Для цього умовно обирають нульовий стан системи, від якого й обчислюють її ентальпію. У нульовому стані ентальпія умовно приймається рівною нулю. Величину H за температури t , °C беруть відповідно до теплових закономірностей даного тіла відносно цього нульового стану.

Для визначення ентальпії газових сумішей користуються правилом змішування (адитивності):

$$H_{\text{сум}} = 0,01 \sum_{i=1}^k n_i H_i = 0,01(n_1 H_1 + n_2 H_2 + \dots + n_k H_k), \text{ Дж/кг}, \quad (4.15)$$

де n_i – об'ємна частка i -ого газу в суміші, %;

H_i – ентальпія i -ого газу, Дж/кг.

4.2 Залежність теплового ефекту від температури

При складанні теплових балансів різних технологічних процесів доводиться робити різні термохімічні розрахунки, для яких потрібне знання теплових ефектів хімічних або фізичних перетворень. У практичних розрахунках часто використовують: а) теплоти хімічних реакцій (теплові ефекти); б) теплоти плавлення; в) теплоти випаровування; г) теплоти розчинення; д) теплоти згоряння. Величини цих параметрів є в довідковій літературі. У випадку їх відсутності ці параметри обчислюють, застосовуючи відповідні формули.

Розрізняють тепловий ефект реакції за сталого об'єму \bar{Q}_V (ізохорний тепловий ефект) і тиску \bar{Q}_P (ізобарний тепловий ефект). Залежність між ними наступна:

$$\bar{Q}_P = \bar{Q}_V - P\Delta V, \text{ Дж}. \quad (4.16)$$

Для реакцій, що протікають за сталих температурі й тиску, зміна об'єму залежить тільки від зміни числа молей у реагуючій системі $\Delta \nu$, тобто

$$P\Delta V = \Delta \nu RT, \text{ Дж.} \quad (4.17)$$

Тоді

$$\bar{Q}_p = \bar{Q}_V - \Delta \nu RT, \text{ Дж.} \quad (4.18)$$

У довідкових таблицях теплові ефекти наведені для стандартних умов. Однак таблиці не охоплюють усього різноманіття хімічних реакцій, тому часто теплові ефекти доводиться розраховувати, використовуючи закон Гесса й наслідки, що випливають з цього закону. Відповідно до закону Гесса, *тепловий ефект реакції не залежить від шляху, яким протікає реакція, а визначається лише початковим і кінцевим станом системи.* У термічних розрахунках широко використовують два наслідки закону Гесса:

1) *тепловий ефект хімічної реакції дорівнює різниці між сумою теплоти утворення продуктів $\bar{Q}_{o,np}$ і сумою теплоти утворення початкових речовин $\bar{Q}_{o,реаг}$ з урахуванням стехіометричних коефіцієнтів n_i речовин у реакції*

$$\bar{Q}_{реак} = \sum n_i \bar{Q}_{o,np} - \sum n_i \bar{Q}_{o,реаг}, \text{ Дж/моль,} \quad (4.19)$$

2) *тепловий ефект хімічної реакції дорівнює різниці між сумою теплоти згорання початкових речовин $\bar{Q}_{зг,реаг}$ і сумою теплоти згорання продуктів реакції $\bar{Q}_{зг,np}$ з урахуванням стехіометричних коефіцієнтів n_i речовин в реакції*

$$\bar{Q}_{реак} = \sum n_i \bar{Q}_{зг,реаг} - \sum n_i \bar{Q}_{зг,np}, \text{ Дж/моль.} \quad (4.20)$$

Закон Гесса і наслідки з цього закону дозволяють обчислювати теплові ефекти різних реакцій на основі порівняно невеликого числа довідкових даних про теплоту утворення неорганічних речовин і теплоту згорання органічних сполук за стандартних умов.

У довідковій літературі теплові ефекти наведено для стандартних умов. Технологічні розрахунки вимагають знання теплових ефектів реакцій для тих температур, за яких вони фактично протікають. Для розрахунку теплового ефекту реакції за інших температур використовують **закон Кірхгофа**: температурний коефіцієнт теплового ефекту $d\bar{Q}/dT$ дорівнює різниці сумарних (мольних) теплоємкостей початкових і кінцевих речовин, тобто

$$\frac{d\bar{Q}_V}{dT} = \sum c_{V_{реак}} - \sum c_{V_{пр}}, \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}), \quad (4.21)$$

$$\frac{d\bar{Q}_P}{dT} = \sum c_{P_{реак}} - \sum c_{P_{пр}}, \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}), \quad (4.22)$$

При складанні теплоємності речовин, що знаходяться у лівій частині рівняння хімічної реакції, беруть зі знаком “–”, а теплоємності речовин, що перебувають у правій його частині, – зі знаком “+”.

Для визначення теплового ефекту за певної температури диференціальні рівняння інтегрують із урахуванням температурної залежності теплоємностей речовин реагуючої системи. Інтегрування звичайно роблять у межах від 298 К до заданої температури T . Для реакцій за участю речовин, у яких залежність теплоємності від температури є поліномом виду (4.3), після інтегрування одержимо

$$\begin{aligned} \bar{Q}_T = \bar{Q}_{298}^o - \left[\Delta a_o (T - 298) + \frac{\Delta a_1}{2} (T^2 - 298^2) + \right. \\ \left. + \frac{\Delta a_2}{3} (T^3 - 298^3) + \dots + \frac{\Delta a_n}{n+1} (T^{n+1} - 298^{n+1}) \right], \text{ Дж/моль}, \end{aligned} \quad (4.23)$$

де $\Delta a_o, \Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_n$ – алгебраїчні різниці сталих $a_o, a_1, a_2 \dots$ у відповідних рівняннях теплоємностей для кожної речовини (див. пояснення до формули (4.3));

\bar{Q}_{298}^o – тепловий ефект реакції за температури 25 °С, Дж/моль.

Якщо температурна залежність теплоємностей виражається багаточленом

$$c_{icm} = a_o + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^{-2}, \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}), \quad (4.24)$$

то інтегрований вираз для обчислення теплового ефекту при заданій температурі матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_T = \bar{Q}_{298}^o - \left[\Delta a_o (T - 298) + \frac{\Delta a_1}{2} (T^2 - 298^2) + \right. \\ \left. + \frac{\Delta a_2}{3} (T^3 - 298^3) - \Delta a_3 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) \right], \text{ Дж/моль}. \end{aligned} \quad (4.25)$$

На практиці розрахунків виробничих процесів часто використовують метод визначення теплового ефекту за табличним значенням ентальпій реагуючих речовин та теплового ефекту реакції за стандартних умов¹. Різниця ентальпій між продуктами й початковими речовинами реакцій при заданій температурі T визначається з умови $\Delta H = -\Delta \bar{Q}$, тобто

$$\bar{Q}_{298} - \bar{Q}_T = \sum H_{np} - \sum H_{реаг}, \text{ Дж}, \quad (4.26)$$

звідки

$$\bar{Q}_T = \bar{Q}_{298} - \sum H_{np} - \sum H_{реаг}, \text{ Дж}. \quad (4.27)$$

4.3 Розрахунок витрати охолоджувачів і регулювання температури ванни

Визначення кількості охолоджувачів у конвертерній плавці можливо шляхом спільного вирішення рівнянь матеріального і теплового балансу. Такі розрахунки при заданій масі плавки є доволі складними. На практиці часто виникає необхідність визначення зміни витрати охолоджувачів відносно якоїсь відносно сталої величини внаслідок коливань окремих статей теплового балансу. Найчастіше це коливання температури чавуну, вмісту в ньому кремнію й вуглецю, кількості заліза, що окислилося впродовж продувки. Саме ці статті теплового балансу становлять 85...90 % загального приходу тепла.

Фізична теплота рідкого чавуну²:

$$Q_{чав}^{физ} = M_{чав} \Delta H_{чав}^{\Sigma}, \text{ кДж}, \quad (4.28)$$

де $\Delta H_{чав}^{\Sigma}$ – зміна тепловмісту рідкого чавуну, кДж/кг.

Повна зміна тепловмісту рідкого чавуну

$$\Delta H_{чав}^{\Sigma} = q_{чав} + \int_0^{t_{пл}} c_{чав}^{мс} dt + c_{чав}^{pid}(t_{чав} - t_{пл}), \text{ кДж/кг}, \quad (4.29)$$

де $q_{чав}$ – теплота плавлення чавуну (див. додаток Г), кДж/кг;

¹ Стан системи за температури 25 °С та тиску та 1 атм.

² Тут і далі розрахунки на 100 кг металошихти

$c_{чав}^{mв}$, $c_{чав}^{pid}$ – теплоємність відповідно твердого і рідкого чавуну (див. додаток Г), кДж/(кг·°С);

$t_{чав}$ – температура чавуну, °С;

$t_{пл}$ – температура плавлення чавуну (див. додаток Г), °С.

Підставивши довідкові величини в формулу (4.29), одержимо

$$\Delta H_{чав}^{\Sigma} = 52 + \int_0^{t_{пл}} (0,155 + 4 \cdot 10^{-5} t) dt + 0,22(t_{чав} - 1175), \text{ кДж/кг}, \quad (4.30)$$

або

$$\Delta H_{чав}^{\Sigma} = 14,8 + 0,22t_{чав}, \text{ кДж/кг}. \quad (4.31)$$

Підставивши (4.31) у (4.28) отримуємо

$$Q_{чав}^{fiz} = M_{чав}(14,8 + 0,22t_{чав}), \text{ кДж}. \quad (4.32)$$

Теплота реакцій окислення елементів металошихти киснем дуття:

$$Q_{чав}^{хим} = \sum \Delta[\% E] \Delta H_E, \text{ кДж}, \quad (4.33)$$

де $\Delta[\% E]$ – кількість кожного елемента, що окисляється, кг (%);

ΔH_E – тепловий ефект реакції окислення елемента (додаток Г), кДж/кг.

Хімічна теплота утворення оксидів заліза шлаку

$$Q_{\Sigma(FeO)}^{yme} = \left[\frac{1220}{100} (\% Fe_2O_3) + \frac{900}{100} (\% FeO) \right] M_{шл}, \text{ кДж}, \quad (4.34)$$

де 1220 і 900 – теплові ефекти дисоціації відповідних оксидів заліза, кДж/кг;

$M_{шл}$ – кількість шлаку, що утворився, кг (%).

Теплота на нагрівання металу з урахуванням кількості теплоти, необхідної для нагрівання твердого металу від 0 °С до температури плавлення, теплоти фазових перетворень, що протікають у твердому металі, теплоти плавлення металу, теплоти, необхідної для нагрівання рідкого металу від температури плавлення до заданої температури t_m визначається аналогічно до фізичного тепла рідкого чавуну (див. формули (4.28)-(4.32)) і може бути розрахована за формулою:

$$Q_m = M_m(13,1 + 0,2t_m), \text{ кДж.} \quad (4.35)$$

Охолоджуючий ефект твердих окисників, наприклад агломерату:

$$Q_{агл} = c_{агл}t_{агл}^{пл} + q_{агл} + \frac{1220}{100} \langle \% Fe_2O_3 \rangle_{агл} + \frac{900}{100} \langle \% FeO \rangle_{агл}, \text{ кДж/кг,} \quad (4.36)$$

де $c_{агл}$ – середня теплоємність агломерату 0,29 кДж/(кг·°С);

$t_{агл}^{пл}$ – температура плавлення агломерату 1000 °С;

$q_{агл}$ – теплота плавлення агломерату 450 кДж/кг.

При вмісті в агломераті 66 % Fe_2O_3 та 15 % FeO його охолоджуючий ефект складає

$$Q_{агл} = 0,29 \cdot 1000 + 50 + \frac{1220}{100} \cdot 66 + \frac{900}{100} \cdot 15 = 1280 \text{ кДж/кг.}$$

Теплота, що надходить до конвертерної ванни, у середньому на 85 % використовується на збільшення тепловмісту сталі й шлаку. Знаючи їхню кількість і теплоємності, з рівняння теплового балансу можливо легко визначити змінення температури ванни при змінення решти статей теплового балансу: окислюванні 1 % елементів і зміні температури чавуну:

$$\Delta t_{ван} = \frac{0,85 Q_{надх}}{M_m c_m + M_{шл} c_{шл}}, \text{ } ^\circ\text{C,} \quad (4.37)$$

де 0,85 – частка від надходження теплоти, що засвоюється ванною;

$Q_{надх}$ – надходження теплоти у ванну, кДж.

4.4 Задачі

1) За коефіцієнтами з таблиці Г.2 визначити теплоту, що поглинає діоксид вуглецю при нагріванні 100 м³ від 15 до 1000 °С за сталого об'єму.

2) Визначити теплоту, що вносить 0,5 кг міксерного шлаку з температурою 1280 °С, якщо

$$c = 0,175 + 6 \cdot 10^{-5} T, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К).}$$

3) Розрахувати істину питому й об'ємну теплоємності монооксиду вуглецю за температури 200 °С, використовуючи коефіцієнти з таблиці Г.2.

4) Визначити середні мольну, питому й об'ємну теплоємності кисню за сталого об'єму в інтервалі температур від 0 до 1000 °С, використовуючи коефіцієнти з таблиці Г.2.

5) Розрахувати середню питому теплоємність заліза в інтервалі температур від 100 до 200 °С, якщо істина теплоємність у межах температур від 0 до 600 °С виражається рівнянням

$$c_{icm} = 0,4613 + 2,12 \cdot 10^{-4} T - 6,87 \cdot 10^{-7} T^2, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

6) Визначити середню питому теплоємність оксиду кальцію в інтервалі температур від 1200 до 1300 °С, якщо

$$\bar{c} = 43,77 + 4,525 \cdot 10^{-3} T, \text{ кДж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

7) Визначити питому теплоємність залізної руди наступного хімічного складу, мас. %: Fe_2O_3 – 34,1; H_2O – 7,5; порожня порода – 58,4. Теплоємність, кДж/(кг·°С): Fe_2O_3 – 0,61; H_2O – 4,2; порожня порода (SiO_2) – 1,17. Відповідь надати у одиницях системі SI.

8) Міксерний шлак має приблизно наступний склад, мас. %: CaO – 45; SiO_2 – 40; Al_2O_3 – 15. Обчислити середню питому теплоємність міксерного шлаку в інтервалу температур від 0 до 500 °С за правилом адитивності й порівняти з величиною, обчисленою з урахуванням температурної залежності середньої питомої теплоємності міксерного шлаку в інтервалі від 0 до 1360 °С:

$$\bar{c} = 0,694 + 8,95 \cdot 10^{-4} T - 1,18 \cdot 10^{-6} T^2 + 5,72 \cdot 10^{-10} T^3, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{°С}).$$

Температурні залежності середніх теплоємностей компонентів міксерного шлаку виражаються рівняннями:

– для CaO в інтервалі 0...800 °С

$$\bar{c} = 0,749 + 3,78 \cdot 10^{-4} T - 1,533 \cdot 10^{-7} T^2, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{°С}),$$

– для SiO_2 в інтервалі 0...575 °С

$$\bar{c} = 0,794 + 9,4 \cdot 10^{-4} T - 7,15 \cdot 10^{-7} T^2, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{°С}),$$

– для Al_2O_3 в інтервалі 0...500 °С

$$\bar{c} = 0,786 + 5,97 \cdot 10^{-4} T - 2,98 \cdot 10^{-7} T^2, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{°С}),$$

9) Основний конвертерний шлак має склад, мас. %: CaO – 47; FeO – 14; MnO – 15; SiO_2 – 24. Обчислити середню питому теплоємність цього шлаку в

інтервалі температур від 0 до 1000 °С за правилом адитивності й порівняти з величиною, обчисленою з урахуванням температурної залежності середньої теплоємності в інтервалі температур від нуля до температури плавлення:

$$\bar{c} = 0,777 + 1,31 \cdot 10^{-4} T - 5,45 \cdot 10^{-8} T^2, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}),$$

Температурні залежності середніх теплоємностей компонентів основного конвертерного шлаку:

- для CaO в інтервалі 0...800 °С

$$\bar{c} = 0,749 + 3,78 \cdot 10^{-4} T - 1,535 \cdot 10^{-7} T^2, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}),$$

- для SiO_2 в інтервалі 0...1300 °С

$$\bar{c} = 0,768 + 3,23 \cdot 10^{-4} T, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}),$$

- для FeO в інтервалі 800...1500 °С

$$\bar{c} = 0,7872, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}),$$

- для MnO в інтервалі 800...1500 °С

$$\bar{c} = 0,7268, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}),$$

10) Визначити середню об'ємну теплоємність газу за температури 100 °С. Хімічний склад і об'ємні теплоємності компонентів газу за цієї ж температури наведені у таблиці нижче.

Компонент	CO	CO_2	O_2	N_2
Вміст, об. %	87,4	10,1	1,6	0,9

11) Використовуючи довідкові дані (див. додаток Г) розрахувати ентальпію 100 кг рідкого заліза за температури 1600 °С, якщо істинна питома теплоємність твердого заліза, кДж/(кг·°С), в інтервалі температури від 0 до 1539 °С розраховується за формулою

$$\bar{c}_{mв} = 0,223 + 5,67 \cdot 10^{-4} T + \frac{4490}{T^2}, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}). \quad (4.38)$$

12) Розрахувати ентальпію 1 т металургійного шлаку за температури 1500 °С, якщо його теплота плавлення 190 кДж/кг, питома теплоємність рідкого шлаку 1,2 кДж/(кг·°С), температура плавлення металургійного шлаку 1400 °С, істинна

питома теплоємність твердого металургійного шлаку в інтервалі від 0 °С до температури плавлення розраховується за формулою

$$\bar{c}_{ms} = 0,777 + 2,62 \cdot 10^{-4} t, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°С)}.$$

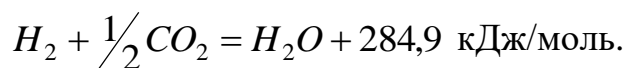
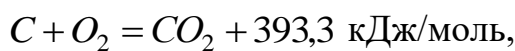
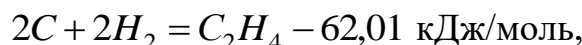
13) Використовуючи величини ентальпії газів з додатку Г.3, розрахувати кількість теплоти за нормального тиску, що необхідна для нагрівання від 100 до 700 °С 100 кмоль газової суміші складу, об. %: $CO - 20$, $CO_2 - 80$.

14) Використовуючи довідкові дані ентальпій газів, розрахувати кількість теплоти, що необхідна для нагрівання від 500 до 800 °С за нормального тиску 100 кмоль газової суміші складу, об. %: $H_2 - 52$; $CO_2 - 30$; $N_2 - 15$; $CO - 3$.

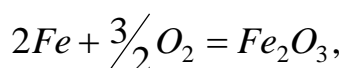
15) Визначити трьома методами теплоту згоряння етилену за реакцією



виходячи з наступних даних:



16) Тепловий ефект реакції



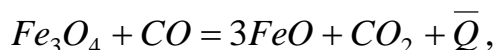
за температури 18 °С та сталого тиску дорівнює 823,3 кДж/моль. Визначити для цієї реакції тепловий ефект за сталого об'єму та тієї ж температури.

17) Визначити тепловий ефект реакції розкладання карбонату кальцію



якщо теплоти утворення оксиду кальцію, діоксиду вуглецю й вуглекислого кальцію з простих речовин дорівнюють відповідно 636,9; 394; 1208,6 кДж/моль.

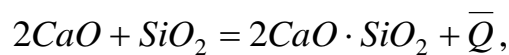
18) Визначити тепловий ефект реакції



якщо теплоти утворення FeO й Fe_2O_3 дорівнюють відповідно 263,7 та 1117,7 кДж/моль, теплота згоряння монооксиду вуглецю 283,4 кДж/моль. Розрахувати тепловий ефект цієї ж реакції, використовуючи величини зміни стандартної ентальпії реагентів, які для Fe_3O_4 , CO , FeO , CO_2 за температури 25 °С дорівнюють відповідно -1125,4; -110,5; -265,9; -393,8 кДж/моль.

19) Тепловий ефект реакції окислення вуглецю киснем газової фази із утворенням монооксиду вуглецю за температури 20 °С та сталого об'єму дорівнює 108,9 кДж/моль. Визначити тепловий ефект цієї реакції за сталого тиску.

20) Обчислити зміну стандартної ентальпії для реакції



якщо величини зміни стандартної ентальпії для оксиду кальцію кремнію та силікату кальцію складають відповідно -36,23; -49,99; 7,21 кДж/моль.

21) Тепловий ефект допалення монооксиду вуглецю до діоксиду за температури 25 °С дорівнює 283 кДж/моль. Визначити тепловий ефект за температури 2000 °С.

22) Приймаючи, що після заливки чавуну з температурою 1400 °С скрап з температурою 25 °С прогріється миттєво, визначити температуру розплаву, якщо співвідношення їх у шихті 80:20. Теплоємність і теплоту плавлення скрапу прийняти з довідкових даних.

23) Яким може бути співвідношення чавуну й скрапу в шихті, щоб за умови миттєвого розплавлення скрапу ванна мала температуру, що дорівнює температурі плавлення утвореного розплаву, якщо вміст вуглецю в чавуні і скрапі складає відповідно 4 і 0,2 %?

24) Яку додаткову кількість скрапу можна переробити за рахунок підвищення температури рідкого чавуну на 50 °С?

25) Яку додаткову кількість скрапу можна переробити за рахунок підвищення вмісту кремнію в чавуні на 0,2 %?

26) На скільки можна збільшити частку скрапу в металошихті, якщо частка вуглецю, що окисляється до діоксиду вуглецю, збільшується з 10 до 20 %?

- 27) На скільки можна збільшити частку скрапу в металошихті, якщо його підігріти з 20 до 800 °С?
- 28) На скільки відрізняються тепловміст 1 кг чавуну й сталі за температур відповідно 1300 й 1600 °С?
- 29) На скільки підвищиться температура сталі наприкінці продувки при підвищенні температури чавуну на 10 °С, враховуючи лише зміну їх тепловмісту?
- 30) На скільки підвищиться температура сталі наприкінці продувки при підвищенні температури чавуну на 10 °С, враховуючи ступінь використання теплоти на нагрівання сталі.
- 31) У скільки разів зменшиться охолоджуючий ефект 1 кг скрапу за його нагріву від 25 до 800 °С, якщо температура кінця продувки 1600 °С?
- 32) Яким буде співвідношення чавун:скрап у шихті при підвищенні температури чавуну до 1400 °С, якщо за температури чавуну 1300 °С воно становить 77:23? Для спрощення розрахунку зміною (зменшенням) хімічної теплоти чавуну можна знехтувати.
- 33) У прибутковій частині теплового балансу частка фізичної теплоти чавуну складає 50 %, хімічної теплоти окислення вуглецю, кремнію, марганцю і фосфору – 40 %. Вважаючи, що інші статті приходу теплоти залишаються незмінними, визначити співвідношення чавун:скрап за початковими даними попередньої задачі.
- 34) Визначити збільшення частки металобрухту в шихті внаслідок підвищення вмісту FeO у шлаку на 6 % і Fe_2O_3 на 2 %, якщо кількість шлаку 12 %.
- 35) Визначити тепловий еквівалент між підвищенням температури чавуну на 100 °С та необхідним підвищенням вмісту в чавуні: а) кремнію, б) вуглецю.
- 36) Визначити зміну температури ванни при окисленні 0,1 кг вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору, заліза, якщо кількість шлаку в агрегаті 12 %, вихід рідкої сталі 92 %, ступінь допалювання CO до CO_2 становить 10 %.
- 37) Якою має бути витрата агломерату, що містить 66 % Fe_2O_3 й 15 % FeO , для окислення 1 % вуглецю?

38) Визначити кількість заліза в шлаку, якщо кількість останнього складає 14 %, а вміст FeO й Fe_2O_3 у ньому становить відповідно 16 й 5 %.

39) Визначити теоретично можливу мінімальну концентрацію залишкового вуглецю наприкінці продувки у відкритому сталеплавильному агрегаті за температури 1600 °С.

40) Встановити співвідношення між швидкістю окислення вуглецю й питомою інтенсивністю продувки у період, коли кисень дуття витрачається тільки на окислювання вуглецю.

4.5 Питання для самоперевірки

1) Що таке теплоємність, її види, розмірність й величина для твердої та рідкої сталі?

2) Від чого залежить теплоємність? Який загальний вигляд формул для визначення істинної теплоємності залежно від цих параметрів?

3) Що таке ентальпія та яка її розмірність?

4) Що таке тепловміст, питомий тепловміст і зміна питомого тепловмісту речовини? Які їх розмірності?

5) Запишіть формулу для зміни тепловмісту скрапу за його нагрівання від 20 до 1600 °С. Поясніть параметри, що до неї входять, та надайте їх розмірність.

6) Що таке Q_P і Q_V ? Які їх розмірності та зв'язок між ними (формула)? Поясніть параметри, що до неї входять, та надайте їх розмірність.

7) Розкажіть закон Гесса. Наведіть формулу розрахунку теплового ефекту реакції. Поясніть параметри, що до неї входять, та надайте їх розмірність.

8) Розкажіть закон Кірхгофа. Наведіть формули для розрахунку теплового ефекту реакції за умов, що відмінні від стандартних. Поясніть параметри, що до них входять, та надайте їх розмірність.

9) Напишіть формули для розрахунку теплового ефекту реакції для умов, що відмінні від стандартних, через табличні значення ентальпій. Поясніть параметри, що до неї входять, та надайте їх розмірність.

10) Що таке теплота плавлення, яка її розмірність та її величина для сталі?

- 11) За якою формулою визначається ентальпія газової суміші? Поясніть параметри, що до неї входять та надайте їх розмірність.
- 12) Напишіть формулу для визначення фізичного тепла чавуну. Поясніть параметри, що до неї входять, та надайте їх розмірність.
- 13) Напишіть формулу для визначення хімічної теплоти чавуну. Поясніть параметри, що до неї входять, та надайте їх розмірність.
- 14) Як зміниться співвідношення “скрап:чавун” у шихті кисневого конвертера при зміні температури чавуну? Відповідь обґрунтуйте.
- 15) Як зміниться співвідношення “скрап:чавун” у шихті кисневого конвертера при зміні вмісту вуглецю в чавуні? Відповідь обґрунтуйте.
- 16) За рахунок яких процесів відбувається охолодження ванни при введенні в конвертер залізної руди або агломерату? Запишіть формулу для зміни їх тепловмісту при нагріванні від 20 до 1600 °С.
- 17) Як зміниться співвідношення “скрап:чавун” у шихті кисневого конвертера при зміні вмісту (FeO) у шлаку?

5 РОЗРАХУНОК МАТЕРІАЛЬНОГО І ТЕПЛОВОГО БАЛАНСІВ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ

Методика розрахунку матеріального і теплового балансів киснево-конвертерної плавки ґрунтується на закономірностях і параметрах процесів, які викладені в роботах [1-6] і отримані авторами цього посібника під час аналізу експериментальних даних. Вона відображує умови роботи сучасних кисневих конвертерів.

Під час оформлення розрахунку для заліку перед викладачем детальні пояснення методики виконання розрахунку і прийнятих позначень не потрібні.

Розрахунок виконується на 100 кг металошихти.

5.1 Завдання на розрахунок

Варіант завдання вказується керівником відповідно до порядкового номера студента у списку академічної групи або для студентів заочної форми навчання за останніми двома цифрами номера студентського квитка.

Необхідно розрахувати параметри киснево-конвертерної плавки для наступних початкових даних:

- хімічний склад чавуну;
- хімічний склад і витрата додаткового типу охолоджувача (кременистий лом, твердий чавун, скрап) або окатишів*;
- хімічний склад сталі, що виплавляється;
- температура чавуну, що заливається в конвертер – $t_{чав}$, °С;
- температура сталі в кінці продувки в конвертері – $t_{ст}$, °С;
- матеріал футеровки конвертера – периклазовуглецеві вогнетриви;
- ступінь допалювання CO до CO_2 в ванні конвертера (або частка CO_2 в суміші $CO + CO_2$ у складі конвертерних газів) – $\alpha = 0,10 - 0,15$.

Хімічний склад кременистого брухту, твердого чавуну і металеві складові скрапу наведено у таблиці 5.1, хімічний склад мінеральної (шлакової) складові скрапу і окатишів – у таблиці 5.4.

Індивідуальні початкові дані згідно з варіантом завдання (додаток Д) записують у вигляді таблиці 5.2. У останні два рядки таблиці заносять хімічний склад і витрату додаткового типу металобрухту (згідно з варіантом). Якщо у

* Оскільки окатиші містять лише мінеральну складову і не містять металевого заліза, то їх прийнято включати до неметалевих шихтових матеріалів.

якості додаткового охолоджувача у початкових даних наведено окатиші, то заповнюють лише останній рядок таблиці.

Таблиця 5.1

Хімічний склад додаткового металобрухту

Матеріал	C	Si	Mn	P	S
Твердий чавун	3,9	0,8	0,6	0,1	0,045
Кремнистий брухт	0,2	7	0,5	0,04	0,05
Скрап (металева складова)	0,2	0	0,5	0,04	0,05

Таблиця 5.2

Початкові данні для розрахунку

Матеріал	Вміст елементів, %					Температура, °C
	C	Si	Mn	P	S	
Рідкий чавун	$C_{чав}$	$Si_{чав}$	$Mn_{чав}$	$P_{чав}$	$S_{чав}$	$t_{чав}$
Готова сталь	$C_{ст}^H \div C_{ст}^6$	$Si_{ст}^H \div Si_{ст}^6$	$Mn_{ст}^H \div Mn_{ст}^6$	$P_{ст}^6$	$S_{ст}^6$	$t_{ст}$
Додатковий металобрухт						
Назва додаткового типу металобрухту або окатиші – _____ кг						

5.2 Розрахунок матеріального балансу періоду продувки

5.2.1 Попереднє визначення витрати металобрухту

Загальна кількість тепла, що виділяється при повному окисленні домішок чавуну (хімічне тепло чавуну):

$$\sum \Delta H_{чав}^{xim} = C_{чав} (10182 + 23550 \cdot \alpha) + 26942 Si_{чав} + 7040 Mn_{чав} + 19777 P_{чав}, \text{ кДж/100кг чавуну}, \quad (5.1)$$

де $C_{чав}$, $Si_{чав}$, $Mn_{чав}$, $P_{чав}$ – вміст домішок у чавуні (див. табл. 5.2), %; числа біля символів – теплові ефекти реакцій окислення відповідних домішок (див. додаток Г), кДж/кг.

Орієнтовна загальна маса металобрухту

$$M'_{\text{м.бр}} = \frac{\sum \Delta H_{\text{чав}}^{\text{хім}} + 88 \cdot t_{\text{чав}} - 105,6 \cdot t_{\text{ст}} - 11440 \cdot C_{\text{нов}} + 17600}{10^{-2} \cdot \sum \Delta H_{\text{чав}}^{\text{хім}} + 0,88 \cdot t_{\text{чав}}}, \text{ кг/100 кг}, \quad (5.2)$$

де $C_{\text{нов}}$ – вміст вуглецю на повалці конвертера, %:

$$C_{\text{нов}} \approx \frac{C_{\text{ст}}^{\text{н}} + C_{\text{ст}}^{\text{в}}}{2}, \%, \quad (5.3)$$

$C_{\text{ст}}^{\text{н}}$ і $C_{\text{ст}}^{\text{в}}$ – відповідно нижня і верхня межа вмісту вуглецю в готовій сталі (див. табл. 5.2), %.

5.2.2 Визначення кількості домішок, які вносить металева частина шихти
Орієнтовна маса рідкого чавуну, що заливається в конвертер, складає

$$M'_{\text{чав}} = 100 - M'_{\text{м.бр}}, \text{ кг}. \quad (5.4)$$

Однак на практиці чавун зважується разом з міксерним шлаком; кількість a останнього коливається в межах 0,5...1,8 % від маси чавуну. Тоді дійсна кількість залитого в конвертер чавуну дорівнює:

$$M_{\text{чав}} = M'_{\text{чав}} \cdot \left(1 - \frac{a}{100}\right), \text{ кг}. \quad (5.5)$$

Кількість звичайного металобрухту, що потрапляє в конвертер*

$$M'_{\text{зв.бр}} = M'_{\text{м.бр}} - \left(M_{\text{скр}} \cdot \frac{b_{\text{скр}}}{100} + M_{\text{кр.бр}} + M_{\text{тв.чав}} \right), \text{ кг}, \quad (5.6)$$

де $b_{\text{скр}}$ – забруднення скрапу шлаком, що звичайно складає 5...15 %.

Аналогічно реальну кількість звичайного металобрухту, що потрапляє до конвертера, слід визначати з урахуванням його забруднень $b_{\text{зв.бр}}$ (зазвичай 0,5...2,0 %) та окалини c (1,0...1,5 % від маси скрапу):

$$M_{\text{зв.бр}} = M'_{\text{зв.бр}} \cdot \left(1 - \frac{b_{\text{зв.бр}} + c}{100}\right), \text{ кг}. \quad (5.7)$$

* тут і далі охолоджувачі, що не використовуються у розрахунку, слід виключити з формул.

Розраховують кількість домішок, які вносять рідкий чавун і всі види металобрухту, та їх загальний вміст у металошихті. Хімічний склад звичайного металобрухту, оскільки він отриманий на даному заводі, приймається таким самим, як і хімічний склад готової сталі. Результати розрахунку за формулами (5.8) і (5.9) заносять в табл. 5.3. Кількість домішок, внесених кременистим брухтом і твердим чавуном, може бути розрахована за формулою (5.8). Фразу “Додатковий металобрухт” слід замінити назвою власного металобрухту.

$$E_{\text{чав}} = M_{\text{чав}} \cdot \frac{[\%E]_{\text{чав}}}{100}, \text{ кг}, \quad (5.8)$$

$$E_{\text{зв.бр}} = M_{\text{зв.бр}} \cdot \frac{[\%E]_{\text{зв.бр}}^H + [\%E]_{\text{зв.бр}}^6}{200}, \text{ кг}, \quad (5.9)$$

$$E_{\text{скр}} = M_{\text{скр}} \cdot \left(1 - \frac{b_{\text{скр}}}{100}\right) \cdot \frac{[\%E]_{\text{скр}}}{100}, \text{ кг}, \quad (5.10)$$

де $E_{\text{чав}}$ і $E_{\text{м.бр}}$ – вміст домішки E у чавуні і металобрухті відповідно (див. табл. 5.2), %.

Таблица 5.3

Кількість домішок, внесених металевою шихтою

Матеріал	Вміст елементів в металошихті, %				
	C	Si	Mn	P	S
Чавун	$C_{\text{чав}}$	$Si_{\text{чав}}$	$Mn_{\text{чав}}$	$P_{\text{чав}}$	$S_{\text{чав}}$
Звичайний металобрухт	$C_{\text{м.бр}}$	$Si_{\text{м.бр}}$	$Mn_{\text{м.бр}}$	$P_{\text{м.бр}}$	$S_{\text{м.бр}}$
Додатковий металобрухт	$C_{\text{скр}}/C_{\text{кр.бр}}/$ $C_{\text{тв.чав}}$	$Si_{\text{скр}}/Si_{\text{кр.бр}}/$ $Si_{\text{тв.чав}}$	$Mn_{\text{скр}}/Mn_{\text{кр.бр}}$ $/Mn_{\text{тв.чав}}$	$P_{\text{скр}}/P_{\text{кр.бр}}/$ $P_{\text{тв.чав}}$	$S_{\text{скр}}/S_{\text{кр.бр}}/$ $S_{\text{тв.чав}}$
Разом	$C_{\text{мет.ш}}$	$Si_{\text{мет.ш}}$	$Mn_{\text{мет.ш}}$	$P_{\text{мет.ш}}$	$S_{\text{мет.ш}}$

5.2.3 Визначення витрати шлакоутворюючих

Витрата плавикового шпату $M_{\text{п.ш}}$ складає 0,15...0,50 % від маси металошихти (чим нижчий вміст сірки в готовій сталі, тим вона вища).

Знос футеровки збільшується, при виплавці сталі з нижчим вмістом вуглецю на повалці і високою витратою чавуну на плавку:

$$M_{фут} = \frac{M_{чав}}{100} \cdot (0,6 - 0,71 \cdot C_{нов}), \text{ кг.} \quad (5.11)$$

Потрібна кількість вапна визначається за формулою

$$M_{ван} = \frac{\sum SiO_2 \cdot B'_к - \sum CaO}{F_{ван}}, \text{ кг,} \quad (5.12)$$

де $\sum SiO_2$ і $\sum CaO$ – кількість кремнезему та оксиду кальцію, що вносяться усіма шихтовими матеріалами (за винятком вапна) і футеровкою, кг;

$B' = \frac{(CaO)}{(SiO_2)}$ – основність кінцевого шлаку, приймається в межах 2,5...3,5;

$F_{ван}$ – флюсуюча здатність вапна визначається за формулою

$$F_{ван} = 0,9 \cdot \left(\frac{CaO_{ван}}{100} - \frac{SiO_{2ван}}{100} \cdot B'_к \right), \text{ кг.} \quad (5.13)$$

З цього місця розрахунку слід брати до уваги склад неметалевих матеріалів, які використовують при виплавці сталі (табл. 5.4). Можна прийняти будь-яку величину вмісту компонента в шихтовому матеріалі у межах вказаного в цій таблиці діапазону, при цьому сума всіх компонентів кожного шихтового матеріалу повинна бути не більше 100 %.

Величини $\sum SiO_2$ і $\sum CaO$ складають (див. табл. 5.4):

$$\begin{aligned} \sum SiO_2 = & Si_{мет.ш} \cdot \frac{60}{28} + 0,01 \cdot (M_{н.ш} \cdot SiO_{2н.ш} + M_{фут} \cdot SiO_{2фут} + \\ & + M_{чав} \cdot \frac{a}{100} \cdot SiO_{2м.ш} + M_{зв.бр} \cdot \frac{b_{зв.бр}}{100} \cdot SiO_{2забр} + M_{окат} \cdot SiO_{2окат} + \\ & + M_{скр} \cdot \frac{b_{скр}}{100} \cdot SiO_{2скр}), \text{ кг,} \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} \sum CaO = & 0,01 \cdot (M_{н.ш} \cdot CaO_{н.ш} + M_{фут} \cdot CaO_{фут} + \\ & + M_{чав} \cdot \frac{a}{100} \cdot CaO_{м.ш} + M_{окат} \cdot CaO_{окат} + M_{скр} \cdot \frac{b_{скр}}{100} \cdot CaO_{скр}), \text{ кг.} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Таблиця 5.4

Склад неметалевих шихтових матеріалів *, %

Матеріал	SiO_2	Al_2O_3	MnO	CaO	MgO	Fe_2O_3	FeO	CO_2	S
Вапно	$\frac{SiO_{2\text{ван}}}{2...3}$	$\frac{Al_2O_{3\text{ван}}}{1...2}$	-	$\frac{CaO_{\text{ван}}}{85...92}$	$\frac{MgO_{\text{ван}}}{1}$	-	-	$\frac{CO_{2\text{ван}}}{5...10}$	$\frac{S_{\text{ван}}}{0,05...0,10}$
Плавиковий шпат	$\frac{SiO_{2\text{п.ш.}}}{3...10}$	-	-	$\frac{CaO_{\text{п.ш.}}}{5...10}$	-	-	-	-	-
Футерівка (15 %С)	$\frac{SiO_{2\text{фут}}}{1}$	-	-	$\frac{CaO_{\text{фут}}}{1,0...1,5}$	$\frac{MgO_{\text{фут}}}{76}$	$\frac{Fe_2O_{3\text{фут}}}{1}$	-	-	-
Міксерний шлак	$\frac{SiO_{2\text{м.ш.}}}{45}$	$\frac{Al_2O_{3\text{м.ш.}}}{6}$	$\frac{MnO_{\text{м.ш.}}}{5}$	$\frac{CaO_{\text{м.ш.}}}{35}$	$\frac{MgO_{\text{м.ш.}}}{3}$	-	$\frac{FeO_{\text{м.ш.}}}{2}$	-	$\frac{S_{\text{м.ш.}}}{1,0...1,5}$
Забруднення скрапу	$\frac{SiO_{2\text{скрап}}}{17,5}$	$\frac{Al_2O_{3\text{скрап}}}{2,8}$	$\frac{MnO_{\text{скрап}}}{7,5}$	$\frac{CaO_{\text{скрап}}}{53,8}$	$\frac{MgO_{\text{скрап}}}{1,7}$	$\frac{Fe_2O_{3\text{скрап}}}{5,1}$	$\frac{FeO_{\text{скрап}}}{11,3}$	-	$\frac{S_{\text{забр.скрап}}}{0,3}$
Забруднення звичайного брухту	$\frac{SiO_{2\text{забр}}}{70}$	$\frac{Al_2O_{3\text{забр}}}{30}$	-	-	-	-	-	-	-
Окалина звичаного брухту	-	-	-	-	-	$\frac{Fe_2O_{3\text{ок}}}{70}$	$\frac{FeO_{\text{ок}}}{30}$	-	-
Окатиші	$\frac{SiO_{2\text{окат}}}{9,49}$	$\frac{Al_2O_{3\text{окат}}}{1,23}$	-	$\frac{CaO_{\text{окат}}}{0,62}$	$\frac{MgO_{\text{окат}}}{0,75}$	$\frac{Fe_2O_{3\text{окат}}}{86,50}$	$\frac{FeO_{\text{окат}}}{1,35}$	-	$\frac{S_{\text{окат}}}{0,06}$

* У чисельнику наведено умовне позначення вмісту компонента, що використовується у формулах, у знаменнику – діапазон варіювання його величини.

5.2.4 Визначення вмісту оксидів заліза в шлаку

$$(FeO) = K_1 \cdot \frac{5,15}{\sqrt[4]{C_{нов}}} \cdot \sqrt[3]{B'_к}, \%, \quad (5.16)$$

$$(Fe_2O_3) = K_1 \cdot \frac{2,34}{\sqrt[4]{C_{нов}}} \cdot \sqrt[3]{B'_к}, \%. \quad (5.17)$$

При кисневому дутті зверху $K_1 = 1,0$, а при комбінованій продувці кисень зверху / нейтральний газ знизу $K_1 = 1,0$.

5.2.5 Визначення орієнтовного виходу придатного металу наприкінці продувки

$$M'_{ст} = M_{чав} + M_{зв.бр} + M_{кр.бр} + M_{тв.чав} + M_{скр} \cdot \left(1 - \frac{b_{скр}}{100}\right) - \left(C_{мет.ш} - C_{нов} + Si_{мет.ш} + 0,8Mn_{мет.ш} + 0,9P_{мет.ш} + \Delta Fe_{втр}\right), \%, \quad (5.18)$$

де $\Delta Fe_{втр}$ – втрати заліза з димовими газами, викидами, зі шлаком у формі оксидів і корольків металу, приймаються в межах 2,3...4,5 %.

5.2.6 Визначення орієнтовної кількості шлаку

$$M'_{шл} = \frac{100}{100 - [(FeO) + (Fe_2O_3)]} \cdot \left\{ Si_{мет.ш} \cdot \frac{60}{28} + 0,8 \cdot Mn_{мет.ш} \cdot \frac{71}{55} + 0,9P_{мет.ш} \cdot \frac{142}{62} + 0,01 \cdot [M_{ван} \cdot (100 - CO_{2ван}) + M_{н.ш} \cdot (100 - CO_{2н.ш})] + M_{фут} \cdot (100 - Fe_2O_{3фут}) + \frac{a}{100} \cdot M_{чав} \cdot (100 - FeO_{чав}) + b_{зв.бр} \cdot M_{зв.бр} + M_{окат} \cdot (100 - Fe_2O_{3окат} - FeO_{окат}) + M_{скр} \cdot \frac{b_{скр}}{100} \cdot (100 - Fe_2O_{3скр} - FeO_{скр}) \right\}, \%. \quad (5.19)$$

5.2.7 Уточнення складу металу на повалці конвертера після завершення продувки (перед розкисленням)

Вміст вуглецю було визначено на початку розрахунку у формулі (5.3).

Вміст кремнію практично дорівнює нулю*: $Si_{нов} \approx 0$.

Вміст марганцю визначається за рівнянням (5.21), одержаним з огляду на рівноважний розподіл марганцю між металом і шлаком відповідно до балансу марганцю перед продувкою та після неї.

Попередньо слід обчислити константу рівноваги марганцю K_{Mn}

$$\lg K_{Mn} = -\frac{6234}{t_{cm} + 273} + 3,026, \quad (5.20)$$

$$Mn_{нов} = \frac{Mn_{мет.ш} + \frac{a}{100} \cdot M_{чав} \cdot \frac{MnO_{м.ш}}{100} \cdot \frac{55}{71}}{0,01 \cdot \left[M'_{cm} + M'_{шл} \cdot \frac{(FeO) + (Fe_2O_3)}{K_{Mn}} \right]}, \%, \quad (5.21)$$

Вміст фосфору також визначається з балансового рівняння розподілу фосфору між шлаком і металом

$$P_{нов} = \frac{100 \cdot P_{мет.ш}}{M'_{cm} + L_P \cdot M'_{шл} \cdot \frac{62}{142}}, \%. \quad (5.22)$$

Попередньо з таблиці 5.5 за вмістом (FeO) у шлаку і його основністю слід визначити коефіцієнт розподілу фосфору між шлаком і металом. Якщо величина концентрації (FeO) у шлаку знаходиться між наведеними у таблиці числами (наприклад 10,5 між 10,0 і 12,0), то величину коефіцієнту розподілу фосфору визначають методом інтерполяції.

Таблиця 5.5

Коефіцієнт розподілення фосфору між шлаком і металом

Основність кінцевого шлаку	(FeO) , %					
	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	$\geq 16,0$
2,6	46	53	62	71	80	89
2,8	50	57	65	75	83	92
3,0	57	64	73	82	91	100
3,2	64	71	80	89	98	107
3,4	71	78	87	96	105	114
3,6	77	85	94	103	112	120

* Загальноживаним для позначення низького вмісту кремнію у металі є термін “сліди”.

Вміст сірки знаходять аналогічно з балансового рівняння розподілу сірки між шлаком і металом

$$S_{нов} = \frac{100}{M'_{скр} + L_S \cdot M'_{шл}} \cdot \left(S_{мет.ш} + M_{ван} \cdot \frac{S_{ван}}{100} + M_{чав} \cdot \frac{a}{100} \cdot \frac{S_{м.ш}}{100} + M_{скр} \cdot \frac{b_{скр}}{100} \cdot \frac{S_{забр.скр}}{100} + M_{окат} \cdot \frac{S_{окат}}{100} \right), \% \quad (5.23)$$

де L_S – коефіцієнт розподілення сірки між шлаком і металом, може бути визначений з таблиці 5.6:

Таблиця 5.6

Коефіцієнт розподілення сірки між шлаком і металом

B'_k	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6
L_S	5,4	6,5	7,4	8,0	8,3	8,5	8,7

Склад металу перед розкисленням записують у формі таблиці 5.7.

Таблиця 5.7

Хімічний склад сталі перед розкисленням

$C_{нов}$	$Si_{нов}$	$Mn_{нов}$	$P_{нов}$	$S_{нов}$

5.2.8 Уточнення кількості і складу кінцевого шлаку

Визначення кількості шлакоутворюючих оксидів (крім оксидів заліза) з усіх джерел

$$M_{SiO_2} = Si_{мет.ш} \cdot \frac{60}{28} + 0,01(M_{ван} \cdot SiO_{2ван} + M_{н.ш} \cdot SiO_{2н.ш} + M_{фут} \cdot SiO_{2фут} + M_{чав} \cdot \frac{a}{100} \cdot SiO_{2м.ш} + M_{зв.бр} \cdot \frac{b_{зв.бр}}{100} \cdot SiO_{2забр} + M_{окат} \cdot SiO_{2окат} + M_{скр} \cdot \frac{b_{скр}}{100} \cdot SiO_{2скр}) \text{, кг,} \quad (5.24)$$

$$M_{CaO} = 0,01(M_{ван} \cdot CaO_{ван} + M_{н.ш} \cdot CaO_{н.ш} + M_{фут} \cdot CaO_{фут} + M_{чав} \cdot \frac{a}{100} \cdot CaO_{м.ш} + M_{окат} \cdot CaO_{окат} + M_{скр} \cdot \frac{b_{скр}}{100} \cdot CaO_{скр}) \text{, кг,} \quad (5.25)$$

$$M_{Al_2O_3} = 0,01(M_{ван} \cdot Al_2O_{3ван} + M_{н.ш} \cdot Al_2O_{3н.ш} + M_{фут} \cdot Al_2O_{3фут} + \\ + M_{чав} \cdot \frac{a}{100} \cdot Al_2O_{3м.ш} + M_{зб.бр} \cdot \frac{b_{зб.бр}}{100} \cdot Al_2O_{3збр} + M_{окат} \cdot Al_2O_{3окат} + \\ + M_{скр} \cdot \frac{b_{скр}}{100} \cdot Al_2O_{3скр}), \text{ кг}, \quad (5.26)$$

$$M_{MnO} = \left(Mn_{мет.ш} - Mn_{нов} \cdot \frac{M'_{cm}}{100} \right) \cdot \frac{71}{55} + 0,01 \left(M_{чав} \cdot \frac{a}{100} \cdot MnO_{м.ш} + \\ + M_{скр} \cdot \frac{b_{скр}}{100} \cdot MnO_{скр} \right), \text{ кг}, \quad (5.27)$$

$$M_{MgO} = 0,01 \left(M_{ван} \cdot MgO_{ван} + M_{фут} \cdot MgO_{фут} + M_{чав} \cdot \frac{a}{100} \cdot MgO_{м.ш} + \\ + M_{окат} \cdot MgO_{окат} + M_{скр} \cdot \frac{b_{скр}}{100} \cdot MgO_{скр} \right), \text{ кг}, \quad (5.28)$$

$$M_{P_2O_5} = \left(P_{мет.ш} - P_{нов} \cdot \frac{M'_{cm}}{100} \right) \cdot \frac{142}{62}, \text{ кг}, \quad (5.29)$$

$$M_S = S_{мет.ш} - S_{нов} \cdot \frac{M'_{cm}}{100} + 0,01 \left(M_{ван} \cdot S_{ван} + M_{чав} \cdot \frac{a}{100} \cdot S_{м.ш} + \\ + M_{окат} \cdot S_{окат} + M_{скр} \cdot \frac{b_{скр}}{100} \cdot S_{збр.скр} \right), \text{ кг}. \quad (5.30)$$

Кількість і склад кінцевого шлаку

$$M_{шл} = \frac{M_{SiO_2} + M_{Al_2O_3} + M_{MnO} + M_{CaO} + M_{MgO} + M_{P_2O_5} + M_S}{1 - 0,01[(FeO) + (Fe_2O_3)]}, \text{ кг}. \quad (5.31)$$

Перераховуємо масову частку всіх компонентів шлаку (окрім оксидів заліза) із урахуванням розрахованого у п. 5.2.4 вмісту оксидів заліза. Результати розрахунку заносять в таблицю 5.8.

$$(E) = \frac{M_E}{0,01M_{шл}}, \text{ кг}, \quad (5.32)$$

де M_E – маса компоненту шлаку, що розрахована за формулами (5.24)-(5.30), кг.

Хімічний склад кінцевого шлаку, %

(SiO ₂)	(Al ₂ O ₃)	(MnO)	(CaO)	(MgO)	(P ₂ O ₅)	(S)	(FeO)	(Fe ₂ O ₃)

Слід порівняти основність кінцевого шлаку $B_{\kappa} = \frac{(CaO)}{(SiO_2)}$, розраховану за даними табл. 5.8, з прийнятою в п. 5.2.3 (дозволяється відхилення $\pm 0,26$).

5.2.9 Уточнений вихід металу після продувки

$$\begin{aligned}
 M_{ст} = & 100 - \{ C_{мет.ш} + Si_{мет.ш} + Mn_{мет.ш} + P_{мет.ш} + S_{мет.ш} - \\
 & - 0,01 \cdot M'_{ст} \cdot (C_{нов} + Mn_{нов} + P_{нов} + S_{нов}) + M_{чав} \cdot \frac{a}{100} + \\
 & + M_{зв.бр} \cdot \frac{b_{зв.бр} + c}{100} + M_{шл} \cdot 0,01 \left[(FeO) \cdot \frac{56}{72} + (Fe_2O_3) \cdot \frac{112}{160} \right] + \Delta Fe_{втр} \} + \\
 & + 0,01 \cdot \frac{56}{72} \cdot \left(M_{чав} \cdot \frac{a}{100} \cdot FeO_{м.ш} + M_{зв.бр} \cdot \frac{c}{100} \cdot FeO_{ок} + \right. \\
 & \left. + M_{окат} \cdot FeO_{окат} + M_{скр} \cdot \frac{b_{скр}}{100} \cdot FeO_{скр} \right) + 0,01 \cdot \frac{112}{160} \cdot (M_{фут} \cdot Fe_2O_{3фут} + \\
 & + M_{зв.бр} \cdot \frac{c}{100} \cdot Fe_2O_{3ок} + M_{окат} \cdot Fe_2O_{3окат} + M_{скр} \cdot \frac{b_{скр}}{100} \cdot Fe_2O_{3скр}), \text{ кг.}
 \end{aligned} \tag{5.33}$$

5.2.10 Визначення кількості дуття

Потрібна для проведення плавки кількість кисню

$$\begin{aligned}
 M_{O_2внутр} = & (C_{мет.ш} - 0,01 \cdot M_{ст} \cdot C_{нов}) \cdot \left[(1 - \alpha) \cdot \frac{16}{12} + \alpha \cdot \frac{32}{12} \right] + \\
 & + Si_{мет.ш} \cdot \frac{32}{28} + (Mn_{мет.ш} - 0,01 \cdot M_{ст} \cdot Mn_{нов}) \cdot \frac{16}{55} + \\
 & + (P_{мет.ш} - 0,01 \cdot M_{ст} \cdot P_{нов}) \cdot \frac{80}{62} + \\
 & + 0,01 \cdot M_{шл} \cdot \left[(Fe_2O_3) \cdot \frac{40}{160} + (FeO) \cdot \frac{48}{72} \right] + \chi \cdot \frac{48}{112}, \text{ кг,}
 \end{aligned} \tag{5.34}$$

де χ – втрати заліза з випаровуванням (у формі парів Fe_2O_3), складають 0,3...1,6 % від маси металошихти, кг.

Кількість кисню, внесеного шихтовими матеріалами, визначається

$$\begin{aligned}
M_{O_{2надох}} = & 0,01 \cdot \left[M_{фут} \cdot Fe_2O_{3фут} \cdot \frac{48}{160} + 0,01 \cdot M_{чав} \cdot \frac{a}{100} \cdot FeO_{м.ш} \cdot \frac{16}{72} + \right. \\
& + M_{зв.бр} \cdot \frac{c}{100} \cdot \left(Fe_2O_{3ок} \cdot \frac{48}{160} + FeO_{ок} \cdot \frac{16}{72} \right) + \\
& M_{скр} \cdot \frac{b_{скр}}{100} \cdot \left(Fe_2O_{3скр} \cdot \frac{48}{160} + FeO_{скр} \cdot \frac{16}{72} \right) + M_{окат} \cdot \left(Fe_2O_{3окат} \cdot \frac{48}{160} + \right. \\
& \left. FeO_{окат} \cdot \frac{16}{72} \right) + M_{ван} \cdot CO_{2ван} \cdot (1 - \alpha) \cdot \frac{16}{44} \left. \right], \text{ кг.}
\end{aligned} \tag{5.35}$$

Необхідно ввести в конвертер кисню з дуттям масою

$$M_{дут} = \left(M_{O_{2внутр}} - M_{O_{2надох}} \right) \cdot \frac{100 \cdot 100}{k_{O_2} \cdot n_{O_2}}, \text{ кг,} \tag{5.36}$$

де k_{O_2} – ступінь засвоєння ванною кисню дуття, складає 93...98 %;

n_{O_2} – чистота кисню дуття, на практиці становить 97...99,7 %.

Об'єм дуття

$$V_{дут} = M_{дут} \cdot \frac{22,4}{32}, \text{ м}^3, \tag{5.37}$$

5.2.11 Розрахунок кількості і складу конвертерних газів

Утворюється діоксиду вуглецю

$$M_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot (C_{мет.ш} - 0,01 \cdot M_{ст} \cdot C_{нов}) \cdot \alpha + 0,01 \cdot M_{ван} \cdot CO_{2ван} \cdot \alpha, \text{ кг,} \tag{5.38}$$

або

$$V_{CO_2} = M_{CO_2} \cdot \frac{22,4}{44}, \text{ м}^3, \tag{5.39}$$

Утворюється монооксиду вуглецю

$$\begin{aligned}
M_{CO} = & \frac{28}{12} \cdot (C_{мет.ш} - 0,01 \cdot M_{ст} \cdot C_{нов}) \cdot (1 - \alpha) + \\
& + 0,01 \cdot M_{ван} \cdot CO_{2ван} \cdot (1 - \alpha), \text{ кг,}
\end{aligned} \tag{5.40}$$

або

$$V_{CO} = M_{CO} \cdot \frac{22,4}{28}, \text{ м}^3. \quad (5.41)$$

Виділяється азоту (з дуття)

$$M_{N_2} = M_{\text{дуть}} \cdot \frac{100 - n_{O_2}}{100}, \text{ кг}, \quad (5.42)$$

або

$$V_{N_2} = M_{N_2} \cdot \frac{22,4}{28}, \text{ м}^3. \quad (5.43)$$

Втрачається кисню з конвертерними газами

$$M_{O_2} = (M_{O_2\text{внутр}} - M_{O_2\text{надх}}) \cdot \frac{100 - k_{O_2}}{100}, \text{ кг}, \quad (5.44)$$

або

$$V_{O_2} = M_{O_2} \cdot \frac{22,4}{32}, \text{ м}^3. \quad (5.45)$$

Результати розрахунку заносять у таблицю 5.9.

Таблиця 5.9

Кількість і склад конвертерних газів

Складові газу	кг	м ³	об'ємний %
<i>CO</i>	<i>M_{CO}</i>	<i>V_{CO}</i>	$100 \cdot V_{CO} / V_2$
<i>CO₂</i>	<i>M_{CO2}</i>	<i>V_{CO2}</i>	$100 \cdot V_{CO2} / V_2$
<i>N₂</i>	<i>M_{N2}</i>	<i>V_{N2}</i>	$100 \cdot V_{N2} / V_2$
<i>O₂</i>	<i>M_{O2}</i>	<i>V_{O2}</i>	$100 \cdot V_{O2} / V_2$
Загалом	<i>M_г</i>	<i>V_г</i>	100

5.2.12 Матеріальний баланс плавки (до розкислення)

Наводиться у вигляді таблиці Таблиця 5.10. Для прикладу в ній наведено орієнтовний матеріальний баланс звичайної киснево-конвертерної плавки.

Таблиця 5.10

Приклад матеріальний баланс киснево-конвертерної плавки (до розкислення)

НА ДІЙШЛО				ОТРИМАНО			
№	Матеріал	Позначення	кг	№	Матеріал	Позначення	кг
1.	Чавун рідкий	$M_{чав}$	71,757	1.	Рідкий метал	$M_{ст}$	87,489
2.	Звичайний брукт	$M_{зв.бр}$	15,299	2.	Шлак	$M_{шл}$	15,952
3.	Кремнистий брукт	$M_{кр.бр}$	1,000	3.	Гази	M_2	9,035
4.	Твердий чавун	$M_{тв.чав}$	2,300	4.	Втрати Fe під час продувки	$\Delta Fe_{втр}$	4,5
5.	Скрап	$\left(1 - \frac{b_{скр}}{100}\right) M_{скр}$	8,096				
6.	Міксерний шлак	$\frac{a}{100} M_{м.ш}$	1,292				
7.	Забруднення звичайного брукту	$\frac{b_{зв.бр}}{100} M_{зв.бр}$	0,076				
8.	Окалина звичайного брукту	$\frac{c}{100} M_{зв.бр}$	0,153				
9.	Забруднення скрапу	$\frac{b_{скр}}{100} M_{скр}$	1,104				
10.	Окатиші	$M_{окат}$	0,100				
11.	Плавииковий шпат	$M_{п.ш}$	0,150				
12.	Вапно	$M_{ван}$	8,669				
13.	Футерівка	$M_{фут}$	0,134				
14.	Дуття	$M_{дут}$	6,769				
Всього:			116,898	Всього:			116,976

Нев'язка у даному прикладі становить $\frac{116,898 - 116,976}{116,976} \cdot 100 = -0,078 \%$.

У розрахунках величина нев'язки не має перевищувати $\pm 0,20 \%$. В іншому випадку розрахунок є помилковим і його необхідно повторити.

5.3 Розрахунок розкислення сталі

У цьому варіанті розрахунку прийнято, що розкислення сталі здійснюють з присадкою усіх феросплавів в ківш під час випуску сталі з конвертера. У випадку розкислення сталі на УКП або УКДС методика розрахунку необхідної кількості феросплавів буде відрізнятися лише угаром феросплавів. Для

розкислення сталі рядових марок зазвичай використовують феросиліцій, феромарганець і силікомарганець різних марок. Хімічний склад феросплавів, наведено в табл. 5.11-5.13.

Таблиця 5.11

Хімічний склад феромарганцю

Група	Марка	Вміст марганцю, %	Вміст компоненту, % (не більш)			
			<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
Високовуглецевий	ФМн78	78...82	7,0	2,0	0,35	0,03
	ФМн75	75	7,0	1,0	0,45	0,03
Середньовуглецевий	ФМн2,0	75	2,0	2,0	0,35	0,03
	ФМн1,0	75	1,0	2,0	0,35	0,03
Низьковуглецевий	ФМн0,5	65	0,5	2,0	0,30	0,03

Таблиця 5.12

Хімічний склад феросиліцію

Марка	Вміст кремнію (щонайменш), %	Вміст компоненту (не більше), %					
		<i>C</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Al</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>
ФС 90	89	-	0,02	0,03	2,5	0,2	0,2
ФС 75	74...80	-	0,02	0,05	-	0,4	0,4
ФС 45	41...47	-	0,02	0,05	2,0	0,6	0,5
ФС 20	19...23	1,0	0,02	0,10	1,0	1,0	-

Таблиця 5.13

Хімічний склад силікомарганцю

Марка	Вміст, %		Вміст компоненту (не більше), %		
	кремнію	марганцю (щонайменш)	вуглець	фосфор	сірка
СМн26	не менше 26	60	0,2	0,005	0,03
СМн20	20...25	60	1,7	0,100	0,03
СМн17	17...20	60	1,7	0,100	0,03
СМн17	14...17	60	2,5	0,250	0,03

Для проведення розкислення необхідно задатися умовами його проведення. Від правильного вибору умов розкислення значною мірою залежить відповідність результатів розрахунку практичним даним. Перш за все

слід визначити тип сталі за характером поведінки металу у виливниці: *кипляча*, *напівспокійна* і *спокійна*. Виходячи з цього обирають феросплави для її розкислення.

Розкислювачі присаджуються в ківш в кількості, що забезпечує отримання (з урахуванням угару) середнього вмісту елементів у готовій сталі.

Їх кількість M_{FeMn} , M_{FeSi} і M_{SiMn} розраховується за рівняннями:

- при розкисленні феромарганцем киплячих сталей

$$M_{FeMn} = \frac{M_{cm}(Mn_{cm}^{cp} - Mn_{нов})}{Mn_{FeMn}(1 - Y_{Mn})}, \text{ кг}, \quad (5.46)$$

- при розкисленні силікомарганцем з корегуванням феромарганцем сталі напівспокійних марок

$$M_{SiMn} = \frac{M_{cm}Si_{cm}^{cp}}{Si_{SiMn}(1 - Y_{Si})}, \text{ кг}, \quad (5.47)$$

$$M_{FeMn} = \frac{M_{cm}(Mn_{cm}^{cp} - Mn_{нов})}{Mn_{FeMn}(1 - Y_{Mn})} - \frac{Mn_{SiMn}}{Mn_{FeMn}} M_{SiMn}(1 - Y_{Mn}), \text{ кг}, \quad (5.48)$$

- при розкисленні силікомарганцем з корегуванням феросиліцієм сталі спокійних марок

$$M_{SiMn} = \frac{M_{cm}(Mn_{cm}^{cp} - Mn_{нов})}{Mn_{SiMn}(1 - Y_{Mn})}, \text{ кг}, \quad (5.49)$$

$$M_{FeSi} = \frac{M_{cm}Si_{cm}^{cp}}{Si_{FeSi}(1 - Y_{Si})} - \frac{Si_{SiMn}}{Si_{FeSi}} M_{SiMn}(1 - Y_{Si}), \text{ кг}, \quad (5.50)$$

де Mn_{cm}^{cp} і Si_{cm}^{cp} – середній вміст елементів готової сталі

$$E_{cm}^{cp} = \frac{E_{cm}^H + E_{cm}^e}{2}, \text{ \%}, \quad (5.51)$$

Y_{Mn} , Y_{Si} – угар елемента-розкислювача;

Mn_{FeMn} , Si_{FeSi} , Mn_{SiMn} , Si_{FeMn} – вміст елементів-розкислювачів у відповідних феросплавах, %.

Угар елемента-розкислювача визначається переважно вмістом вуглецю в металі перед випуском, умовами проведення випуску і розкислення та розраховується за наступними формулами:

- при $C_{нов} < 0,1\%$ угар вуглецю

$$Y_C = 0,7 - 2,0 \cdot C_{нов}, \quad (5.52)$$

- при $C_{нов} \geq 0,1\%$

$$Y_C = 0,537 - 0,34 \cdot C_{нов}, \quad (5.53)$$

- при $C_{нов} < 0,1\%$ угар марганцю

$$Y_{Mn} = 0,4 - 2,0 \cdot C_{нов} \quad (5.54)$$

- при $C_{нов} \geq 0,1\%$

$$Y_{Mn} = 0,217 - 0,17 \cdot C_{нов} \quad (5.55)$$

Вирази (5.54) і (5.55) можна використовувати для розрахунку угару кремнію Y_{Si} .

Угар розкислювача в ковші при обробці залежить не лише від вмісту вуглецю в сталі перед випуском, величина якого зворотно пропорційна концентрації розчиненого в металі кисню, але й від кількості пічного окисленого шлаку в сталерозливному ковші, організації струменя металу при випуску сталі в сталерозливний ківш та низки інших чинників. Найчастіше ці параметри (окрім вмісту вуглецю в сталі) важко піддаються кількісній оцінці. Тому орієнтовна величина можливого угару розкислювача визначається за вмістом вуглецю в сталі перед випуском.

Неправильне визначення величини угару розкислювача призводить до невідповідності хімічного складу сталі заданому або перевитраті розкислювачів і відповідного збільшення собівартості сталі.

5.3.1 Розрахунок маси сталі після розкислення і її складу

Маса сталі після розкислення

$$\begin{aligned} M_{ст.розк.} = & M_{ст} + 0,01M_{FeMn}(100 - Mn_{FeMn}Y_{Mn} - Si_{FeMn}Y_{Si} - Al_{FeMn}) + \\ & + 0,01M_{FeSi}(100 - Mn_{FeSi}Y_{Mn} - Si_{FeSi}Y_{Si} - Al_{FeSi}) + \\ & + 0,01M_{SiMn}(100 - Mn_{SiMn}Y_{Mn} - Si_{SiMn}Y_{Si} - Al_{SiMn}), \text{ кг.} \end{aligned} \quad (5.56)$$

Хімічний склад сталі після розкислення

$$C_{ст.розк} = \frac{1}{M_{ст.розк}} [M_{ст} C_{нов} + (1 - Y_C)(M_{FeMn} C_{FeMn} + M_{FeSi} C_{FeSi} + M_{SiMn} C_{SiMn})], \% \quad (5.57)$$

$$Mn_{ст.розк} = \frac{1}{M_{ст.розк}} [M_{ст} Mn_{нов} + (1 - Y_{Mn})(M_{FeMn} Mn_{FeMn} + M_{FeSi} Mn_{FeSi} + M_{SiMn} Mn_{SiMn})], \% \quad (5.58)$$

$$Si_{ст.розк} = \frac{1}{M_{ст.розк}} (1 - Y_{Si})(M_{FeMn} Si_{FeMn} + M_{FeSi} Si_{FeSi} + M_{SiMn} Si_{SiMn}), \% \quad (5.59)$$

$$S_{ст.розк} = \frac{1}{M_{ст.розк}} (M_{ст} S_{нов} + M_{FeMn} S_{FeMn} + M_{FeSi} S_{FeSi} + M_{SiMn} S_{SiMn}), \% \quad (5.60)$$

$$P_{ст.розк} = \frac{1}{M_{ст.розк}} (M_{ст} P_{нов} + M_{FeMn} P_{FeMn} + M_{FeSi} P_{FeSi} + M_{SiMn} P_{SiMn}), \% \quad (5.61)$$

Розрахований хімічний склад сталі порівнюють із встановленим маркою сталі межами (див. табл. 5.2).

5.4 Розрахунок теплового балансу плавки (до розкислення)

Наведені в цьому підрозділі рівняння містять величини теплоємності і тепловмісту матеріалів, що беруть участь в плавці, та теплові ефекти хімічних реакцій, значення яких взяті з робіт [1-6].

5.4.1 Надходження тепла

Вносить рідкий чавун (фізичне тепло чавуну):

$$Q_{чав} = M_{чав} (61,9 + 0,88 \cdot t_{чав}), \text{кДж.} \quad (5.62)$$

Вносить міксерний шлак

$$Q_{м.ш} = M_{чав} \cdot \frac{a}{100} \cdot (1,53 \cdot t_{чав} - 710), \text{кДж.} \quad (5.63)$$

Вносить окислення домішок металошихти

$$Q_{дом} = [11680 \cdot (1 - \alpha) + 35300 \cdot \alpha] \cdot (C_{мет.ш} - 0,01 \cdot M_{ст} \cdot C_{нов}) + 26930 Si_{мет.ш} + 7035 \cdot (Mn_{мет.ш} - 0,01 \cdot M_{ст} \cdot Mn_{нов}) + 19755 \cdot (P_{мет.ш} - 0,01 \cdot M_{ст} \cdot P_{нов}), \text{кДж.} \quad (5.64)$$

Вносить окислення заліза, що переходить в шлак і пил

$$Q_{Fe} = 0,01 \cdot M_{шл} \cdot [3600 \cdot (FeO) + 5110 \cdot (Fe_2O_3) + 5110 \cdot \chi], \text{ кДж.} \quad (5.65)$$

Вносить тепло шлакоутворення

$$Q_{шл.утв} = 0,01 \cdot M_{шл} \cdot [2300 \cdot (SiO_2) + 4,886 \cdot (P_2O_5)], \text{ кДж.} \quad (5.66)$$

Загальне надходження тепла дорівнює

$$Q_{надх} = Q_{чав} + Q_{м.ш} + Q_{дом} + Q_{Fe} + Q_{шл.утв}, \text{ кДж.} \quad (5.67)$$

5.4.2 Витрата тепла

Уносить рідка сталь

$$Q_{ст} = M_{ст} (54,8 + 0,84 \cdot t_{ст}), \text{ кДж.} \quad (5.68)$$

Уносить шлак

$$Q_{шл} = M_{шл} (2,09 \cdot t_{шл} - 1380), \text{ кДж.} \quad (5.69)$$

Кількість тепла, що уносять конвертерні гази, розраховують з рівняння (4.5) спочатку окремо для кожного газу з урахуванням коефіцієнтів для розрахунку їх теплоємності (див. таблицю Г.2), а потім знаходять їх суму. Інтегруючи рівняння (4.5) отримуємо

$$Q_{z.i} = 4,1868 \cdot V_{z.i} \cdot \frac{a(T_{ст} - T_{чав}) + b(T_{ст}^2 - T_{чав}^2) - c(T_{ст}^{-1} - T_{чав}^{-1})}{22,4}, \text{ кДж,} \quad (5.70)$$

де $V_{z.i}$ – об'єм i -ого газу розрахований у п. 5.2.11 (див. табл. 5.9), м³;

a , b і c – коефіцієнти для визначення теплоємності газів, кал/(моль·К).

Загальна кількість тепла, яку уносять конвертерні гази

$$Q_z = \sum Q_{z.i}, \text{ кДж.} \quad (5.71)$$

Тепло, що витрачається на дисоціацію оксидів заліза шихти

$$Q_{дис}^{Fe} = 3600 \cdot 0,01 \cdot \left(\frac{a}{100} \cdot M_{чав} \cdot FeO_{м.ш} + \frac{c}{100} \cdot M_{м.бр} \cdot FeO_{ок} \right) + \\ + 5110 \cdot 0,01 \cdot \left(M_{фут} \cdot Fe_2O_{3фут} + \frac{c}{100} \cdot M_{м.бр} \cdot Fe_2O_{3ок} \right), \text{ кДж.} \quad (5.72)$$

Тепло, що витрачається на дисоціацію карбонату кальцію вапна

$$Q_{дис}^{CaCO_3} = 4040 \cdot 0,01 \cdot M_{ван} \cdot CO_{2ван}, \text{ кДж,} \quad (5.73)$$

де 4040 – теплота дисоціації карбонату кальцію, кДж/кг.

Уносить пил

$$Q_{\text{пил}} = \chi \cdot \left(23,05 + 0,69 \cdot \frac{t_{\text{чав}} + t_{\text{см}}}{2} \right), \text{ кДж}, \quad (5.74)$$

Уносять викиди металу, корольки металу в шлаку і виплески

$$Q_{\text{в.к.в}} = (\Delta F e_{\text{впр}} - \chi) \cdot (54,9 + 0,838 \cdot t_{\text{см}}), \text{ кДж}, \quad (5.75)$$

5.4.3 Теплові втрати

Теплові втрати конвертера включають втрати теплоти через футерівку й кожух конвертера, на нагрівання активного* шару футерівки після простоїв, випромінюванням через горловину конвертера, на нагрів охолоджуючої фурму води, а також на нагрівання кисню, що вдувається. Більшість з перерахованих видів теплових втрат конвертера є відносно постійними й у ході кампанії конвертера не змінюються. До таких належать втрати випромінюванням через горловину конвертера, на нагрів охолоджуючої фурму води, а також на нагрівання кисню, що вдувається.

Зношення футерівки конвертера послаблює його теплоізоляцію від навколишнього середовища, що призводить до збільшення втрати теплоти через футерівку й кожух конвертера, на нагрівання активного шару футерівки після простоїв. Зокрема втрати теплоти через футерівку й кожух конвертера наприкінці кампанії конвертера можуть збільшитися у понад 3 рази, а на нагрів активного шару футерівки – на 40 % у порівнянні із початком кампанії. Розрахуємо кожен теплову статтю теплових втрат конвертера для початку кампанії конвертера.

Враховуючи наведене вище, а також те, що теплові втрати конвертера в значній мірі залежать від ємності конвертера, розрахунок їх точної величини можливий лише із прив'язкою до конкретного періоду кампанії конвертера заданої ємності. У нашому випадку, коли розрахунок здійснюється на 100 кг металошихти, величинами теплових втрат доцільно задатися довільно. За свідченням авторів роботи [1] величина загальних теплових втрат конвертера становить в залежності від його садки 1,5...12 % від загального надходження

* внутрішній шар футерівки, який під час простою конвертера охолоджується і потім знову нагрівається впродовж плавки.

тепла на процес. У таблиці 5.14 наведені величини теплових втрат розраховані для конвертерів ємністю 59 і 350 т.

Таблиця 5.14

Теплові втрати конвертерів різної ємності, % від надходження тепла на процес

Стаття теплових втрат	Ємність конвертера, т	
	59 [6]	350 [7]
Через футерівку й кожух конвертера	0,87...2,72	0,37...0,80
Нагрівання активного шару футерівки	0,96...1,28	1,86...2,70
Випромінювання через горловину конвертера	4,05	0,72...0,81
Нагрівання охолоджуючої фурму води	2,56	0,88...0,98
Нагрівання кисню	0,52	0,44...0,49
Всього:	8,96...11,13	4,27...5,78

Тоді абсолютні загальні теплові втрати конвертера

$$Q_{втр} = 0,01 \cdot Q_{надх} \cdot 5\% , \text{ кДж}, \quad (5.76)$$

де 5 % – відносні теплові втрати конвертера, які можуть бути прийняті на власний розсуд з таблиці 5.14.

Загальна витрата тепла складає

$$Q_{витр} = Q_{ст} + Q_{шл} + Q_2 + Q_{дис}^{Fe} + Q_{шл} + Q_{в.к.в} + Q_{втр}, \text{ кДж}. \quad (5.77)$$

Результати розрахунку заносять у таблицю 5.15.

5.5 Розрахунок коригуючих добавок

Коригуючи операції здійснюють, якщо різниця між надходженням і витратою тепла перевищує 0,5...0,8 %, що відповідає відхиленню фізичної температури сталі від середньозаданої на $\pm 10...15$ °С.

В студентських роботах розрахунок коригуючих добавок необхідно виконувати у будь-якому випадку незалежно від величини різниці між приходом і витратою тепла.

Надлишок* тепла ΔQ складає:

$$\Delta Q = Q_{надх} - Q_{втр}, \text{ кДж}, \quad (5.78)$$

* Якщо результат розрахунку є від'ємним, то говорять про дефіцит тепла на процес.

або

$$\Delta Q' = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{надх}}} \cdot 100\% , \% \text{ від надходження тепла.} \quad (5.79)$$

Таблиця 5.15

Приклад матеріальний баланс киснево-конвертерної плавки (до розкислення)

НА ДІЙШЛО			ОТРИМАНО		
Стаття	Величина		Стаття	Величина	
	кДж	%		кДж	%
Рідкий чавун $Q_{\text{чав}}$	92171	50,2	Рідка сталь $Q_{\text{ст}}$	123918	65,9
Міксерний шлак $Q_{\text{м.ш}}$	1822	1,0	Шлак $Q_{\text{шл}}$	28818	15,3
Окислення домішок металу шихти $Q_{\text{дом}}$	73818	40,2	Конвертерні гази $Q_{\text{г}}$	15565	8,3
Окислення заліза Q_{Fe}	10453	5,7	Дисоціація оксидів заліза шихти $Q_{\text{дис}}^{\text{Fe}}$	1342	0,7
Тепло шлакоутворення $Q_{\text{шл.утв}}$	5427	3,0	Дисоціацію карбонату кальцію $Q_{\text{дис}}^{\text{CaCO}_3}$	3341	1,8
			Пил $Q_{\text{пил}}$	1270	0,7
			Викиди металу, корольки металу в шлаку і виплески $Q_{\text{в.к.в}}$	4661	2,5
			Теплові втрати $Q_{\text{втр}}$	9185	4,9
Всього:	183691	100	Всього:	188099	100

Для усунення надлишку тепла на процес розраховують додаткову масу металобрухту

$$\Delta M_{\text{м.бр}} = \frac{\Delta Q}{0,84 \cdot t_{\text{ст}} + 54,9}, \text{ кг,} \quad (5.80)$$

а для усунення дефіциту можливе використання одного або декількох видів палива:

$$\Delta M_{\text{пал}} = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{пал}}}, \text{ кг,} \quad (5.81)$$

де $Q_{нал}$ – кількість тепла, що засвоюється ванною при введенні палива (таблиця 5.16), кДж/кг.

Таблиця 5.16

Кількість тепла, що засвоюється ванною при введенні палива, кДж/кг

Карбід кремнію	Карбід кальцію	Антрацит	Піролізована біомаса
17000	10680	32000	21500

Кількість тепла, що надходить до ванни при введенні палива, складається не лише з теплового ефекту від його згоряння, а й у деяких випадках реакцій продуктів окислення реагентів палива з компонентами металу і шлаку. Наприклад одним з продуктів окислення карбіду кремнію є оксид кремнію, який при ошлакуванні виділяє додаткове тепло.

Наприкінці розрахунку слід навести висновок щодо температури отриманої сталі (більше або нижче заданої), а також рішення автора роботи відносно використання розрахованої коригуючої кількості металевого брухту або палива. У випадку виявлення дефіциту тепла на процес студентам слід розраховувати масу кожного з наведених видів палива необхідну для одержання сталі із заданою температурою.

Для спрощення розрахунку зміною статей матеріального балансу плавки і хімічного складу сталі при зміні витрати металевого брухту, пов'язаній з коригуючими операціями, можна знехтувати.

ДОДАТОК А

Похідні одиниці СІ, що мають спеціальне найменування, або утворенні з використанням спеціальних найменувань

Величина	Одиниця				
	найменування	позначення		вираження через одиниці СІ	
		українське	міжнародне	додаткові	основні
Сила	ньютон	Н	N	-	кг·м/с ²
Тиск	паскаль	Па	Pa	Н/м ²	кг/(м·с ²)
Енергія, робота, кількість теплоти	джоуль	Дж	J	Н·м	кг·м ² /с ²
Потужність, потік енергії	ватт	Вт	W	Дж/с	кг·м ² /с ³
Коефіцієнт динамічної в'язкості	паскаль-секунда	Па·с	Pa·s	-	кг/(м·с)
Коефіцієнт кінематичної в'язкості	квадратний метр на секунду	м ² /с	m ² /s	-	м ² /с
Густина	кілограм на кубічний метр	кг/м ³	kg/m ³	-	кг/м ³
Питома енергія (плавлення, тощо)	джоуль на кілограм	Дж/кг	J/kg	-	м ² /с ²
Теплоємність, ентропія системи	джоуль на кельвін	Дж/К	J/K	-	кг·м ² /(с ² ·К ⁻¹)
Питома теплоємність, питома ентропія	джоуль на кілограм-кельвін	Дж/(кг·К)	J/(kg·K)	-	м ² /(с ² ·К ⁻¹)
Коефіцієнт теплопровідності	ватт на метр-кельвін	Дж/(м·К)	J/(m·K)	-	кг·м/(с ² ·К ⁻¹)
Імпульс (кількість руху)	кілограм-метр на секунду	кг·м/с	kg·m/s	Н·с	кг·м/с
Коефіцієнт дифузії	квадратний метр на секунду	м ² /с	m ² /s	-	м ² /с
Мольна маса	кілограм на моль	кг/моль	kg/mol	-	кг/моль
Масова концентрація речовини	кілограм на кубічний метр	кг/м ³	kg/m ³	-	кг/м ³
Коефіцієнт масопередачі	метр на секунду	м/с	m/s	-	м/с

ДОДАТОК Б

Співвідношення між одиницями СІ та деякими позасистемними одиницями

Таблиця Б.1

Співвідношення між одиницями сили

Одиниця	Н	дин	гс	кгс	тс	фунт-сила	кіп (kip)	сн (sthene)
ньютон, Н	1	10^5	101,97	0,1020	$1,0197 \cdot 10^4$	0,2248	$2,2481 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
дина, дин	10^{-5}	1	$1,0197 \cdot 10^{-3}$	$1,0197 \cdot 10^{-6}$	$1,0197 \cdot 10^{-9}$	$2,2481 \cdot 10^{-6}$	$2,2481 \cdot 10^{-9}$	10^{-8}
грамм-сила, гс	$9,8067 \cdot 10^{-3}$	980,67	1	$1,0197 \cdot 10^{-3}$	$1,0197 \cdot 10^{-6}$	$2,2046 \cdot 10^{-3}$	$2,2046 \cdot 10^{-6}$	$9,8067 \cdot 10^{-6}$
килограмм-сила, кгс	9,8067	$9,8067 \cdot 10^5$	10^3	1	$1,0197 \cdot 10^{-3}$	2,2046	$2,2046 \cdot 10^{-3}$	$9,8067 \cdot 10^{-3}$
тонна-сила, тс	9806,7	$9,8067 \cdot 10^5$	10^6	10^3	1	$2,2046 \cdot 10^3$	2,2046	9,8067
фунт-сила (GB, US*)	4,4482	$4,4482 \cdot 10^5$	453,59	0,4536	$4,4482 \cdot 10^{-4}$	1	10^{-3}	$4,4482 \cdot 10^{-3}$
кіп, kip (GB, US)	4448,22	$4,4482 \cdot 10^8$	$4,5359 \cdot 10^5$	$4,5359 \cdot 10^2$	0,4536	10^3	1	4,4482
стен, сн (sthene)	10^3	10^8	$1,0197 \cdot 10^5$	$1,0197 \cdot 10^2$	0,1020	224,81	0,2248	1

* Одиниці, що широко вживані у Великобританії і США.

Таблиця Б.2

Співвідношення між одиницями тиску

Одиниця	Па	бар	мм.рт.ст	мм.вод.ст.	атм	ата	дин/м ²	psi
паскаль, Па	1	10⁻⁵	$7,5006 \cdot 10^{-3}$	0,10197	$9,8692 \cdot 10^{-6}$	$1,0197 \cdot 10^{-5}$	10	$1,4504 \cdot 10^{-4}$
бар	10⁵	1	750,06	$1,0197 \cdot 10^4$	0,9869	1,0197	10⁶	14,504
мм.рт.ст (тор)	133,32	$133,32 \cdot 10^{-3}$	1	13,595	$1,3158 \cdot 10^{-3}$	$1,3595 \cdot 10^{-3}$	$1,3332 \cdot 10^3$	$1,9337 \cdot 10^{-2}$
мм.вод.ст.	9,8067	$9,8067 \cdot 10^{-5}$	$7,3556 \cdot 10^{-2}$	1	$9,6784 \cdot 10^{-5}$	10⁻⁴	98,067	$1,4223 \cdot 10^{-3}$
атмосфера фізична, атм	101325	1,01325	760	10332	1	1,0332	1013250	14,696
атмосфера технічна, ат (ата, кгс/см ²)	98067	0,98067	735,56	10⁴	0,9678	1	980665	14,223
дин/м ²	0,1	10⁻⁶	$7,5006 \cdot 10^{-4}$	$1,0197 \cdot 10^{-2}$	$9,8692 \cdot 10^{-7}$	$1,0197 \cdot 10^{-6}$	1	$1,4504 \cdot 10^{-5}$
фунт-сила/ дюйм ² , psi (GB, US)	$6,8948 \cdot 10^3$	$6,8948 \cdot 10^{-2}$	51,715	703,07	$6,8046 \cdot 10^{-2}$	$7,0307 \cdot 10^{-2}$	68948	1

Таблиця Б.3

Співвідношення між одиницями енергії

Одиниця	Дж	кал (міжн.)	кал (терм.)	кг.у.п.	кВт·год	БТО	ерг
джоуль, Дж	1	0,2388	0,2390	$3,4130 \cdot 10^{-8}$	$2,7778 \cdot 10^{-7}$	$9,4782 \cdot 10^{-4}$	10^7
калорія ¹ (міжнародна), кал	4,1868	1	1,0007	$1,4289 \cdot 10^{-7}$	1,163	$3,9683 \cdot 10^{-3}$	$4,1868 \cdot 10^7$
калорія (термохімічна)	4,184	0,9993	1	$1,4280 \cdot 10^{-7}$	$1,1622 \cdot 10^{-6}$	$3,9657 \cdot 10^{-3}$	$4,184 \cdot 10^7$
кілограм умовного палива, кг.у.п.	$2,93 \cdot 10^7$	$6,9982 \cdot 10^6$	$7,0029 \cdot 10^6$	1	8,1389	$2,7778 \cdot 10^4$	$2,93 \cdot 10^{14}$
кіловат-година, кВт·год	$3,6 \cdot 10^6$	$8,5985 \cdot 10^5$	$8,6042 \cdot 10^5$	0,1229	1	$3,4121 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^{13}$
британська теплова одиниця (міжнародна)	1055,056	252,00	252,16	$3,6009 \cdot 10^{-5}$	$2,9307 \cdot 10^{-4}$	1	$1,0551 \cdot 10^{10}$
ерг	10^{-7}	$2,3885 \cdot 10^{-8}$	$2,3901 \cdot 10^{-8}$	$3,4130 \cdot 10^{-15}$	$2,7778 \cdot 10^{-14}$	$9,4782 \cdot 10^{-11}$	1

Таблиця Б.4

Співвідношення між одиницями теплоємності

Одиниця	Дж/(кг·К)	ерг/(г·°С)	кал/(г·°С)
Джоуль на кілограм-кельвін, Дж/(кг·К)	1	10^4	$2,3885 \cdot 10^{-4}$
Ерг на грам-градус Цельсія, ерг/(г·°С)	10^{-4}	1	$2,3885 \cdot 10^{-8}$
Калорія на грам-градус Цельсія ² , кал/(г·°С)	$4,1868 \cdot 10^3$	$4,1868 \cdot 10^7$	1

¹ Калорія визначається, як кількість тепла, що необхідне для нагріву 1 г чистої води на 1 °С. Оскільки теплоємність води змінюється з температурою, окрім міжнародної калорії (4,1868 Дж) розрізняють декілька майже схожих за величиною одиниць: 15-тиградусна або харчова (4,186 Дж) – підігрів води від 14,5 до 15,5 °С; 20-тиградусна (4,182 Дж); середня (4,19 Дж) застосовується здебільшого в Великобританії і США; термохімічна (4,184 Дж) часто вживається у старій довідковій літературі.

² У старій довідковій літературі часто зустрічається також кілокалорія на кілограм-градус Цельсія [кал/(г·°С)], величина якої така ж сама.

Таблиця Б.5

Співвідношення між одиницями теплопровідності

Одиниця	Вт/(м·К)	ерг/(с·см·°С)	ккал/(год·м·°С)	кал/(с·см·°С)
ватт на метр-кельвін, Вт/(м·К)	1	10^9	0,8598	$2,3885 \cdot 10^{-3}$
ерг на секунду-сантиметр-градус Цельсію, ерг/(с·см·°С)	10^{-9}	1	$8,5985 \cdot 10^{-10}$	$2,3885 \cdot 10^{-12}$
Кілокалорія на годину-метр-градус Цельсію, ккал/(год·м·°С)	1,163	$1,163 \cdot 10^9$	1	$2,7778 \cdot 10^{-3}$
Калорія на секунду-сантиметр-градус Цельсію, кал/(с·см·°С)	418,68	$4,1868 \cdot 10^{11}$	360	1

Таблиця Б.6

Співвідношення між одиницями потужності

Одиниця	Вт	ерг/с	кгс·м/с	кал/с	к.с. (міжн.)	к.с. (англ.)
ватт, Вт	1	10^7	0,1020	0,2388	$1,3596 \cdot 10^{-3}$	$1,3410 \cdot 10^{-3}$
ерг на секунду, ерг/с	10^{-7}	1	$1,0197 \cdot 10^{-8}$	$2,3885 \cdot 10^{-8}$	$1,3596 \cdot 10^{-10}$	$1,3410 \cdot 10^{-10}$
кілограм-сила-метр на секунду, кгс·м/с	9,8067	$9,8067 \cdot 10^7$	1	2,3423	$1,3333 \cdot 10^{-2}$	$1,3151 \cdot 10^{-2}$
калорія на секунду, кал/с	4,1868	$4,1868 \cdot 10^7$	0,4269	1	$5,6925 \cdot 10^{-3}$	$5,6146 \cdot 10^{-3}$
кінська сила (міжнародна або метрична), к.с.	735,499	$7,3550 \cdot 10^9$	75,000	175,67	1	0,9863
кінська сила (механічна або англійська), к.с.	745,700	$7,4570 \cdot 10^9$	76,040	178,11	1,0139	1

Таблиця Б.7

Співвідношення між одиницями динамічної в'язкості

Одиниця	Па·с	пз	кгс·с/м ²	кг/(м·год)
паскаль-секунда (пуазейль), Па·с	1	10	0,1020	3571,4
Пуаз, пз	0,1	1	1,0197·10 ⁻²	357,14
Кілограм-сила-секунда на квадратний метр, кгс·с/м ²	9,8067	98,067	1	35024
кілограм на метр-годину, кг/(м·год)	2,8·10 ⁻⁴	2,8·10 ⁻³	2,8552·10 ⁻⁵	1

Таблиця Б.8

Співвідношення між одиницями кінематичної в'язкості

Одиниця	м ² /с	Ст	сСт	м ² /год	in ² /min
квадратний метр на секунду, м ² /с	1	10 ⁴	10 ⁶	3600	93000
Стокс, Ст	10 ⁻⁴	1	100	0,36	9,3
Сантистокс, сСт	10 ⁻⁶	0,01	1	0,0036	0,093
Квадратний метр на годину, м ² /год	2,7778·10 ⁻⁴	2,7778	277,78	1	25,8334
квадратний дюйм на хвилину, in ² /min	1,0753·10 ⁻⁵	0,1075	10,753	3,8710·10 ⁻²	1

**Множники і префікси для утворення десяткових кратних і часткових
одиниць та їх назви**

Множник	Префікс		Позначення	
	українське	міжнародне	українське	міжнародне
10^{24}	йота	yotta	Й	Y
10^{21}	зета	zetta	З	Z
10^{18}	екса	exa	Е	E
10^{15}	пета	peta	П	P
10^{12}	тера	tera	Т	T
10^9	гіга	giga	Г	G
10^6	мега	mega	М	M
10^3	кіло	kilo	к	k
10^2	гекто	hecto	г	h
10^1	дека	deca	да	da
10^{-1}	деци	deci	д	d
10^{-2}	санти	centi	с	c
10^{-3}	мілі	milli	м	m
10^{-6}	мікро	micro	мк	μ
10^{-9}	нано	nano	н	n
10^{-12}	піко	pico	п	p
10^{-15}	фемто	femto	ф	f
10^{-18}	ато	atto	а	a
10^{-21}	зепто	zepto	з	z
10^{-24}	йокто	yocto	й	y

ДОДАТОК Г

Теплові ефекти реакцій окислення елементів киснем газової фази

Реакція*	Стандартний тепловий ефект реакції	
	ккал/кг реагенту, що окислюється	ккал/кг продукту, що утворюється
$[C] + \{O_2\} = \{CO_2\}$	7236	1973
$[Si] + \{O_2\} = \{SiO_2\}$	6075	2835
$2[P] + \frac{5}{2}\{O_2\} = (P_2O_5)$	3621	1581
$[C] + \frac{1}{2}\{O_2\} = \{CO\}$	2220	951
$2[Cr] + \frac{3}{2}\{O_2\} = (Cr_2O_3)$	2208	1511
$2[Fe] + \frac{3}{2}\{O_2\} = (Fe_2O_3)$	1608	1125
$[Mn] + \frac{1}{2}\{O_2\} = (MnO)$	1390	1077
$[Fe] + \frac{1}{2}\{O_2\} = (FeO)$	920	715
$2(FeO) + \frac{1}{2}\{O_2\} = (Fe_2O_3)$	482	482

* При розрахунку теплових ефектів реакцій прийнято, що всі тверді, рідкі і газоподібні реагенти та продукти реакцій мають температуру 1600 °С, окрім кисню, який вдувається в ванну за температури близько 25 °С.

Основні властивості шихтових матеріалів і деяких продуктів плавки

Таблиця Г.1

Деякі фізико-хімічні властивості заліза, чавуну і сталі

Показник	Матеріал		
	залізо	чавун*	сталь
Густина, т/м ³ :			
• рідкого	6,9...7,2	6,7	7,0...7,2
• твердого	7,88	7,2	7,8...7,9
В'язкість (1600 °С)			
• динамічної, Па·с	0,0047...0,0050	0,0025	0,006...0,007
• кінематична ·10 ⁻⁷ , м ² /с	6,5...7,2	3,7	8,3...10
Поверхневий натяг, Дж/м ²			
	1,6...1,8	0,004...0,008	1,2...1,87
Температура, °С:			
• плавлення	1536...1539	1147...1500	1150...1600
• кипіння	3227...3230	н/д	н/д
Теплота, кДж/кг:			
• плавлення	270	231	272
• кипіння	6280	н/д	н/д
Питома теплоємність, Дж/(кг·К):			
• рідкого	749	790	790
• твердого	формула (4.38)	620	600...720
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К):			
• рідкого (1600 °С)	23	24,0	24...40
• твердого	95	30,3	29,1

* Оскільки фізико-хімічні властивості чавуну і сталі суттєво залежать від їх хімічного складу у таблиці наведені усереднені дані.

Таблиця Г.2

Теплоємності деяких газів $c_p = a + bT + cT^{-2}$

Газ	Коефіцієнт, кал/(моль·К)			ΔT , К
	a	$b \cdot 10^3$	$c \cdot 10^{-5}$	
CO	6,79	0,98	-0,11	298÷2500
CO_2	10,55	2,16	-2,04	298÷2500
CH_4	5,65	11,44	-0,46	298÷1500
C_2H_4				
H_2	27,30	3,27	0,50	298÷3000
H_2O	18,03	-	-	273÷373
N_2	6,66	1,02	-	298÷2500
O_2	7,16	1,0	-0,40	298÷3000

Таблиця Г.3

Стандартна ентальпія деяких газів ΔH_{298}^0 , кДж/моль

CO	CO_2	CH_4	$H_2O_{газ}$	N_2	O_2
-110,62	-393,77	74,90	-286,02	0	0

Відповіді на завдання

Розділ 1

1. 6 сопел. **2.** 13° . **3.** $l_{\text{конф}} = 18 \dots 73$ мм,
 $l_{\text{диф}} = 63 \dots 79$ мм, $d_{\text{вих}} = 41$ мм,
 $d_{\text{вх}} = 39 \dots 56$ мм. **4.** 1,06 ата; 2,246 кг/м³;
 -94°C ; 456 м/с. **5.** 5,39 ата; 4,902 кг/м³;
 -29°C ; 298 м/с. **6.** 40 мм. **7.** на 2 сопла.
8. (1.28) – 648 мм; (1.29) – 501 мм; (1.30) –
 373 мм; (1.31) – 426 мм; (1.32) – 608 мм.
9. (1.28) – 761 мм; (1.29) – 550 мм; (1.30) –
 402 мм; (1.31) – 444 мм; (1.32) – 634 мм.
10. 3,969 м. **11.** (1.29) – 264 мм; (1.30) –
 267 мм; (1.31) – 261 мм; (1.32) – 373 мм;
 діаметр 210 мм.

Розділ 2

1. 1,7...2,2 кВт/т. **2.** 3,5...4,4 кВт/т;
 5,2...6,5 кВт/т. **3.** -0,2...0,8 кВт/т.
4. 0,8...1,0 кВт/т. **5.** Для 100 т – 7,4 і 22,3
 кВт/т; для 350 т – 9,6 і 28,7 кВт/т. **6.** 2,0
 кВт/т. **7.** 29,3 кВт/т. **8.** 0,34 %/хв. **9.** 36,2
 кВт/т. **10.** Менша у 10,2...12,7 рази. **11.** На
 362 кВт/т. **12.** 6,13 м³. **13.** На 46 м³. **14.** У 3
 рази. **15.** 44,5 м³ і 0,13 м³/т. **16.** 13350 м² і
 38 м²/т. **17.** 10 м³/(т·хв). **18.** 0,56; 1,22; 1,57.
19. Зменшиться у 2,5 рази. **20.** збільшиться
 у 25 разів. **21.** 13,65 м³/(т·хв). **22.** 2,2 і 2,7
 мм. **23.** 0,7 %/хв. **24.** Зменшиться у 4 рази.
25. 1,34; 4,1; 8,38; 14,1; 21,4; 40,5 мм. **26.**
 0,66; 0,69; 0,71; 0,74; 0,76; 0,79; 0,81 мм.

Розділ 3

1. 240 і 480 м². **2.** $8 \cdot 10^7$. **3.** У $6,4 \cdot 10^7$ разів.
4. Відповідно у стільки ж разів. **5.** 100 мм.
6. 21,5 мм. **7.** 0,57 с. **8.** 570 с. **9.** 3,26 с.
10. 21,8 с. **11.** 0,3 с. **12.** 10 мм. **13.** 5,2 мм.
14. 47,23 %. **15.** 2,8 мм. **16.** 0,042 %; 0,034
 %; 0,029 %. **17.** 12,5 %. **18.** 0,26 %. **19.** У
 1,71 рази. **20.** У 1,1 рази. **21.** 0,035 %; 0,02

%; 0,012 %. **22.** 0,027 %; 0,023 %; 0,02%.
23. 12,5 %; 9,75 %. **24.** 18 %; 8,6 %; 6,9 %.
25. 9 %; 4,3 %; 3,45 %. **26.** 0,055 %;
 0,041 %; 0,018 %. **27.** 0,033 %; 0,023 %;
 0,018 %. **28.** 18 %. **29.** 0,12 %. **30.** 25,2 %.
31. 12,6 %. **32.** 16,8 %. **33.** 13,1 %.
34. 0,11 %. **35.** 12,4 кг. **36.** 13 кг. **37.** 8,63 %.
38. 0,17 % і 0,039 %. **39.** 1 раз. **40.** 0,2 % і
 0,026 %. **41.** 0,16 % і 0,057 %. **42.** 118 % і
 39 %. **43.** 0,072 % і 0,032 %; 21,6 і 12,8 %.
44. 0,0038 % і 0,058 %. **45.** 0,024 %.
46. 1,9 %. **47.** Зменшиться у 0,6 рази.
48. Збільшиться у 2,25 рази. **49.** Змен-
 шиться у 0,6 рази. **50.** Зменшиться у 6
 разів. **51.** Збільшиться у 1,25 рази. **52.**
 XXX.

Розділ 4

1. 137837 кДж. **2.** 172 ккал.
3. 0,955 кДж/(кг·°C); 42,02 Дж/(моль·°C).
4. 32,98 кДж/(кмоль·°C); 1,03 кДж/(кг·°C);
 1,472 кДж/(м³·°C). **5.** 0,5091 кДж/(кг·°C).
6. 0,9926 кДж/(кг·°C). **7.** 0,9263
 кДж/(кг·°C). **8.** 0,99 і 0,92 кДж/(кг·°C).
9. 0,94 і 0,96 кДж/(кг·°C). **10.** 1,425
 кДж/(м³·°C). **11.** $1,654 \cdot 10^6$ кДж. **12.** 26686
 кДж. **13.** 268804 кДж. **14.** 1119566 кДж.
15. 1419,61 кДж/моль. **16.** 819,67
 кДж/моль. **17.** 177,7 кДж/моль. **18.** 43,2 і
 43,66 кДж/моль. **19.** 107,68 кДж/моль.
20. 115,24 кДж/моль. **21.** 186 кДж/моль.
22. 1185 °C. **23.** 65:15. **24.** 6 %. **25.** 3,75 %.
26. 1,7 %. **27.** 16 %. **28.** 81,1 ккал. **29.** 9 °C.
30. 7,0...7,5 °C. **31.** У 1,9 рази. **32.** 72:28.
33. 74:26. **34.** XXX. **35.** XXX.
36. Підвищення відповідно на 11,5; 28,5;
 65; 22,5; 5,0 °C. **37.** 5,4 %. **38.** 2,23 кг.
39. 0,01 %. **40.** 0,1.

Початкові дані до розділу 5

№ з/п	Склад чавуну, %					Додатковий тип металобрухту	
	C	Si	Mn	P	S	тип	вага, кг*
1	4,32	0,83	1,00	0,17	0,05	чушковий чавун	17,7
2	4,65	0,94	0,95	0,16	0,06	скрап	5,0
3	4,45	0,88	1,15	0,17	0,045	чушковий чавун	10,8
4	4,60	0,73	0,98	0,18	0,05	кременистий лом	7,9
5	4,25	0,82	1,08	0,15	0,045	чушковий чавун	5,7
6	4,40	0,85	1,13	0,20	0,05	кременистий лом	8,1
7	4,70	0,91	0,98	0,20	0,040	чушковий чавун	8,5
8	4,35	0,80	1,05	0,19	0,05	скрап	7,2
9	4,29	0,78	1,13	0,18	0,05	кременистий лом	9,3
10	4,70	0,83	0,73	0,12	0,05	скрап	9,5
11	4,25	0,35	1,08	0,15	0,045	окатиші	1,8
12	4,40	0,30	1,13	0,20	0,05	кременистий лом	7,7
13	4,70	0,32	0,98	0,2	0,04	окатиші	0,9
14	4,35	0,44	1,05	0,19	0,05	окатиші	1,3
15	4,29	0,41	1,13	0,18	0,05	кременистий лом	9,6
16	4,70	0,34	0,73	0,12	0,05	окатиші	0,4
17	4,32	0,52	1,0	0,17	0,05	чушковий чавун	15,7
18	4,65	0,56	0,95	0,16	0,06	скрап	10,4
19	4,45	0,51	1,15	0,17	0,065	кременистий лом	7,2
20	4,60	0,35	0,98	0,18	0,05	окатиші	0,5
21	4,50	0,30	1,13	0,20	0,05	скрап	8,1
22	4,32	0,83	1,00	0,17	0,05	чушковий чавун	11,2
23	4,45	0,94	0,95	0,16	0,06	окатиші	0,4
24	4,70	0,32	0,98	0,20	0,04	чушковий чавун	5,9
25	4,50	0,50	1,10	0,14	0,05	окатиші	1,0
26	4,30	0,80	0,69	0,18	0,06	окатиші	1,4
27	4,55	0,30	0,80	0,16	0,05	чушковий чавун	6,7
28	4,40	0,91	0,92	0,20	0,04	чушковий чавун	21,0
29	4,40	0,50	1,06	0,12	0,06	кременистий лом	8,1
30	4,38	0,84	1,08	0,13	0,06	кременистий лом	7,7
31	4,55	0,81	1,02	0,18	0,06	чушковий чавун	8,6
32	4,42	0,86	1,05	0,19	0,055	кременистий лом	9,2
33	4,50	0,30	1,13	0,20	0,05	окатиші	1,9
34	4,60	0,50	1,20	0,11	0,04	скрап	7,6
35	4,20	0,55	1,00	0,20	0,05	скрап	5,8
36	4,70	0,34	0,73	0,12	0,05	чушковий чавун	18,6
37	4,55	0,81	1,02	0,18	0,06	чушковий чавун	11,2
38	4,60	0,88	0,60	0,13	0,04	скрап	11,8
39	4,55	0,77	0,85	0,12	0,06	окатиші	1,4
40	4,45	0,75	1,15	0,12	0,045	скрап	12,9

* На 100 кг металошихти

Продовження додатку Б

№ з/п	Склад готової сталі, %					Температура, °С	
	C	Si	Mn	P	S	чавуну	сталі
1	0,38÷0,46	0,20÷0,30	0,58÷0,78	0,04	0,04	1350	1595
2	0,08÷0,16	сліди	0,33÷0,53	0,05	0,04	1335	1630
3	0,15÷0,23	0,19÷0,29	0,44÷0,64	0,04	0,05	1380	1620
4	0,13÷0,21	0,18÷0,28	0,40÷0,60	0,05	0,05	1360	1620
5	0,30÷0,38	0,18÷0,28	0,48÷0,68	0,045	0,04	1340	1590
6	0,14÷0,22	0,16÷0,26	0,36÷0,56	0,05	0,04	1390	1620
7	0,08÷0,16	сліди	0,30÷0,50	0,05	0,04	1320	1620
8	0,20÷0,28	0,14÷0,24	0,46÷0,66	0,04	0,04	1370	1600
9	0,10÷0,18	0,18÷0,28	0,40÷0,60	0,05	0,05	1380	1620
10	0,25÷0,33	0,20÷0,30	0,60÷0,80	0,04	0,04	1380	1590
11	0,30÷0,38	0,18÷0,28	0,48÷0,68	0,045	0,04	1300	1590
12	0,14÷0,22	0,16÷0,26	0,36÷0,56	0,05	0,04	1370	1610
13	0,08÷0,16	сліди	0,30÷0,50	0,05	0,04	1350	1625
14	0,20÷0,28	0,14÷0,24	0,46÷0,66	0,04	0,04	1300	1600
15	0,10÷0,18	0,18÷0,28	0,40÷0,60	0,05	0,05	1380	1620
16	0,25÷0,33	0,20÷0,30	0,60÷0,80	0,04	0,04	1350	1600
17	0,38÷0,46	0,20÷0,30	0,58÷0,78	0,04	0,04	1340	1590
18	0,08÷0,16	сліди	0,33÷0,53	0,05	0,04	1340	1630
19	0,15÷0,23	0,19÷0,29	0,44÷0,64	0,04	0,05	1340	1610
20	0,13÷0,21	0,18÷0,28	0,40÷0,60	0,05	0,05	1280	1600
21	0,14÷0,22	0,16÷0,26	0,36÷0,56	0,04	0,035	1360	1610
22	0,38÷0,46	0,20÷0,30	0,58÷0,78	0,04	0,04	1350	1600
23	0,09÷0,17	сліди	0,33÷0,53	0,05	0,04	1340	1625
24	0,08÷0,16	сліди	0,30÷0,50	0,05	0,04	1370	1630
25	0,30÷0,36	0,16÷0,26	0,45÷0,65	0,04	0,035	1360	1600
26	0,08÷0,16	сліди	0,35÷0,55	0,04	0,05	1320	1630
27	0,16÷0,24	0,18÷0,28	0,55÷0,75	0,04	0,04	1350	1600
28	0,10÷0,18	0,15÷0,25	0,40÷0,60	0,05	0,05	1250	1620
29	0,22÷0,30	0,44÷0,54	0,60÷0,80	0,045	0,04	1340	1610
30	0,40÷0,48	0,18÷0,28	0,65÷0,85	0,045	0,04	1400	1595
31	0,12÷0,19	0,17÷0,27	0,37÷0,67	0,05	0,05	1370	1625
32	0,21÷0,29	0,17÷0,27	0,40÷0,60	0,045	0,045	1380	1610
33	0,14÷0,22	0,16÷0,26	0,36÷0,56	0,05	0,04	1320	1615
34	0,22÷0,30	0,20÷0,30	0,35÷0,55	0,05	0,05	1280	1620
35	0,30÷0,38	0,25÷0,35	0,50÷0,70	0,05	0,05	1250	1600
36	0,25÷0,33	0,20÷0,30	0,60÷0,80	0,04	0,04	1350	1620
37	0,12÷0,19	0,17÷0,27	0,37÷0,67	0,05	0,05	1370	1620
38	0,48÷0,53	0,18÷0,28	0,60÷0,80	0,05	0,04	1350	1590
39	0,25÷0,33	0,23÷0,33	0,40÷0,60	0,04	0,04	1340	1610
40	0,15÷0,23	0,25÷0,35	0,45÷0,65	0,04	0,04	1325	1600

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – Ленинград-М.: Государственное энергетическое издательство, 1958. – 416 с.
2. Металургія сталі. Конвертерне виробництво: теорія, технологія, якість металу, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія / О.Г. Величко, Б.М. Бойченко, П.С. Харлашин, М.Є. Нехаєв [и др.]. – Д.: РВА «Дніпро-VAL», 2015. – 434 с.
3. Чернятевич А.Г. Уточнення термодинамічної моделі рафінування конвертерної ванни під час продувки через триярусну кисневу фурму / А.Г. Чернятевич, Л.С. Молчанов, П.О. Юшкевич // *****
4. Технология производства стали в современных конвертерных цехах / С.В. Колпаков, Р.В. Старов, В.В. Смоктий [и др.]. – М.: Машиностроение, 1991. – 464 с.
5. Баптизманский В.И. Тепловая работа кислородных конвертеров / В.И. Баптизманский, Б.М. Бойченко, В.П. Черевко. – М.: Metallurgia, 1988. – 174 с.
6. Оценка значимости тепловых потерь кислородных конвертеров / Е.В. Синегин, К.Г. Низяев, Б.М. Бойченко, Л.С. Молчанов, А.Н. Стоянов // XVII International scientific conference “New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering and production engineering”: A collective monograph edited by Jarosław Boryca, Rafał Wyczółkowski. – Czestochowa (Poland). – 2016. – P. 123-126.
7. Протопопов Е.В. Анализ методов расчета тепловых потерь кислородного конвертера для оптимизации технологии плавки / Е.В. Протопопов И.П. Герасименко, С.А. Филиппенко // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – №7. – С. 89-93.

Навчальне видання

Величко Олександр Григорович
Бойченко Борис Михайлович
Синегін Євген Володимирович
Молчанов Лавр Сергійович
Журавльова Світлана Валеріївна

КОНВЕРТЕРНЕ ВИРОБНИЦТВО СТАЛІ В ПРИКЛАДАХ І ЗАДАЧАХ

Навчальний посібник

Підписано до друку 27.11.18. Формат 60x84 1/16. Папір друк. Друк плоский.
Облік.-вид. арк. 5,76. Умов. друк. арк. 5,58. Тираж 100 пр. Замовлення № 286.

Національна металургійна академія України
49600, м. Дніпро-5, пр. Гагаріна, 4

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ