


**ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»**

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ МЕТАЛУРГІЇ:**

**методичні вказівки до виконання практичних,  
лабораторних робіт та індивідуальних завдань**

Запоріжжя 2024



УДК 669(072)  
Т30

Рекомендовано Науково-методичною радою  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
(протокол № 3 від «22» листопада 2024 р.)

**Укладачі:**

Нізяєв К.Г., д-р техн. наук, професор,  
Стоянов О.М., канд. техн. наук., доцент

Т30 Теоретичні основи процесів металургії: методичні вказівки до виконання практичних, лабораторних робіт та індивідуальних завдань / уклад.: К.Г. Нізяєв, О.М. Стоянов. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024. 46 с.

Викладено методичні вказівки до дисципліни «Теоретичні основи процесів металургії» наведено методичні вказівки для виконання практичних завдань. Призначені для студентів спеціальності 136 – металургія (бакалаврський рівень).

УДК 669(072)



## ЗМІСТ

Вступ	4
Практична робота №1. Розрахунки фізико-хімічних характеристик металургійних розплавів	5
Практична робота №2. Розрахунок теплотворної здатності суміші газів	22
Практична робота №3. Видалення домішок у шлакову фазу	25
Лабораторна робота №1. Встановлення поверхневого натягу заліза	31
Лабораторна робота №2. Встановлення поверхневого натягу шлаку	35
Лабораторна робота №3. Моделювання розподілу елементів в сталеплавильних процесах	38
Індивідуальне завдання №1. Виконання аналітичних досліджень з питань фізико-хімічних характеристик металургійних процесів та будови та властивостей металургійних розплавів	42
Індивідуальне завдання №2. Виконання аналітичних досліджень з питань газодинаміки доменної плавки та процесів відновлення заліза	44
Перелік посилань	46



## ВСТУП

Теоретичні основи процесів металургії – основний спеціальний курс металургійного спрямування, який дозволить отримати знання в області теорії металургійних процесів, теоретичним підґрунтям аерогідродинамічних, фізико-хімічних та тепломасообмінних процесів, які протікають при виплавці чавуну і сталі. Особливістю курсу є комплексний підхід, який дозволяє отримати професійні компетенції в аглодоменому та сталеплавильному виробництві.

Дисципліна є фундаментальною, прикметою курсу є отримання нових поглядів на визначення подальшого розвитку теоретичних уявлень щодо структури металургійних розплавів, а також ознайомлення з тенденціями формування теорій окислювально-відновлювальних процесів.

Набуті знання і розуміння засад фундаментальних та інженерних наук, що лежать в основі курсу, дозволять виконати дослідження в рамках виконання випускної кваліфікаційної роботи бакалавра.


### **Правила виконання практичних робіт**

1. Практичні, лабораторні та індивідуальні роботи виконуються згідно із затвердженим семестровим графіком, який викладається в Moodle.
2. Звіт про виконання роботи в обов'язковому порядку завантажується в систему Moodle в розділі відповідного курсу.
3. При захисті роботи студент зобов'язаний знати основні теоретичні положення за даною роботою.

### **Загальні вказівки щодо оформлення звіту та критерії оцінювання**

Звіт повинен містити найменування та мету даної роботи, виконані розрахунки, за потреби висновки і практичні рекомендації.

Завдання здобувачами виконуються за допомогою обчислювальної техніки, опціонально у програмах Microsoft Excel, MathCAD та інших, що дозволяють виконувати розрахунки та здійснювати побудову графіків залежності. Результатом виконання робіт є оформлений за вимогами та зданий звіт.



## Практична робота №1

### Розрахунки фізико-хімічних характеристик металургійних розплавів

#### Теоретична частина

##### 1. Розчинення твердих речовин у рідкій фазі

У практиці сталеплавильного виробництва трапляється розчинення скрапу, графіту, феросплавів у металі, вапна й інших шлакоутворюючих матеріалів у шлаку тощо, від інтенсивності протікання яких залежать хід і результати процесу плавки [3].

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

$$Q_m = \frac{D}{\delta} (C_{нас} - C_o) S, \text{ кг/с}, \quad (1.1)$$

де  $C_o$  – початкова масова концентрація домішки в розчині,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $S$  – площа поверхні тіла, що розчиняється,  $\text{м}^2$  [3].

*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

$$Q_m = \beta (C_{нас} - C_o) S, \text{ кг/с}, \quad (1.2)$$

де  $\beta = \frac{D}{\delta}$  – коефіцієнт масопередачі,  $\text{м/с}$  [3].

*Коефіцієнт масопередачі* характеризує масу речовини ( $\text{кг}$ ), яка передається дифузією від поверхні розділу фаз площею  $1 \text{ м}^2$  у навколишнє середовище або навпаки за час  $1 \text{ с}$  за різниці масових концентрацій між поверхнею розділу фаз та у навколишньому середовищі в  $1 \text{ кг/м}^3$ . З визначення цього терміну випливає його розмірність [3]

$$\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (1.3)$$

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 [3].

Рівняння (1.2) може бути застосоване для описання процесу розчинення окису кальцію вапна в шлаку

$$\frac{d(\text{CaO})}{d\tau} = \frac{Q_{m.\text{CaO}}}{V_{\text{шл}}} = \beta[(\text{CaO})_{\text{нас}} - (\text{CaO})] \cdot \frac{S_{\text{вап}}}{V_{\text{шл}}}, \%/\text{с}, \quad (1.4)$$

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

Розчинення твердих речовин може бути інтенсифіковане за рахунок їх подрібнення, а 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 [3]

$$\frac{S_q}{V_q} = \frac{\pi d_q^2}{\frac{\pi d_q^3}{6}} = \frac{6}{d_q} = \frac{3}{r_q}, \text{ 1/м.} \quad (1.5)$$

Тоді сумарна площа поверхні всіх часток

$$\sum S_q = S_q \cdot n_q = \frac{6V_q n_q}{d_q} = \frac{6\sum V_q}{d_q} = \frac{6\sum m_q}{d_q \rho_q}, \text{ 1/м.} \quad (1.6)$$

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

$$\frac{\pi d_{\text{вел}}^3}{6} \cdot \rho_q = n_q \cdot \frac{\pi d_{\text{мал}}^3}{6} \cdot \rho_q, \text{ 1/м,} \quad (1.7)$$

звідки

$$d_{\text{мал}} = \frac{d_{\text{вел}}}{\sqrt[3]{n_q}}, \text{ м.} \quad (1.8)$$

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

$$\frac{d_{\text{мал}}}{d_{\text{вел}}} = \sqrt[3]{n_{\text{ч}}} . \quad (1.9)$$

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*) [3]:

$$-\frac{dm}{d\tau} = -\frac{dr}{d\tau} S C_{\text{мв}} = \beta S (C_{\text{нас}} - C_o), \text{ кг/с.} \quad (1.10)$$

Лінійна швидкість розчинення

$$-\frac{dr}{d\tau} = \frac{\beta(C_{\text{нас}} - C_o)}{C_{\text{мв}}}, \text{ м/с.} \quad (1.11)$$

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

$$C = \frac{[\%C] \rho_{\text{розч}}}{100}, \text{ кг/м}^3. \quad (1.12)$$

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

$$-\frac{dr}{d\tau} = \frac{\beta([\%C]_{\text{нас}} - [\%C]_o) \rho_{\text{рід}}}{[\%C]_{\text{мв}} \rho_{\text{мв}}}, \text{ м/с.} \quad (1.13)$$

де  $[\%C]_{\text{нас}}$ ,  $[\%C]_o$ ,  $[\%C]_{\text{мв}}$  – 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/м<sup>3</sup>.

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

$$-\frac{dr}{d\tau} = \frac{\beta(C_{нас} - C_o)}{\rho_{тв}} = \frac{\beta([\%C]_{нас} - [\%C]_o)\rho_{рід}}{100\rho_{тв}}, \text{ м/с.} \quad (1.14)$$

Наведені рівняння, на жаль, недостатньо точні, оскільки не враховують масу компонента С у розчиненій частині твердого тіла, тобто необхідно враховувати повний баланс маси. Це вкрай важливо при аналізі кінетики розчинення вапна в шлаку, коли масова концентрація окису 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 [%С], має вигляд [3]

$$-\frac{dr}{d\tau} = \frac{\beta(C_{нас} - C_o)}{C_{тв} - \frac{\rho_{тв}}{\rho_{рід}} \cdot C_o} = \frac{\beta([\%C]_{нас} - [\%C]_o)\rho_{рід}}{([\%C]_{тв} - [\%C]_o)\rho_{тв}}, \text{ м/с.} \quad (1.15)$$

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

$$\tau = \frac{(r_{н.ч} - r_{к.ч})([\%C]_{тв} - [\%C]_o)\rho_{тв}}{\beta([\%C]_{нас} - [\%C]_o)\rho_{рід}}, \text{ с.} \quad (1.16)$$

На основі рівняння (1.16) можна розраховувати час повного розчинення кускових і порошкоподібних матеріалів у металі й шлаках (для  $r_{к.ч} = 0$ ) [3].

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 [%С]<sub>нас</sub>, величина якої залежить від температури

$$[\%C]_{нас} = 1,34 + 2,54 \cdot 10^{-3} t, \text{ \%}. \quad (1.17)$$

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:

$$-\frac{dm}{d\tau} = \frac{\beta_C([\%C]_{нас} - [\%C]_o)\rho_{cm}S}{100}, \text{ кг/с}, \quad (1.18)$$

$$-\frac{dr}{d\tau} = -\frac{1}{S} \cdot \frac{dV}{d\tau} = -\frac{dm}{d\tau} \frac{1}{\rho_{\text{вуг}}S} = \frac{\beta_C([\%C]_{нас} - [\%C]_o)\rho_{cm}}{100\rho_{\text{вуг}}}, \text{ м/с}, \quad (1.19)$$

$\rho_{\text{вуг}} = 1700$  – густина матеріалу, що містить вуглець, кг/м<sup>3</sup> [3].

## 2. Теплоємність розплавів. Тепловий ефект хімічних реакцій

*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/(м<sup>3</sup>·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 дослідях зазвичай знаходять середню величину теплоємності в даному інтервалі температур. Припустімо, що для нагрівання 1 моль речовини від  $T_1$  до  $T_2$  знадобилась теплота  $Q$  [3]. Тоді середня теплоємність

$$\bar{c} = \frac{Q}{T_2 - T_1}, \text{ Дж/(моль·К)}. \quad (2.1)$$

Істинна теплоємність є границею величини середньої теплоємності, коли різниця температур наближається до нескінченно малої величини  $\Delta T$ :

$$c_{icm} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{Q}{\Delta T} = \frac{dQ}{dT}, \text{ Дж/(моль·К)}. \quad (2.2)$$

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:

$$c_{icm} = a_0 + a_1T + a_2T^2 + \dots + a_nT^n, \text{ Дж/(моль·К)}, \quad (2.3)$$

де  $a_0, a_1, a_2$  – коефіцієнти, які визначаються експериментальним шляхом [3].

Для розрахунків зазвичай досить 2-1 членів цього поліному. У випадку підвищення температури від  $T_1$  до  $T_2$  кількість тепла, що поглинається визначається за формулою

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} c_{icm} dT, \text{ Дж/моль.} \quad (2.4)$$

Підставляючи формулу (2.3) теплоємності у формулу (2.4), отримуємо

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} (a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n) dT, \text{ Дж/моль.} \quad (2.5)$$

Такий самий результат можна одержати з виразу (2.1) для середньої теплоємності:

$$Q = \bar{c}(T_2 - T_1), \text{ Дж/моль.} \quad (2.6)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (2.5) та (2.6) отримаємо

$$\bar{c}(T_2 - T_1) = \int_{T_1}^{T_2} (a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n) dT, \text{ Дж/моль,} \quad (2.7)$$

або

$$\begin{aligned} \bar{c}(T_2 - T_1) = & a_0(T_2 - T_1) + a_1 \frac{T_2^2 - T_1^2}{2} + \\ & + a_2 \frac{T_2^3 - T_1^3}{3} + \dots + a_n \frac{T_2^{n+1} - T_1^{n+1}}{n+1}, \text{ Дж/моль,} \end{aligned} \quad (2.8)$$

звідки

$$\begin{aligned} \bar{c} = & a_0 + a_1 \frac{T_2 + T_1}{2} + a_2 \frac{T_2^2 + T_2 T_1 + T_1^2}{3} + \\ & + \dots + a_n \frac{T_2^n + T_2^{n-1} T_1 + \dots + T_2 T_1^{n-1} + T_1^n}{n+1}, \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К),} \end{aligned} \quad (2.9)$$

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  $T$  [3]:

$$c_{icm} = \frac{d}{dT}(\bar{c} \cdot T), \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}. \quad (2.10)$$

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):

$$c_{сум} = \sum n_i c_i, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad (2.11)$$

де  $n_i$  – частка  $i$ -ого компонента, що входить у дану речовину<sup>1</sup>;  
 $c_i$  – 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 [3]. При нагріванні одиниці маси речовини (кг, моль тощо) від  $T_1$  до  $T_2$  за сталого тиску ( $P = \text{const}$ )

$$Q_p = \bar{c}_p(T_2 - T_1) = \bar{c}_p T_2 - \bar{c}_p T_1, \text{ Дж/кг}. \quad (2.12)$$

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

$$Q_p = (U_k - U_n) + P(V_k - V_n) = (U_k + PV_k) - (U_n + PV_n), \text{ Дж/кг}. \quad (2.13)$$

Позначимо,  $U_k + PV_k = H_k$  і  $U_n + PV_n = H_n$  тоді

$$Q_p = H_k - H_n, \text{ Дж/кг}, \quad (2.14)$$

Функція  $H = U + PV$ , що залежить тільки від стану системи, називається **ентальпією** або **тепловмістом**. Таким чином, якщо відомо ентальпію речовини за даних умов, то відпадає 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 рівної нулю. Величину  $H$  за температури  $t$ , °C беруть

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

відповідно до теплових закономірностей даного тіла відносно цього нульового стану [3].

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

$$H_{\text{сум}} = 0,01 \sum_{i=1}^k n_i H_i = 0,01(n_1 H_1 + n_2 H_2 + \dots + n_k H_k), \text{ Дж/кг}, \quad (2.15)$$

де  $n_i$  – об'ємна частка  $i$ -ого газу в суміші, %;  
 $H_i$  – ентальпія  $i$ -ого газу, Дж/кг.

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 [3].

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:

$$\bar{Q}_P = \bar{Q}_V - P\Delta V, \text{ Дж}. \quad (2.16)$$

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

$$P\Delta V = \Delta \nu RT, \text{ Дж}. \quad (2.17)$$

Тоді

$$\bar{Q}_P = \bar{Q}_V - \Delta \nu RT, \text{ Дж}. \quad (2.18)$$

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 наслідків, 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 [3]. 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 вихідних речовин  $\bar{Q}_{o,reak}$  з урахуванням стехіометричних коефіцієнтів  $n_i$  речовин у реакції

$$\bar{Q}_{reak} = \sum n_i \bar{Q}_{o,np} - \sum n_i \bar{Q}_{o,reak}, \text{ Дж/моль}, \quad (2.19)$$

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

$$\bar{Q}_{reak} = \sum n_i \bar{Q}_{зг,reak} - \sum n_i \bar{Q}_{зг,np}, \text{ Дж/моль}. \quad (2.20)$$

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 згоряння органічних сполук за стандартних умов [3].

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) теплоємностей початкових і кінцевих речовин [3]:

$$\frac{d\bar{Q}_V}{dT} = \sum c_{V,reak} - \sum c_{V,np}, \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}, \quad (2.21)$$

$$\frac{d\bar{Q}_P}{dT} = \sum c_{P,reak} - \sum c_{P,np}, \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}, \quad (2.22)$$

При складанні теплоємності речовин, що знаходяться у лівій частині рівняння 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 (2.3), після інтегрування одержимо

$$\begin{aligned} \bar{Q}_T = \bar{Q}_{298}^o - \left[ \Delta a_o (T - 298) + \frac{\Delta a_1}{2} (T^2 - 298^2) + \right. \\ \left. + \frac{\Delta a_2}{3} (T^3 - 298^3) + \dots + \frac{\Delta a_n}{n+1} (T^{n+1} - 298^{n+1}) \right], \text{ Дж/моль,} \end{aligned} \quad (2.23)$$

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 (2.3));

$\bar{Q}_{298}^o$  – тепловий ефект реакції за температури 25 °С, Дж/моль [3].

Якщо температурна залежність теплоємностей виражається многочленом

$$c_{icm} = a_o + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^{-2}, \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}, \quad (2.24)$$

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

$$\begin{aligned} \bar{Q}_T = \bar{Q}_{298}^o - \left[ \Delta a_o (T - 298) + \frac{\Delta a_1}{2} (T^2 - 298^2) - \right. \\ \left. + \frac{\Delta a_2}{3} (T^3 - 298^3) - \Delta a_3 \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) \right], \text{ Дж/моль.} \end{aligned} \quad (2.25)$$

На практиці розрахунків виробничих процесів часто використовують метод визначення теплового ефекту за табличним значенням ентальпій реагуючих речовин та теплового ефекту реакції за стандартних умов<sup>2</sup>. Різниця ентальпій між продуктами й вихідними речовинами реакцій при заданій температурі  $T$  визначається з умови  $\Delta H = -\Delta \bar{Q}$ , тобто

$$\bar{Q}_{298} - \bar{Q}_T = \sum H_{np} - \sum H_{реаг}, \text{ Дж,} \quad (2.26)$$

звідки

$$\bar{Q}_T = \bar{Q}_{298} - \sum H_{np} + \sum H_{реаг}, \text{ Дж.} \quad (2.27)$$

Визначення кількості охолоджувачів у конвертерній плавці можливо шляхом спільного вирішення рівнянь матеріального і теплового балансу.

<sup>2</sup> Стан системи за температури 25 °С тиску 1 атм.

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 чавуну<sup>3</sup>:

$$Q_{\text{чав}}^{\text{фіз}} = M_{\text{чав}} \Delta H_{\text{чав}}^{\Sigma}, \text{ ккал}, \quad (2.28)$$

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

Повна зміна тепловмісту рідкого чавуну

$$\Delta H_{\text{чав}}^{\Sigma} = q_{\text{чав}} + \int_0^{t_{\text{пл}}} c_{\text{чав}}^{m\epsilon} dt + c_{\text{чав}}^{pi\delta} (t_{\text{чав}} - t_{\text{пл}}), \text{ ккал/кг}, \quad (2.29)$$

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

$c_{\text{чав}}^{m\epsilon}$ ,  $c_{\text{чав}}^{pi\delta}$  – теплоємність відповідно твердого і рідкого чавуну (див. додаток Г), ккал/(кг·°C);

$t_{\text{чав}}$  – температура чавуну, °C;

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

Підставивши довідкові величини в формулу (2.29), одержимо

$$\Delta H_{\text{чав}}^{\Sigma} = 52 + \int_0^{t_{\text{пл}}} (0,155 + 2 \cdot 10^5 t) dt + 0,22(t_{\text{чав}} - 1175), \text{ ккал/кг}, \quad (2.30)$$

або

$$\Delta H_{\text{чав}}^{\Sigma} = 32,8 + 0,22t_{\text{чав}}, \text{ ккал/кг}. \quad (2.31)$$

Підставивши (2.31) у (2.28) отримуємо

$$Q_{\text{чав}}^{\text{фіз}} = M_{\text{чав}} (32,8 + 0,22t_{\text{чав}}), \text{ ккал}. \quad (2.32)$$

Теплота реакцій окислення елементів металошихти киснем дуття:

$$Q_{\text{чав}}^{\text{хім}} = \sum \Delta[\%E] \Delta H_E, \text{ ккал}, \quad (2.33)$$

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

<sup>3</sup> Тут і далі розрахунки на 100 кг металошихти

$\Delta H_E$  – тепловий ефект реакції окислення елемента (додаток Г), ккал/кг.

Хімічна теплота утворення оксидів заліза шлаку

$$Q_{\Sigma(FeO)}^{умг} = \left[ \frac{1220}{100} (\% Fe_2O_3) + \frac{900}{100} (\% FeO) \right] M_{шл}, \text{ ккал}, \quad (2.34)$$

де 3220 і 900 – теплові ефекти дисоціації відповідних оксидів заліза, ккал/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 (2.28) та (2.32)) і може бути розрахована за формулою:

$$Q_M = M_M (33,3 + 0,2t_m), \text{ ккал}. \quad (2.35)$$

Охолоджуючий ефект твердих окисників, наприклад агломерату:

$$Q_{агл} = c_{агл} t_{агл}^{пл} + q_{агл} + \frac{1220}{100} \langle \% Fe_2O_3 \rangle_{агл} + \frac{900}{100} \langle \% FeO \rangle_{агл}, \text{ ккал/кг}, \quad (2.36)$$

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

$t_{агл}^{пл}$  – температура плавлення агломерату 3000 °С;

$q_{агл}$  – теплота плавлення агломерату 250 ккал/кг.

При вмісті в агломераті 66 %  $Fe_2O_3$  та 35 %  $FeO$  його охолоджуючий ефект складає

$$Q_{агл} = 0,29 \cdot 3000 + 250 + \frac{3220}{100} \cdot 66 + \frac{900}{100} \cdot 35 = 3280 \text{ ккал/кг}.$$

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 зміненні решти статей теплового балансу: окислюванні 3% елементів і зміні температури чавуну:

$$\Delta t_{ван} = \frac{0,85 Q_{надх}}{M_{м} c_{м} + M_{шл} c_{шл}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.37)$$

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

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

### Практична частина [3]

#### Задачі

1) За коефіцієнтами з таблиці Г.2 визначити теплоту, що поглинає двоокис вуглецю при нагріванні 300 м<sup>3</sup> від 35 до 3000 °С за сталого об'єму.

2) Визначити теплоту, що вносить 0,5 кг міксерного шлаку температурою 3280 °С, якщо

$$c = 0,175 + 6 \cdot 10^{-5} t, \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

3) Розрахувати істину питому й об'ємну теплоємності моно оксиду 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 3000 °С використовуючи коефіцієнти з таблиці Г.2.

5) Розрахувати середню питому теплоємність заліза в інтервалі температур від 300 до 200 °С, якщо істина теплоємність у межах температур від 0 до 600 °С виражається рівнянням

$$c_{іст} = 0,2633 + 2,32 \cdot 30^{-2} t - 6,87 \cdot 30^{-7} t^2, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

6) Визначити середню питому теплоємність окису кальцію в інтервалі температур від 3200 до 3300 °С, якщо

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

7) Визначити питому теплоємність залісної руди наступного хімічного складу, мас. %:  $Fe_2O_3$  – 32,3;  $H_2O$  – 7,5; порожня порода – 58,2. Теплоємність, кДж/(кг·°С):  $Fe_2O_3$  – 0,63;  $H_2O$  – 2,2; порожня порода ( $SiO_2$ ) – 3,37. Відповідь надати у одиницях системі SI.

8) Міксерний шлак має приблизно наступний склад, мас. %:  $CaO$  – 25;  $SiO_2$  – 20;  $Al_2O_3$  – 35. 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 3360 °С:

$$\bar{c} = 0,694 + 8,95 \cdot 10^{-4} t - 1,18 \cdot 10^{-6} t^2, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Температурні залежності середніх теплоємностей компонентів міксерного шлаку виражаються рівняннями:

– для  $CaO$  в інтервалі 0...800 °С

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

– для  $SiO_2$  в інтервалі 0...575 °С

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

– для  $A/2O_3$  в інтервалі  $0 \dots 500 \text{ } ^\circ\text{C}$

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

**9)** Основний конвертерний шлак має склад, мас. %:  $CaO - 27$ ;  $FeO - 32$ ;  $MnO - 35$ ;  $SiO_2 - 22$ . Обчислити середню питому теплоємність цього шлаку в інтервалі температур від  $0$  до  $3000 \text{ } ^\circ\text{C}$  за правилом адитивності й порівняти з величиною, обчисленою з урахуванням температурної залежності середньої теплоємності в інтервалі температур від нуля до температури плавлення:

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

Температурні залежності середніх теплоємностей компонентів основного конвертерного шлаку:

– для  $CaO$  в інтервалі  $0 \dots 800 \text{ } ^\circ\text{C}$

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

– для  $SiO_2$  в інтервалі  $0 \dots 3300 \text{ } ^\circ\text{C}$

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

– для  $FeO$  в інтервалі  $800 \dots 3500 \text{ } ^\circ\text{C}$

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

– для  $MnO$  в інтервалі  $800 \dots 3500 \text{ } ^\circ\text{C}$

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

**10)** Визначити середню об'ємну теплоємність газу за температури  $300 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Хімічний склад і об'ємні теплоємності компонентів газу за цієї ж температури наведені у таблиці нижче.

Компонент	$H_2$	$CO$	$CO_2$	$O_2$	$CH_4$	$N_2$	$C_2H_2$
Вміст, об. %	56,7	6,0	3,0	0,8	26,0	5,0	2,5
$c_p$ , Дж/(м <sup>3</sup> ·°C)	3,299	3,286	3,753	3,920	3,630	3,282	2,200

**11)** Розрахувати ентальпію  $300 \text{ кг}$  рідкого заліза за  $3600 \text{ } ^\circ\text{C}$ , якщо його теплота плавлення  $272,3 \text{ кДж}/\text{кг}$ , питома теплоємність рідкого заліза  $0,8372 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ , температуру плавлення заліза прийняти  $3539 \text{ } ^\circ\text{C}$ , істинна питома теплоємність твердого заліза,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ , в інтервалі температури від  $0$  до  $3539 \text{ } ^\circ\text{C}$  розраховується за формулою

$$\bar{c}_{m\phi} = 0,712 t_{m\phi} + 272,1 + 0,837(t - t_{m\phi}), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

**12)** Розрахувати ентальпію  $3 \text{ т}$  металургійного шлаку за температури  $3500 \text{ } ^\circ\text{C}$ , якщо його теплота плавлення  $390 \text{ кДж}/\text{кг}$ , питома теплоємність рідкого шлаку  $3,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ , температура плавлення металургійного шлаку  $3200 \text{ } ^\circ\text{C}$ , істинна питома теплоємність твердого металургійного шлаку в інтервалі від  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  до температури плавлення розраховується за формулою

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

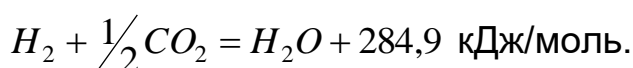
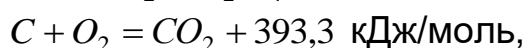
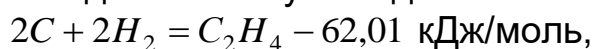
**13)** Використовуючи величини ентальпії газів з додатку Г.3 розрахувати кількість теплоти за нормального тиску, що необхідна для нагрівання від 300 до 700 °С 300 кмоль газової суміші складу, об. %: CO – 20, CO<sub>2</sub> – 80.

**14)** Використовуючи довідкові дані ентальпії газів розрахувати кількість теплоти, що необхідна для нагрівання від 500 до 800 °С за нормального тиску 300 кмоль газової суміші складу, об. %: H<sub>2</sub> – 52; CO<sub>2</sub> – 30; N<sub>2</sub> – 35; CO – 3.

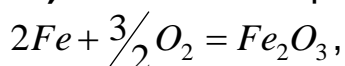
**15)** Визначити трьома методами теплоту згоряння етилену за реакцією



виходячи з наступних даних:



**16)** Тепловий ефект реакції



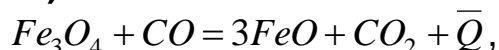
за температури 38 °С та сталого тиску дорівнює 823,3 кДж/моль. Визначити для цієї реакції тепловий ефект за сталого об'єму та тієї ж температури.

**17)** Визначити тепловий ефект реакції розкладання карбонату кальцію



якщо теплоти утворення **CaO**, **CO<sub>2</sub>** й **CaCO<sub>3</sub>** з простих речовин дорівнює відповідно 636,9; 392; 3208,6 кДж/моль.

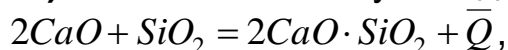
**18)** Визначити тепловий ефект реакції




якщо теплоти утворення **FeO** й **Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** дорівнюють відповідно 263,7 та 3337,7 кДж/моль, теплота згоряння **CO** 283,2 кДж/моль. Розрахувати тепловий ефект цієї ж реакції, використовуючи величини зміни стандартної ентальпії реагентів, які для **Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>**, **CO**, **FeO**, **CO<sub>2</sub>** за температури 25 °С дорівнюють відповідно –268,8; –26,2; –63,5; –92,05 ккал/моль.

**19)** Тепловий ефект реакції окислення вуглецю киснем газової фази із утворенням **CO** за температури 20 °С та сталого об'єму дорівнює 308,9 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  $-36,23$ ;  $-29,99$ ;  $7,23$  кДж/моль.

**21)** Тепловий ефект допалення  $\text{CO}$  до  $\text{CO}_2$  за температури  $25^\circ\text{C}$  дорівнює  $283$  кДж/моль. Визначити тепловий ефект за температури  $2000^\circ\text{C}$ .

**22)** Приймаючи, що після заливки чавуну з температурою  $3200^\circ\text{C}$  скрап температурою  $25^\circ\text{C}$  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 доля вуглецю в чавуні і скрапі складають відповідно  $2$  і  $0,2\%$ ?

**24)** Яку додаткову кількість скрапу можна переробити за рахунок підвищення температури рідкого чавуну на  $50^\circ\text{C}$ ?

**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 окислюється до  $\text{CO}_2$  збільшується з  $30$  до  $20\%$ ?

**27)** На скільки можна збільшити частку скрапу в металошихті, якщо його підігріти з  $20$  до  $800^\circ\text{C}$ ?

**28)** На скільки відрізняються тепловміст  $3$  кг чавуну й сталі за температур відповідно  $3300$  й  $3600^\circ\text{C}$ ?

**29)** Визначити число часточок, що утворяться при подрібненні  $10$  см<sup>3</sup> графіту на правильні кубики з довжиною ребра  $5 \cdot 10^{-3}$  см.

**30)** 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?

**31)** У скільки разів збільшиться швидкість розчинення в шлаку шматка вапна діаметром  $80$  мм при зменшенні його діаметра відповідно у  $2$ ;  $10$ ;  $100$ ;  $1000$  разів?

**32)** 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.

**33)** 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?

**34)** Розрахувати час повного розчинення часточки графіту діаметром  $0,1$  мм у сталі з вмістом вуглецю  $1\%$  при температурі  $1440^\circ\text{C}$ , якщо коефіцієнт масопередачі становить  $0,05$  см/с, а вміст вуглецю в графіті  $95\%$ .

**35)** Для умов попередньої задачі визначити час повного розчинення шматка графіту діаметром  $100$  мм.

**36)** Розрахувати час повного розчинення часточки вапна діаметром 0,1 мм у шлаку із вмістом окису кальцію 35%, якщо коефіцієнт масопередачі становить 0,003 см/с, концентрація насичення шлаку окисом кальцію 59%, середня густина шлаку 3,5 г/см<sup>3</sup>, а вміст окису кальцію у вапні 90%.

Таблиця 1.1 - Варіанти завдань

№п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Задача №	1,10, 30	2,11, 31	3,12, 32	4,13, 33	5,14, 34	6,15, 35	7,16, 36	8,17, 30	9,18, 29
№п/п	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Задача №	10, 19,28	11, 20,27	12,21 ,26	13,22 ,25	14,23 ,24	1,15, 25	6,16, 35	7,17, 34	10,14 , 33
№п/п	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Задача №	2,19, 25	3,20, 26	4,21, 27	5,22, 28	6,11, 29	7,14, 30	8,15, 31	9,16, 32	10,17 ,35



## Практична робота №2 Розрахунок теплотворної здатності суміші газів

### Теоретична частина

Суміш яка складається з газу 1 та газу 2 спалюється у мартенівській печі. Розрахувати частку кожного газу у суміші.

Теплота згоряння 1м<sup>3</sup> газоподібного палива може бути розрахована по формулі:

$$Q_H^p = 126,4 \cdot CO + 108,2 \cdot H_2 + 358,5 \cdot CH_4 + 234,5 \cdot H_2S + 592 \cdot C_2H_4 + 638,5 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 1404 \cdot C_6H_6, \text{ кДж/м}^3 \quad (2.1)$$

де 126.4, 108.2, 358.5 й т.д. – теплота згоряння відповідно CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> й т.д., CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> і т.д. – об'ємний процентний вміст газів у паливі.

Сумарна теплотворна здатність суміші газів складає:

$$q = q_1 \cdot v_1 + q_2 \cdot v_2, \text{ кДж/м}^3 \quad (2.2)$$

де  $q_1, q_2$  – теплотворна здатність 1 та 2 газу, кДж/м<sup>3</sup>,  $v_1, v_2$  – частка газу 1 та 2, частка од.

Після ряду перетворень рівняння (2) приймає вигляд :

$$v_1 = \frac{q - q_2}{q_1 - q_2}, \quad (2.3)$$

Оскільки  $v_1 + v_2 = 1$  то частка другого газу буде складати  $v_2 = 1 - v_1$ .

### Порядок виконання роботи

1. Розрахувати теплотворну здатність кожного з компонентів газоподібного палива.

2. Знайти частку кожного з газів що необхідно додати для отримання заданої теплотворної здатності палива.

Таблиця 2.1 - Вихідні данні для розрахунків

№ варіанту	Газ 1	Газ 2	Теплотворна здатність суміші, кДж/м <sup>3</sup>
1	Донецький антрацит	Калуш	7500
2	Богословське вугілля	Дашава	8000
3	Газове донецьке вугілля	Косов	8500

4	Северодонецьке вугілля	Опари	9000
5	Черемховське вугілля	Мелітопільське	9500
6	Челябінське вугілля	Ельшанське	10000
7	Підмосковне вугілля	Ставропіль північне поле	10500
8	Коксовий дріб'язок	Ставропіль південне поле	11000
9	Торф машинноформувачний	Мельнікове західне поле	11500
10	Гідроторф	Мельнікове східне поле	12000
11	Деревина (тріска)	Калуш	12500
12	Донецький антрацит	Опари	13000
13	Газове донецьке вугілля	Ельшанське	13500
14	Черемховське вугілля	Ставропіль південне поле	14000
15	Підмосковне вугілля	Мельнікове східне поле	14500
16	Торф машинноформувачний	Дашава	15000
17	Богословське вугілля	Косов	15500
18	Северодонецьке вугілля	Мелітопільське	16000
19	Челябінське вугілля	Ставропіль північне поле	16500
20	Коксовий дріб'язок	Мельнікове західне поле	17000
21	Гідроторф	Опари	17500
22	Деревина (тріска)	Мелітопільське	18000
23	Донецький антрацит	Ельшанське	18500
24	Богословське вугілля	Ставропіль північне поле	19000
25	Газове донецьке вугілля	Ставропіль південне поле	19500

Таблиця 2.2 - Хімічний склад газу 1

Генераторний газ	Хімічний склад газу, %					
	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Донецький антрациту	5,5	27,5	13,5	0,7	52,6	0,2
Богословське вугілля	8,0	24,0	13,6	2,7	51,7	—
Газове донецьке вугілля	5,0	26,5	13,5	2,8	51,9	0,3
Северодонецьке вугілля	7,0	25,0	15,0	3,0	49	1,0
Черемховське вугілля	7,0	25,5	15,5	3,2	48,7	0,1
Челябінське вугілля	5,0	30,0	13,0	2,2	49,4	0,2
Підмосковне вугілля	6,5	25,0	14,0	1,2	50,6	1,2
Коксовий дріб'язок	5,0	28,5	13,0	—	52,4	0,2
Торф машинноформовочний	8,0	28,0	15,0	3,6	45,3	0,1
Гідроторф	8,5	27,5	15,0	3,1	15,8	0,1
Деревина (тріска)	6,5	29,0	14,0	3,6	46,9	—

Таблиця 2.3 - Хімічний склад газу 2

Природний газ	Хімічний склад газу, %				
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Калуш	95,7	—	—	0,1	4,2
Дашава	97,8	0,5	0,35	0,05	1,3
Косов	75,7	21,3	3,0	—	—
Опари	89,0	9,1	—	—	—
Мелитопільське	98,0	—	—	0,2	1,8
Ельшанське	93,2	0,7	1,7	—	4,4
Ставропіл північне поле	97,7	—	—	0,7	1,6
Ставропіл південне поле	60,0	—	—	—	40,0
Мельнікове західне поле	55,0	—	—	0,2	44,8
Мельнікове східне поле	88,0	0,2	—	0,1	11,7

## Практична робота №3 Видалення домішок у шлакову фазу

### Теоретична частина

Ефективність рафінування сталі шлаками в сталеплавильних процесах залежить від кількості взаємодіючого шлаку (% від маси металу) і його здатністю поглинати домішку, що має бути видалена з металу. Останнє характеризується коефіцієнтом розподілу домішок між шлаком і металом [3].

$$L_E = \frac{(\% E)}{[\% E]}. \quad (3.1)$$

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

$$\delta_E = \frac{[\% E]_n - [\% E]_к}{[\% E]_n} \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

На практиці розрахункові формули для визначення можливого ступеня рафінування металу шлаками можуть бути отримані з рівнянь балансу розглянутої домішки в системі метал-шлак [3]. При одношлаковому процесі рівняння має вигляд

$$[\% E]_{\text{шлх}} = [\% E]_к + 0,01M_{\text{шл}}(\% E)_к, \quad (3.3)$$

З урахуванням формули (3.1) з балансового рівняння (3.3) можна виразити формулу для визначення кінцевого вмісту домішки в металі

$$[\% E]_к = \frac{[\% E]_{\text{шлх}} - [\% E]_{\text{сп}} \pm [\% E]_г}{1 + 0,01M_{\text{шл}}L_E}, \quad (3.4)$$

де  $[\% E]_{\text{шлх}}$ ,  $[\% E]_{\text{сп}}$ ,  $[\% E]_г$  – 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

$$[\% E]_к = \frac{[\% E]_{шлх}}{(1 + 0,01M_{шл.о}L_E)^{n_{cn} + 1}}, \%, \quad (3.5)$$

де  $M_{шл.о}$  – одноразова порція шлаку, %;  
 $n_{cn}$  – кількість операцій спуску й наступного наведення шлаку [3].

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

$$[\% E]_{кін} = \frac{[\% E]_{шлх}}{(1 + 0,01M_{шл.1}L_{E.1})(1 + 0,01M_{шл.2}L_{E.2})}, \%, \quad (3.6)$$

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 [3].

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:

$$K_{шл} = M_{шл}L_E, \text{ т.} \quad (3.7)$$

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:

$$\lg K_p = \lg \frac{a_{(4CaO \cdot P_2O_5)}}{[\% P]^2 a_{(FeO)}^5 a_{(CaO)}^4} = \frac{40067}{T} - 15,06. \quad (3.8)$$

Тоді при рівновазі металу зі шлаком

$$[\% P] = \sqrt{\frac{a_{(4CaO \cdot P_2O_5)}}{K_p a_{(FeO)}^5 a_{(CaO)}^4}}. \quad (3.9)$$

При встановленні 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 футерівки ковша [3].

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

$$\Delta[\%P]_{\text{відн}} = 0,437 \cdot 10^{-4} M_{\text{шл}} (P_2O_5) \omega, \% \quad (3.10)$$

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

Ступінь відновлення фосфору в середньому 5% при розкисненні тільки феромарганцем, при розкисненні спокійної сталі досягає 35% і легованої сталі 75%, якщо не вжити заходів задля уникнення рефосфорації [3].

### Задачі [3]

1) 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%.

2) 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?


3) Визначити, за якого вмісту сірки у вапні, витрата якого становить 5%, ступінь десульфурації наприкінці плавки буде дорівнює 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.

4) У скільки разів збільшиться ступінь десульфурації за одноразового спуску й наведення нового шлаку у кількості 5% у порівнянні із процесом без спуска шлаку за тієї ж його кількості? Коефіцієнт розподілу сірки та її вміст у шихтових матеріалах становлять відповідно 8 і 0,05%.

5) У скільки разів збільшиться ступінь десульфурації за дворазового спуску й наведення нового шлаку у кількості 5% у порівнянні із процесом без спуска шлаку за тієї ж його кількості? Коефіцієнт розподілу сірки та її вміст у шихтових матеріалах становлять відповідно 6 і 0,055%.

6) 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%.

7) Визначити кінцевий вміст сірки в сталі при роботі без спуска 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%.

**8)** Яка кількість шлаку потрібна для зниження удвічі вмісту сірки в сталі при роботі без спуска шлаку, з одно- і дворазовим його спуском і наведенням, якщо вміст сірки в шихті 0,06%. а коефіцієнт розподілу сірки становить 8?

**9)** 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.

**10)** 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 100.

**11)** 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%.

**12)** 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%.

**13)** 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?

**14)** 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.

**15)** 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.

**16)** 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.

**17)** 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 другий стадії становить відповідно 50 і 150.

**18)** Визначити кількість шлаку, якщо при вмісті фосфору в шихті 0,2% вміст  $P_2O_5$  у шлаці складає 3,5%.

**19)** Рафінувальний потенціал кінцевих шлаків конвертерної плавки становить 10000. Визначити вміст фосфору у шихті, якщо вміст фосфору перед розкисленням становить 0,01%.

**20)** При продувці чавуну з вмістом фосфору 0,15% вміст  $P_2O_5$  у шлаці складає 2,5%. Визначити, за якої кількості шлаку ступінь дефосфорації металу шлаком може сягнути 90%.

**21)** 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?

**22)** 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.

**23)** 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  $P_2O_5$  й сірки в ньому відповідно 2,7 й 0,1%?

**24)** 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 значення коефіцієнтів розподілу фосфору 110.

**25)** Використовуючи дані задачі 22, визначити вміст фосфору після проведення кожної стадії рафінування.

**26)** 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.

**27)** 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.

**28)** 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  $P_2O_5$  у шлаці для обох випадків.

**29)** 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.

**30)** 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  $P_2O_5$  в ньому 2%?

**31)** Яка максимальна кількість конвертерного шлаку із вмістом  $P_2O_5$  1,5% може потрапити в сталерозливний ківш при виплавці

середньолегованої сталі без ризику перевищення встановленої межі за вмістом фосфору, якщо вміст фосфору в металі перед розкисненням 0,02%, а в готовій сталі 0,045%?

**32)** На скільки зміниться рівноважний вміст фосфору в металі в результаті підвищення температури кінця процесу з 1600 до 1650 °С? Яким збільшенням активності окису заліза або окису кальцію можна компенсувати цей температурний вплив?

**33)** Причиною зниження рівноважного вмісту фосфору в металі в 1,5 рази виявилася зміна константи рівноваги реакції дефосфорації, активності окису заліза та окису кальцію. Визначити, у скільки разів зміниться кожний з параметрів при зниженні рівноважного вмісту фосфору в металі.


**34)** На скільки зміниться рівноважний вміст фосфору в металі в результаті підвищення температури кінця процесу з 1600 до 1650 °С? Яким збільшенням активності окису заліза або окису кальцію можна компенсувати цей вплив?

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

**36)** 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 окису заліза.

Таблиця 3.1 - Варіанти завдань

№п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Задача №	1,10, 30	2,11, 31	3,12, 32	4,13, 33	5,14, 34	6,15, 35	7,16, 36	8,17, 30	9,18, 29
№п/п	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Задача №	10, 19,28	11, 20,27	12,21 ,26	13,22 ,25	14,23 ,24	1,15, 25	6,16, 35	7,17, 34	10,14 , 33
№п/п	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Задача №	2,19, 25	3,20, 26	4,21, 27	5,22, 28	6,11, 29	7,14, 30	8,15, 31	9,16, 32	10,17 ,35



## Лабораторна робота №1 Встановлення поверхневого натягу заліза

**Мета роботи:** Ознайомитись з методикою визначення поверхневого натягу металу


### Теоретична частина

При виробництві чавуна і сталі поверхневі явища (адгезія, когезія, адсорбція, змочування, коалесценція, коагуляція, пінення, флотація і інш) грають важливу, а іноді і вирішальну роль. Виключно велика роль адсорбційних процесів в механізмі і кінетиці відновлення оксидів, розкладанні різних з'єднань. Рафінування металу при окислювальній плавці також пов'язане з поверхневими явищами. Без урахування поверхневих явищ при виробництві чорних і кольорових металів іноді не можливо знайти правильного розв'язання теоретичних і практичних питань. Процеси відділення металів від іонних розплавів, диспергування і розчинення металів в шлаках, адсорбції на кордоні розділу різних розплавів, просочення кераміки, виборчого поглинання футеровкою компонентів розплаву пов'язані з поверхневими явищами. Відомий вплив міри дисперсності фаз на зміну енергії Гіббса при реакціях.

Поверхневі явища в рідких металевих і неметалічних розплавах, на кордоні розділу розплав тверда фаза і у високодисперсних твердих тілах мають велике значення для багатьох технологічних процесів чорної і кольорової металургії, порошкової металургії, напівпровідникової техніки, технології зварювання, пайки, змашування і інших областей. У фізико-хімічній механіці при вивченні властивостей матеріалів в поверхово-активних, агресивних середовищах поверхневі явища грають ведучу роль.

Поверхнєве натягнення  $\delta$  рідких чистих металів при невеликих перегрівках над точкою плавлення змінюється відповідно до особливостей їх електронної будови. Для металів II і III періодів Періодичної системи елементів Д. І. Менделєєва  $\delta$  зростає із збільшенням атомного номера до середини періодів, а починаючи з В і Si зменшується. Для елементів IV і VI періодів  $\delta$  зростає до 6 групи, а для елементів 7 і 8 груп зменшується. Так, у рідкого натрію значення  $\delta$  при 140°C складає 196 мДж/м<sup>2</sup>, для міді при 1100°C  $\delta \approx 1320-1350$  мДж/м<sup>2</sup>, для алюмінію при 7000 °C  $\delta \approx 825-860$  мДж/м<sup>2</sup>, для хрому при 1800°C  $\delta \approx 1520$  мДж/м<sup>2</sup>, для заліза при 1550 °C  $\delta \approx 1830$  мДж/м<sup>2</sup>.

Методи вимірювання поверхового натягу можуть бути розділені на дві групи. Динамічні методи, засновані на тому, що величина  $\delta$  (Н/м, Дж/м<sup>2</sup>) визначається по параметрах, що характеризують деякий процес, наприклад, довжину капілярних хвиль, що розповсюджуються по поверхні рідини. Статичні методи засновані на тому, що поверхове натягнення визначається по величині, характерній для даного стану.



Міра розвитку того або іншого явища визначається величиною сил, виникаючих на кордоні розділу фаз, витратами енергії, на утворення міжфазної поверхні. Енергія на утворення поверхні розділу конденсованої (твердої, рідкої) і газової фаз називається поверхневою питомою енергією, а на створення поверхні між конденсованими фазами - міжфазною питомою енергією. На практиці обидва ці поняття часто називають поверхневим натягненням.

Величина поверхневого натягу визначає енергетичні витрати того або іншого поверхневого явища. Тому, щоб провести розрахунки поверхневих явищ необхідно знання величин поверхневого натягу в різних варіантах сталеплавильних систем: тверде тіло - газ, тверде тіло - рідина, рідина – газ, рідина - рідина.

Як тверде тіло в сталеплавильних процесах можуть бути футерівка агрегату, тверде вапно, інші тверді матеріали. Як рідина - метал і шлак. Газова фаза може бути окислювальною, відновною і нейтральною. Величина поверхневого натягу в кожному з перерахованих випадків залежить не тільки від типу системи, але і від хімічного складу фаз останньої і температури.

Існують різні методи визначення поверхневого натягу (нерухомої краплі, капілярного підняття, висячої краплі, по вазі крапель та інш.). У даній роботі використовується статистичний метод максимального тиску в газоподібному пухирці, що видувається в метал.

### **Методика**

У тиглі міститься розплав металу. Через вертикально встановлену капілярну трубку з вогнетривкого матеріалу, що має діаметр  $d$  ( $d=5\text{мм}$ ), занурену у розплав на глибину  $h$  ( $h=150\text{мм}$ ), повільно продувається газ, звичайно нейтральний (аргон). За невеликими витратами газу на зрізі трубки утворюється пухир газу, який досявши певного розміру, відривається від зрізу капіляру і спливає у розплаві. Схема дослідницького обладнання вказана на рис.1.

За допомогою водневого манометру визначається максимальний тиск, якій відповідає моменту відриву газового пухиря від кінця капіляру  $p_{\text{max}}$  (Па), а загальний тиск в пухирі газу  $\Delta p_{\text{max}}$ , який формувався на зрізі капіляру розраховується за допомогою рівняння

$$\Delta p_{\text{max}} = p_{\text{max}} - (\rho_p - \rho_r) \cdot h \cdot g \quad (1)$$

де  $\rho_p$  – щільність розплаву ( $\text{кг/м}^3$ );

$\rho_r$  - щільність газу ( $\text{кг/м}^3$ );

$h$  – глибина занурення капіляру (м);

$g$  – прискорення вільного падіння ( $\text{м/с}^2$ ).

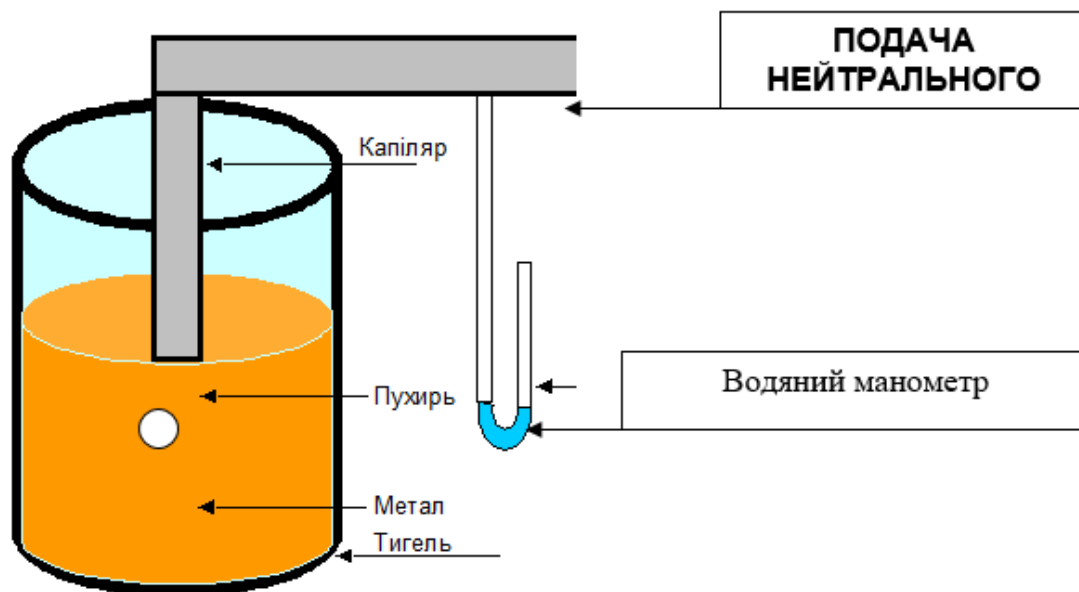


Рисунок 1 - Принципова схема дослідницького обладнання

Визначивши  $\Delta p_{\max}$  розраховують поверхневий натяг ( $\delta$ ) за допомогою рівняння 2.

$$\delta = \Delta p_{\max} \cdot r / 2 \quad (\text{Н/м}) \quad (2)$$

де  $r$  – радіус капіляру (м).

### Хід виконання роботи

За допомогою комп'ютерної програми “Поверхневий натяг заліза” виконати серію експериментів по встановленню поверхневого натягу заліза згідно номеру варіанта (табл.2).

Для цього потрібно на дисплеї ПЕВМ в таблицю “ВМІСТ КИСНЮ В МЕТАЛІ” занести свої значення. Потім виконується команда “ПУСК” і отримуються експериментальні показники манометру  $p_{\max}$  (мм.вод.ст.). Для проведення наступного дослідження необхідно натиснути на кнопку “СБРОС”. Кожен студент згідно свого завдання проводить три серії дослідів для певного вмісту кисню в металі і заносить середнє значення трьох дослідів в таблицю 1. Далі проводиться розрахунок  $\delta$  і заноситься у таблицю 1.

Таблиця 1 - Вплив вмісту кисню у залізі на поверхневий натяг

№	[O],%	$p_{\max}$ , мм.вод.ст.	$\delta$ , дін/см <sup>2</sup>

Побудуйте графік залежності поверхневого натягу від вмісту кисню у металі і порівняйте отримані дані з залежністю, що наводяться



японськими дослідниками

$$\delta = 1610 - 6000 \cdot [O] \quad (3)$$


У звіті з роботи наведіть свої думки з причин відхилень експериментальних точок від залежності (3), а також причин зниження  $\delta$  зі зростанням  $[O]$ .

Звіт з роботи повинен містити:

- схему експериментального обладнання;
- методику виконання роботи;
- таблицю вихідних даних і результатів розрахунків;
- рисунки;
- аналіз результатів.

Таблиця 2 - Варіанти завдань

№ варіанту	Вміст кисню в металі				
1	0,008	0,027	0,1	0,108	0,181
2	0,006	0,027	0,065	0,126	0,153
3	0,008	0,025	0,082	0,133	0,178
4	0,007	0,033	0,097	0,113	0,144
5	0,006	0,032	0,064	0,116	0,151
6	0,006	0,048	0,074	0,135	0,164
7	0,006	0,039	0,072	0,12	0,197
8	0,007	0,025	0,063	0,125	0,149
9	0,008	0,013	0,08	0,123	0,147
10	0,008	0,009	0,095	0,119	0,162
11	0,008	0,047	0,069	0,12	0,199
12	0,006	0,012	0,087	0,132	0,143
13	0,006	0,023	0,053	0,135	0,147
14	0,006	0,009	0,086	0,109	0,191
15	0,008	0,017	0,087	0,119	0,166
16	0,006	0,023	0,093	0,111	0,172
17	0,007	0,027	0,054	0,132	0,152
18	0,008	0,038	0,073	0,102	0,172
19	0,007	0,025	0,057	0,114	0,198
20	0,007	0,029	0,059	0,103	0,161
21	0,007	0,038	0,084	0,112	0,199
22	0,008	0,014	0,091	0,116	0,191
23	0,008	0,044	0,067	0,127	0,194
24	0,007	0,034	0,085	0,135	0,151
25	0,008	0,012	0,089	0,12	0,174



## Лабораторна робота №2 Поверхневий натяг сталеплавильного шлаку

**Мета роботи:** Ознайомитись з методикою визначення поверхневого натягу сталеплавильного шлаку”

### Методика

У тиглі міститься сталеплавильний шлак. Через вертикально встановлену капілярну трубку з вогнетривкого матеріалу, що має діаметр  $d$  ( $d=5\text{мм}$ ), занурену у розплав на глибину  $h$  ( $h=150\text{мм}$ ), повільно продувається газ, звичайно нейтральний (аргон). За невеликими витратами газу на зрізі трубки утворюється пухир газу, який досягши певного розміру, відривається від зрізу капіляру і спливає у шлаці. Схема дослідницького обладнання вказана на рис.1.

За допомогою водневого манометру визначається максимальний тиск, який відповідає моменту відриву газового пухиря від кінця капіляру  $p_{\text{max}}$  (Па), а загальний тиск в пухирі газу  $\Delta p_{\text{max}}$ , який формувався на зрізі капіляру розраховується за допомогою рівняння

$$\Delta p_{\text{max}} = p_{\text{max}} - (\rho_p - \rho_g) \cdot h \cdot g \quad (1)$$

де  $\rho_p$  – щільність шлаку ( $\text{кг/м}^3$ );

$\rho_g$  – щільність газу ( $\text{кг/м}^3$ );

$h$  – глибина занурення капіляру (м);

$g$  – прискорення вільного падіння ( $\text{м/с}^2$ ).

Визначивши  $\Delta p_{\text{max}}$  розраховують поверхневий натяг ( $\delta$ ) за допомогою рівняння 2.

$$\delta = \Delta p_{\text{max}} \cdot r / 2 \quad (\text{Н/м}) \quad (2)$$

де  $r$  – радіус капіляру (м).

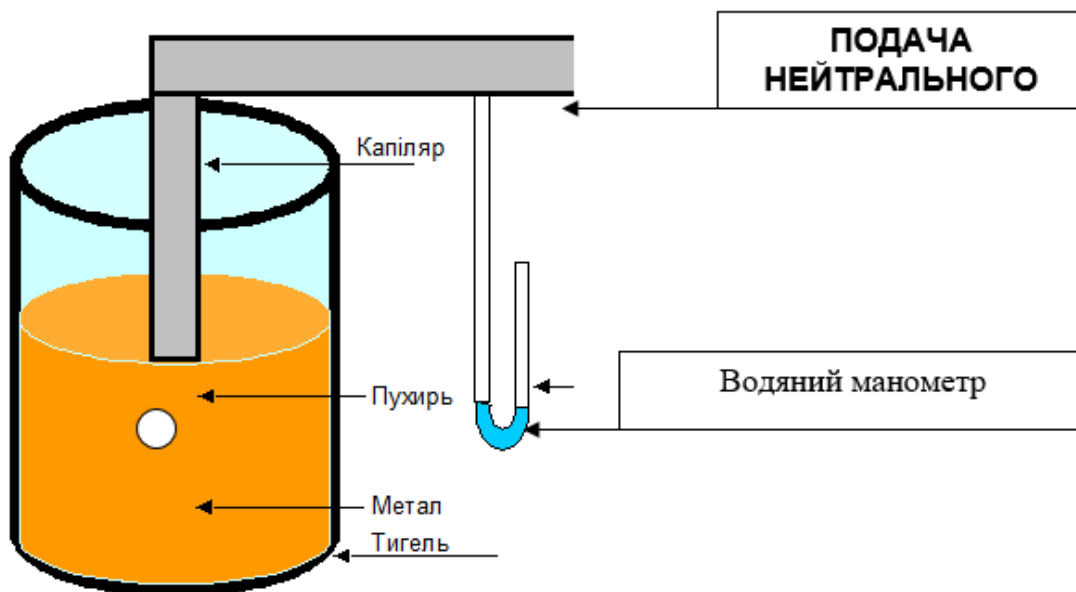


Рисунок 1 - Принципова схема дослідницького обладнання

### Хід виконання роботи

За допомогою комп'ютерної програми “Поверхневий натяг шлаку” виконати серію експериментів по встановленню поверхневого натягу заліза згідно номеру варіанта (табл.2).

Для цього потрібно спочатку занести на дисплей ПЕВМ в таблицю “ВМІСТ КОМПОНЕНТІВ ШЛАКУ” відповідний варіанту склад шлаку, після чого виконується команда “ПУСК” і отримуються експериментальні показання манометру ( $p_{max}$ ). Для виконання наступного дослідження необхідно виконати команду “СБРОС”. Кожен студент згідно свого завдання проводить три серії дослідів для кожного складу шлаку. В результаті виконання дослідів студент заносить середнє значення трьох дослідів в таблицю 1. Далі проводиться розрахунок  $\delta$  і заноситься у таблицю 1.

Таблиця 1 - Вплив складу сталеплавильного шлаку на поверхневий натяг

№	Вміст компонентів шлаку, %				$p_{max}$ , мм.вод.ст.	$\delta$ , дін/см
	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	RO		

Побудуйте графік зміни вмісту CaO, SiO<sub>2</sub>, FeO і поверхневого натягу шлаку протягом сталеплавильного процесу, приймаючи в якості часу порядковий номер варіанту.

У звіті з роботи наведіть свої думки щодо того компоненту, який в першу чергу впливає на поверхневий натяг. Порівняйте силу цього впливу з тим що мала місце у Л.Р.№1. Побудуйте графік залежності  $\delta$  від вмісту цього компоненту.

Звіт з роботи повинен містити:

- схему експериментального обладнання;
- методику виконання роботи;
- таблицю вихідних даних і результатів розрахунків;
- рисунки;
- аналіз результатів.

Таблиця 2 - Варіанти завдань

№	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	Варіанти				
				1	8	30	12	22
1	20	30	25	1	8	30	12	22
2	21	29,5	24	2	19	11	25	30
3	22	29	23	16	23	1	7	31
4	23	28,5	22	12	26	9	3	18
5	24	28	21	9	23	15	1	28
6	25	27,5	20	3	8	15	30	23
7	26	27	19	1	27	21	13	8
8	27	26,5	18	3	29	17	11	8
9	28	26	17	24	11	2	19	31
10	29	25,5	16	13	22	27	4	9
11	30	25	15	15	21	10	2	29
12	31	24,5	14	16	31	22	4	11
13	32	24	13	8	19	23	31	5
14	33	23,5	12	18	14	10	8	27
15	34	23	11	1	26	9	17	22
16	35	22,5	10	9	18	31	2	13
17	36	22	11	15	20	29	4	8
18	37	21,5	12	7	2	13	22	28
19	38	21	13	4	15	11	30	21
20	39	20,5	14	9	3	17	31	19
21	40	20	15	19	7	26	14	3
22	41	19,5	16	21	8	31	14	2
23	42	19	17	22	4	30	17	11
24	43	18,5	18	6	14	22	1	28
25	44	18	19	27	11	7	2	19



## Лабораторна робота №3 Моделювання розподілу елементів в сталеплавильних процесах

**Мета роботи:** ознайомитись з методикою визначення розподілу елементів у системі метал-шлак.

### Теоретична частина

Вивчення рівноваги хімічних реакцій в системах з металами, їх оксидами, сульфідами і іншими з'єднаннями дозволяє отримати не тільки рівноважні дані як межі взаємодії речовин, що досліджуються, але і визначити по цим даним термодинамічні характеристики реагентів. Останні використовують для розрахунків інших процесів і систем з участю досліджених реагентів, скорочуючи тим самим об'єм робіт по проведенню нових експериментів. Таким чином, дослідження рівноваги металургійних реакцій представляє не тільки теоретичний, але і практичний інтерес.

На основі рівноважних даних для приватних реакцій і більш простих систем можуть бути виявлені термодинамічні умови відновлення оксидів, окислення домішок металів і інших процесів в складних системах з різними фазами.

Критерієм досягнення рівноваги в системах при заданих постійних зовнішніх умовах (температурі і тиску) є постійність складу фази, що досліджується. Однак ця ознака є тільки необхідним, але недостатнім.

Потрібно враховувати можливість виникнення помилкової і метастабільної рівноваги. Частіше всього при низьких температурах хімічні реакції в системі протікають настільки повільно, що склад взаємодіючих фаз практично не змінюється у часі. Внаслідок сильного кінетичного гальмування має місце так звану помилкову рівновагу, усунути яке в багатьох випадках можна підвищенням температури з подальшим поверненням до початкових умов. Виникнення метастабільних рівноваги пов'язане з утворенням метастабільних конденсованих фаз, перехід яких в стабільні загальмований кінетичними чинниками. У цьому випадку також доцільне проведення додаткового циклу зміни умов, сприяючого отриманню стабільної фази.

### Методика

У тиглі міститься метал і шлак певного хімічного складу. У металі на початку експерименту створюється певна концентрація елементу шляхом додання відповідного матеріалу. Метал і шлак витримуюється при визначеній температурі певний час (звичайно близько години), протягом якого елемент частково окислюється, а його оксид переходить до шлаку. З часом система метал-шлак приходить до рівноваги, а склад фаз визначається шляхом відбору проб металу і шлаку. Такі досліді проводять при різних температурах 1300-1700 °С, за якими метал і шлак залишаються розплавленими.

За рівнянням реакції перерозподілу елемента визначається вираз константи рівноваги. За складом шлаку визначається активність компонентів, обчислюється величина константи рівноваги, будується залежність її від температури.

### Розрахункова частина

За допомогою комп'ютерної програми "Розподіл елементів" виконати серію експериментів по встановленню перерозподілу марганцю в системі метал-шлак згідно номеру варіанта (табл.2).

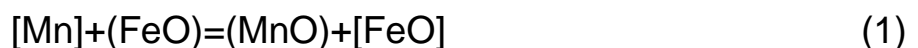
Для цього потрібно на дисплеї ПЕВМ в таблицю "ВМІСТ ЕЛЕМЕНТІВ В ШЛАЦІ" і "ТЕМПЕРАТУРА РОЗПЛАВУ" занести свої значення. Потім виконується команда "ПУСК" і отримуються експериментальні показання вмісту марганцю в металі, після досягнення системи метал-шлак рівноваги. Для проведення наступного дослідження необхідно натиснути на кнопку "СБРОС". Кожен студент згідно свого завдання проводить серію дослідів для конкретного складу шлаку змінюючи температуру в інтервалі від 1300-1700 °С, результати експерименту заносить в табл.1.

Далі проводиться розрахунок  $\eta$  за виразом 1 і заноситься у табл.1.

Таблиця 1 - Перерозподіл марганцю у системі метал-шлак

№	Склад шлаку,%				Рівноважній марганець в металі (%) при температурі				
	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	1300	1400	1500	1600	1700

Розрахуйте константу рівноваги для реакції



$$K_{\text{Mn}} = a_{\text{MnO}} / a_{\text{Mn}} \cdot a_{\text{FeO}} \quad (2)$$

і побудуйте графік залежності  $\text{Lg } K_{\text{Mn}}$  від  $1/T$  (рис.1). Активність оксиду заліза і оксиду марганцю знаходять користуючись псевдотрійної діаграмами (рис. 1, рис.2).

За виразом

$$\text{Lg } K_{\text{Mn}} = 6440/T - 2,95 \quad (3)$$

розрахуйте  $\text{Lg } K_{\text{Mn}}$  і також нанесіть на рис.2. У звіті викладіть свої думки, щодо причин відхилень результатів експерименту у табл.1. від залежності, що отримані у інших дослідженнях.

Звіт з роботи повинен містити:

- схему експериментального обладнання;
- методику виконання роботи;
- таблицю вихідних даних і результатів розрахунків;
- рисунки;
- аналіз результатів.

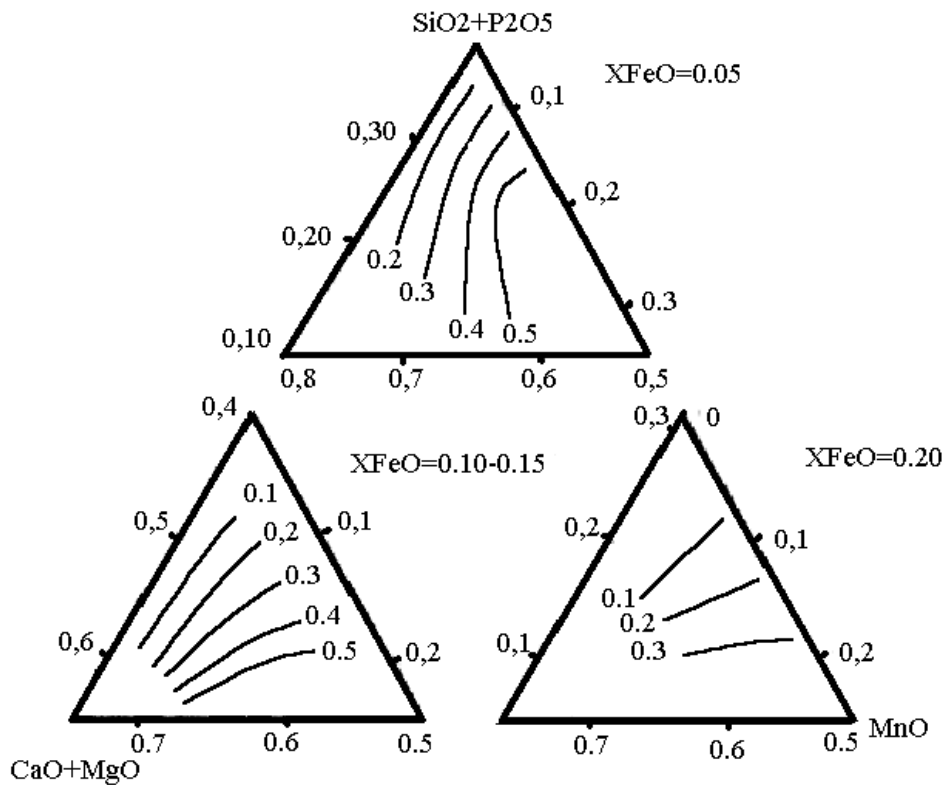


Рисунок 1 - Псевдопотрійна діаграма активності оксиду марганцю

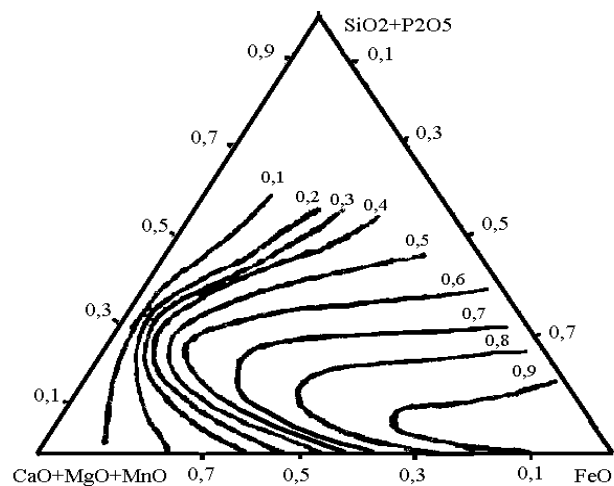


Рисунок 2 - Псевдопотрійна діаграма активності оксиду заліза

Таблиця 2 - Варіанти завдань

№	СКЛАД ШЛАКУ, %			
	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	MnO
1	20	30	25	12
2	21	29.5	24	5
3	22	29	23	12
4	23	28.5	22	11
5	24	28	21	11
6	25	27.5	20	6
7	26	27	19	9
8	27	26.5	18	14
9	28	26	17	6
10	29	25.5	16	9
11	30	25	15	6
12	31	24.5	14	10
13	32	24	13	12
14	33	23.5	12	4
15	34	23	11	5
16	35	22.5	10	6
17	36	22	11	9
18	37	21.5	12	14
19	38	21	13	9
20	39	20.5	14	5
21	40	20	15	10
22	41	19.5	16	8
23	42	19	17	12
24	43	18.5	18	6
25	44	18	19	4



## Індивідуальне завдання №1

### Виконання аналітичних досліджень з питань фізико-хімічних характеристик металургійних процесів та будови та властивостей металургійних розплавів

**Мета роботи:** аналіз науково-технічної літератури з питань фізико-хімічних характеристик металургійних процесів та будови та властивостей металургійних розплавів.


Індивідуальні завдання це підготовані самостійно студентом повідомлення на одну з запропонованих тем та оформлені як реферат. Перелік тем приводиться на початку змістовного модуля. Обсяг індивідуальної роботи має складати не менше 5 сторінок комп'ютерного тексту. Виконане індивідуальне завдання містить титульну сторінку, зміст, перелік використаних літературних джерел. Кількість літературних джерел не менш п'яти. Індивідуальна робота має бути надруковано шрифтом Arial 14 розміру з інтервалом 1,5. Оформлення роботи проводиться відповідно до ДСТУ 3008:2015.


Мінімальна оцінка за підготовку індивідуального завдання 5 балів; ще 10 балів студент отримує за виступ на семінарському занятті (оформлюється презентація). Під час виступу оцінюється рівень підготовки, глибина розглянутої теми, логічність побудови розповіді, відповіді на питання, які можуть бути задані.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці. Номер завдання, що виконується, повинен збігатися з номером студента в журналі групи.

#### Теми індивідуальних завдань

3. Молекулярна та іонна теорія будови сталеплавильних шлаків
4. Вплив складу шлаку на його фізико-хімічні властивості
5. Роль основності шлаку у металургійних процесах
6. В'язкість шлаків та її вплив на процеси в кисневому конвертері
7. Методи термодинамічного розрахунку активності FeO в сталеплавильних шлаках
8. Вплив активності оксиду заліза на окиснювальні процеси в рідкому металі
9. Температура плавлення, електропровідність та поверхневий натяг сталеплавильних шлаків
10. Будова рідкого заліза: сучасні теоретичні уявлення
11. Розчинність газів у рідкому залізі та їхній вплив на якість сталі
12. Основи хімічної рівноваги: ідеальні та реальні системи у металургії
13. Вплив термодинамічних параметрів на рівновагу металургійних реакцій

- 
14. Енергетичні критерії рівноваги: роль ентальпії та ентропії в металургійних процесах
  15. Методи експериментального визначення активності компонентів у сталеплавильних системах
  16. Роль коефіцієнта активності у розчинах металів та шлаків
  17. Термодинамічні моделі оцінки активності оксидів у шлаках
  18. Рівняння Гіббса та його застосування до процесів окислення та відновлення в сталеплавильних агрегатах
  19. Розрахунок рівноваги між рідким металом і шлаком у кисневому конвертері
  20. Вплив тиску та температури на рівноважний склад сталі
  21. Ізобарно-ізотермічний потенціал та його значення у визначенні напрямк металургійних реакцій
  22. Константа рівноваги сталеплавильних реакцій: теоретичні та експериментальні методи визначення
  23. Роль ізобарно-ізотермічного потенціалу у прогнозуванні розкислення сталі
  24. Хімічна спорідненість елементів у рідкому металі та її вплив на склад сталі
  25. Ізобарно-ізотермічний потенціал як критерій ефективності металургійних хімічних реакцій
  26. Розчинність вуглецю в рідкому залізі: термодинаміка та кінетика процесу
  27. Неметалеві включення, морфологія.
  28. Взаємодія кремнію, марганцю та фосфору з рідким металом
  29. Вплив кисню, азоту та водню на якість сталі
  30. Вільна поверхнева енергія рідкого металу та її вплив на процеси очищення сталі
  31. Змочування металом неметалевих включень: адгезія та когезія
  32. Роль адсорбційних процесів у сталеплавильних реакціях.



## **Індивідуальне завдання №2**

### **Виконання аналітичних досліджень з питань газодинаміки доменної плавки та процесів відновлення заліза**

**Мета роботи:** аналіз науково-технічної літератури з питань газодинаміки доменної плавки та процесів відновлення заліза.


Індивідуальні завдання це підготовані самостійно студентом повідомлення на одну з запропонованих тем та оформлені як реферат. Перелік тем приводиться на початку змістовного модуля. Обсяг індивідуальної роботи має складати не менше 5 сторінок комп'ютерного тексту. Виконане індивідуальне завдання містить титульну сторінку, зміст, перелік використаних літературних джерел. Кількість літературних джерел не менш п'яти. Індивідуальна робота має бути надруковано шрифтом Arial 14 розміру з інтервалом 1,5. Оформлення роботи проводиться відповідно до ДСТУ 3008:2015.

Мінімальна оцінка за підготовку індивідуального завдання 5 балів; ще 10 балів студент отримує за виступ на семінарському занятті (оформлюється презентація). Під час виступу оцінюється рівень підготовки, глибина розглянутої теми, логічність побудови розповіді, відповіді на питання, які можуть бути задані.

Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці. Номер завдання, що виконується, повинен збігатися з номером студента в журналі групи.

#### **Теми індивідуальних завдань**

1. Термічні та хімічні процеси горіння коксу у фурменій зоні.
2. Вплив вдування природного газу та пиловугільного палива на газодинаміку фурменого вогнища.
3. Фактори, що визначають форму і розміри фурменого вогнища.
4. Зміна складу і температури газу у фурменій зоні в залежності від режиму дуття.
5. Еволюція складу доменного газу по висоті шахти печі.
6. Взаємодія газової фази з шихтовими матеріалами: основні закономірності.
7. Окиснення чавуну в горні доменної печі: механізм та кінетика процесу.
8. Фактори, що впливають на повторне відновлення заліза в нижній частині печі.
9. Принципи ефективної організації протитечійного руху в доменній печі.
10. Вплив гранулометричного складу шихти на газодинамічний режим печі.
11. Закономірності руху шихтових матеріалів у шахті доменної печі.

- 
12. Вплив форми і розміру шихтових матеріалів на швидкість їх просування.
  13. Основні особливості руху доменного газу в шахті та горні печі.
  14. Фактори, що впливають на нерівномірність розподілу газових потоків.
  15. Методи завантаження шихти в доменну піч: їх переваги та недоліки.
  16. Оптимізація розподілу шихтових матеріалів на колошнику для покращення газопроникності.
  17. Роль вуглецю та газоподібних відновників у процесі відновлення оксидів заліза.
  18. Термодинамічний аналіз реакцій відновлення оксидів заліза в доменній печі.
  19. Вплив температури та парціального тиску газів на рівновагу відновлення  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  та  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .
  20. Пряме та непряме відновлення оксидів заліза: механізм та особливості процесів.
  21. Енергетичні та технологічні аспекти прямого та непрямого відновлення заліза.
  22. Швидкість і механізм відновлення оксидів заліза газами  $\text{CO}$  та  $\text{H}_2$ .
  23. Вплив температури, складу газової фази та пористості руди на кінетику відновлення заліза.
  24. Вплив складу шихти (руда, агломерат, окатки) на ефективність процесу відновлення.
  25. Роль вологості та гранулометричного складу шихтових матеріалів у процесі відновлення заліза.
  26. Дослідження впливу режиму дуття на швидкість відновлення оксидів заліза в доменній печі.
  27. Аналіз експериментальних даних щодо процесів відновлення заліза при використанні альтернативних відновників (водень, природний газ).

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. The World Steel Association : веб-сайт. URL: <https://worldsteel.org/> (дата звернення: 07.06.2024).
2. Меджибожський М. Я., Харлашин П. С. Теоретичні основи сталеплавильних процесів. Київ : Вища школа, 1997.
3. 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.
4. Colás R., Totten G. E. Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys, Five-Volume Set (Print). CRC Press, 2016. 4038 p.
5. Ghosh A., Chatterjee A. Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice. 1st edition. Prentice-Hall of India Pvt.Ltd, 2008. 472 p.
6. Теорія металургійних процесів. / В. Б. Охотський та ін. Київ : ІЗМН, 1997. 512 с.
7. Металургія (проблеми, теорія, технологія, якість) : підручник / П. С. Харлашин та ін. Маріуполь : ПДТУ, 2004. 723 с.



*Навчально-методичне видання*

**Нізяєв Костянтин Георгійович  
Стоянов Олександр Миколайович**

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ МЕТАЛУРГІЇ:**

**методичні вказівки до виконання практичних, лабораторних робіт  
та індивідуальних завдань**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції