

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

до вивчення дисципліни “Теорія металургійних процесів”

для студентів напрямів 136 – металургія,

015 - ( )

**м. Дніпро НМетАУ**

## ПИТАННЯ ДО ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ

Індивідуальне завдання студента складається з п'яти питань, три з яких теоретичні, два - розрахункові задачі. Номера питань індивідуального завдання розраховується студентом по номеру залікової книжки:

Номер першого питання дорівнює сумі двох останніх цифр залікової книжки студента (якщо дві останні цифри залікової книжки 00, тоді перше питання - 1.20).

Номер другого питання дорівнює останній цифрі номера залікової книжки (якщо остання цифра «0», потрібно брати десяте питання).

Номер третього питання дорівнює передостанній цифрі номера залікової книжки (якщо передостання цифра «0», потрібно брати десяте питання).

Дані для четвертого питання вибираються так: вміст вуглецю в сплаві - 0,01 помножене на останню цифру залікової книжки, а вміст хрому -

передостання цифра залікової книжки (якщо остання цифра «0», множиться на 10).

Дані для п'ятого питання вибираються по останній цифрі номера залікової книжки (якщо остання цифра «0», потрібно брати десяте питання).

Наприклад, останні дві цифри залікової книжки 57, тоді перше питання 1.12 ( $5+7=12$ ), друге питання 2.7, третє питання 3.5; дані для четвертого питання -

мас.%	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
	0,07 (7 помножити на 0,01)	0,2	0,3	5 (передостання цифра залікової книжки)	11	3	0,3

п'яте питання - 5.7.

останні дві цифри залікової книжки 30, тоді перше питання 1.3 ( $3+0=3$ ), друге питання 2.10, третє питання 3.3, дані для четвертого питання

мас.%	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
	0,1 (10 помножити на 0,01)	0,2	0,3	3 (передостання цифра залікової книжки)	11	3	0,3

п'яте питання - 5.10.

### Завдання до першого питання

1.1. Розглянути сутність процесу дисоціації карбонатів, привести величини, що є критерієм міцності карбонатів. Обчислити значення цих величин для реакцій утворення карбонатів кальцію, магнію й заліза для температур 900, 1100, 1300 °С. За результатами розрахунків зробити висновок про вплив температури на міцність карбонатів, про порівняльну міцність карбонатів.

1.2. Які величини є мірою міцності оксиду? Який зв'язок між цими величинами й міцністю оксиду? Приведіть графік, що характеризує залежність пружності дисоціації оксиду від температури, розгляньте кожну область, виявіть умови утворення й дисоціації оксиду.

1.3. Викласти сутність термографічного методу дослідження в застосуванні до вивчення процесів дисоціації хімічних сполук, зокрема, карбонатів.

- 1.4. Зробити термодинамічний аналіз процесів утворення й дисоціації за допомогою зміни стандартної енергії Гіббса. Зробити висновок про порівняльну міцність оксидів нікелю, хрому заліза й марганцю.
- 1.5. Розглянути термодинаміку дисоціації карбонатів кальцію, магнію, заліза й доломіту, зробити висновок про відносну міцність карбонатів, відзначити область їхнього застосування.
- 1.6. Як побудований ряд елементів по спорідненості до кисню. Яке практичне значення мають ці залежності.
- 1.7. Температура початку дисоціації хімічної сполуки, температура хімічного кипіння. Які методи визначення цих температур. Наведіть приклади.
- 1.8. Розглянути систему Fe-O, написати реакції утворення оксидів, дати характеристику кожного оксиду, оцінити порівняльну міцність.
- 1.9. Викласти сутність принципу Байкова про ступінчастість перетворень у системі Me-O (для приклада розглянути перетворення в системі Mn-O).
- 1.10. Привести діаграму стану системи залізо-кисень, розглянути всі області цієї діаграми.
- 1.11. Користуючись діаграмою стану Fe-O, побудувати ізотерму пружності дисоціації оксидів заліза при температурі 1200 °C.
- 1.12. Привести діаграму стану системи залізо-кисень, виділити двофазні області й охарактеризувати їх.
- 1.13. Привести діаграму стану системи залізо-кисень, виділити трифазні області й охарактеризувати їх.
- 1.14. Привести діаграму стану системи залізо-кисень. Користуючись діаграмою розглянути будову окалини при температурі нижче и вище 570 °C.
- 1.15. Розглянути вплив структури окисної плівки на швидкість окислювання металу.
- 1.16. Розглянути термодинаміку основних реакцій системи C-O.
- 1.17. Порівняти відновлювальну здатність CO і H<sub>2</sub>, окислювальні властивості CO<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>O.
- 1.18. Викласти термодинамічний аналіз реакції газифікації вуглецю вуглекислим газом.
- 1.19. Розглянути графік спорідненості металів до кисню, як вплине температура на відновлювальні властивості вуглецю. Визначити температуру, вище якої вуглець відновлює нікель, залізо, марганець, вольфрам і кремній.

1.20. Користуючись графіком зміни хімічної спорідненості елементів до кисню залежно від температури, визначити поведження елементів й їхніх оксидів в умовах відновлювальної й окислювальної плавки.

#### Завдання для другого питання

2.1. Викласти основні технологічні функції металургійних шлаків, розглянути класифікацію шлаків по складу.

2.2. Розглянути вплив хімічного складу шлаків і температури на в'язкість шлаків

2.3. Зробити термодинамічний аналіз процесів відновлення оксидів заліза окисом вуглецю. Аналіз виконати за допомогою графіка впливу температури на рівновагу реакцій непрямого відновлення.

2.4. Викласти сутність алюмотермічного відновлення, область застосування.

2.5. Розглянути термодинаміку реакцій відновлення оксидів заліза твердим вуглецем.

2.6. Зробити термодинамічний аналіз процесів відновлення оксидів заліза воднем. Аналіз виконати за допомогою графіка впливу температури на рівновагу реакцій відновлення.

2.7. Викласти сутність металотермічного відновлення, область застосування

2.8. Зробити термодинамічний аналіз процесів непрямого відновлення оксидів металів з різною спорідненістю до кисню.

2.9. Показати фізико-хімічну сутність металургійного відновлення: умови плину реакції убік відновлення, види металотермічного відновлення.

2.10. Зробити термодинамічний аналіз процесів відновлення оксидів заліза оксидом вуглецю й воднем. За результатами аналізу пояснити розходження в закономірностях процесів відновлення воднем й оксидом вуглецю.

#### Завдання до третього питання

3.1. Проаналізувати поведження домішок у сталеплавильній ванні залежно від їхньої спорідненості до кисню, показати вплив температури, основності шлаків на коефіцієнт розподілу домішок.

3.2. Розглянути форму існування кисню в металевій і шлаковій фазах. Залежність концентрації кисню в металі від окислювальної здатності шлаків.

3.3. Зробити термодинамічний аналіз реакцій окислювання марганцю в сталеплавильній ванні.

- 3.4. Зробити термодинамічний аналіз реакцій окислювання кремнію в сталеплавильній ванні
- 3.5. Зробити термодинамічний аналіз реакції окислювання вуглецю в сталеплавильній ванні.
- 3.6. Викласти сутність осаджуючого розкислення сталі: реакції розкислення, міри, спрямовані на зменшення забруднення сталі неметалічними включеннями. Утворення й видалення неметалічних включень у сталі при осаджуючому розкисленні.
- 3.7. Написати реакції десульфурації металу. Які фактори сприяють видаленню сірки з металу.
- 3.8. Розглянути вплив різних факторів (температури, тиску, складу металу) на розчинність азоту в металі, міри боротьби з ним.
- 3.9. Розглянути реакції дефосфорації металу, проаналізувати основні фактори, що впливають на коефіцієнт розподілу фосфору.
- 3.10. Проаналізувати вплив температури, тиску газу, складу металу на розчинність водню в сталі. Міри боротьби з воднем.

#### Завдання до четвертого питання

Розрахувати активність вуглецю в розплавленій сталі зазначеного складу при температурі 1600 °С

мас.%	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
	0,01· <i>A</i>	0,2	0,3	<i>B</i>	11	3	0,3

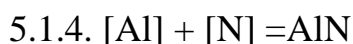
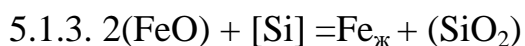
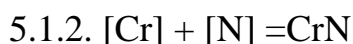
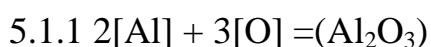
де *A* - остання цифра, *B* - передостання цифра в заліковій книжці студента

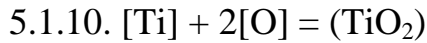
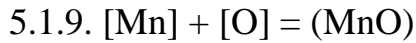
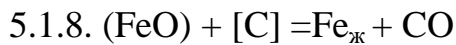
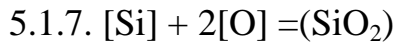
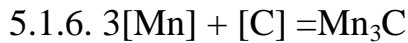
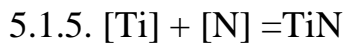
#### Завдання до п'ятого питання

Розрахункові задачі п'ятого питання діляться на два блоки 5.1 й 5.2. Блок завдань в залежності від спеціальності визначається викладачем.

##### Блок 5.1

Визначити  $\Delta G^0$  заданої реакції й розрахувати константу рівноваги цієї реакції при температурі 1600 °С.





## Блок 5.2

5.2.1 Розрахувати рівноважний склад газової фази для реакції  $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2 = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}$  при  $900^\circ\text{C}$ , якщо  $\lg K_p = 813/T + 3,894$ .

5.2.2 Розрахувати рівноважний склад газової фази для реакції  $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2 = 3\text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$  при  $1000^\circ\text{C}$ , якщо  $\lg K_p = -3760/T + 3,850$ .

5.2.3 Розрахувати рівноважний склад газової фази для реакції  $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$  при  $800^\circ\text{C}$ , якщо  $\lg K_p = 2726/T + 2,144$ .

5.2.4 Розрахувати рівноважний склад газової фази для реакції  $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$  при  $1000^\circ\text{C}$ , якщо  $\lg K_p = 2726/T + 2,144$ .

5.2.5 Розрахувати рівноважний склад газової фази для реакції  $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{Fe} + \text{CO}_2$  при  $900^\circ\text{C}$ , якщо  $\lg K_p = -1850/T + 2,100$ .

5.2.6 Розрахувати рівноважний склад газової фази для реакції  $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$  при  $1100^\circ\text{C}$ , якщо  $\lg K_p = 688/T - 0,9$ .

5.2.7 Розрахувати мольну частку  $\text{CaO}$  в шлаку наступного складу (мас.,%):  $\text{CaO} = 30\%$ ,  $\text{MgO} = 5\%$ ,  $\text{FeO} = 15\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 35\%$ ,  $\text{MnO} = 13,5\%$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 = 1,5\%$ .

5.2.8 Розрахувати мольну частку  $\text{MgO}$  у шлаку наступного складу (мас.,%):  $\text{CaO} = 30\%$ ,  $\text{MgO} = 5\%$ ,  $\text{FeO} = 15\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 35\%$ ,  $\text{MnO} = 13,5\%$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 = 1,5\%$ .

5.2.9 Розрахувати мольну частку  $\text{FeO}$  в шлаку наступного складу (мас.,%):  $\text{CaO} = 35\%$ ,  $\text{MgO} = 7\%$ ,  $\text{FeO} = 12\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 30\%$ ,  $\text{MnO} = 13\%$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 = 3\%$ .

5.2.10 Розрахувати мольну частку  $\text{MnO}$  в шлаку наступного складу (мас.,%):  $\text{CaO} = 35\%$ ,  $\text{MgO} = 7\%$ ,  $\text{FeO} = 12\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 30\%$ ,  $\text{MnO} = 13\%$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 = 3\%$ .

#### ПРИКЛАДИ РІШЕННЯ ЗАДАЧ

1. Визначити  $\Delta G^0$  реакції  $2(\text{MnO}) + [\text{Si}] = [\text{Mn}] + (\text{SiO}_2)$  і розрахувати константу рівноваги цієї реакції при температурі  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ .



Величина  $\Delta G^\circ$  пов'язана зі зміною ентальпії й ентропії рівнянням  $\Delta G_T^\circ = \Delta H_T^\circ - T\Delta S_T^\circ$ . Це рівняння справедливо для випадку, коли в інтервалі температур 298 -  $T$  немає фазових перетворень. Якщо в розглянутому інтервалі температур речовини, що беруть участь у реакції, мають фазові перетворення, то необхідно вводити додаткові члени, що враховують зміни ентальпії й ентропії фазових перетворень. Залежність  $\Delta G^\circ$  від температури для різних реакцій можна виразити формулою  $\Delta G^\circ = M + N \cdot T$ . Коефіцієнти  $M$  і  $N$  наведені в Додатку І. Величини  $M$  і  $N$  близькі до середніх значень теплових ефектів ( $\Delta H$ ) і зміни ентропії ( $\Delta S$ ) для відповідних реакцій:  $\Delta H \gg M$ ,  $\Delta S \gg -N$ . Для розрахунку констант рівноваги реакцій використовується залежність виду  $\Delta G^\circ = -RT \ln K_p$ , де  $R=8,3192$  Дж/(моль·К),  $\Delta G^\circ = -8,3192T \lg K_p$ . При переході до десятинних логарифмів одержуємо  $\Delta G^\circ = -19,155T \lg K_p$ .

Термодинамічні характеристики реакції  $2(\text{MnO}) + [\text{Si}] = [\text{Mn}] + (\text{SiO}_2)$  у стандартних умовах перебувають із урахуванням фазових перетворень і реакцій розчинення речовин у металі й у шлаку. Величина  $\Delta G^\circ$  фазових перетворень перебуває за значенням  $\Delta H_{nl}$ :  $\Delta G_{nl} = \Delta H_{nl} - T\Delta S_{nl} = \Delta H_{nl} - T \frac{\Delta H_{nl}}{T_{nl}}$  (Додаток 2).

Залежність  $\Delta G^\circ$  розчинення різних речовин у рідкому металі виражається формулою  $\Delta G^\circ = M + N \cdot T$ . Коефіцієнти  $M$  і  $N$  наведені в Додатку 3.

Реакцію  $2(\text{MnO}) + [\text{Si}] = 2[\text{Mn}] + (\text{SiO}_2)$  необхідно розглядати як алгебраїчну суму наступних реакцій

-2	$Mn_{m\phi} + 1/2O_2 = MnO_{m\phi}$ ,	$\Delta G^0_1 = -385186 + 73,73T$ , Дж/моль
+1	$Si_{m\phi} + O_2 = SiO_{2m\phi}$	$\Delta G^0_2 = -906442 + 175,64T$ , Дж/моль
+2	$Mn_{m\phi} = Mn_{ж}$	$\Delta G^0_3 = 14640 - 9,66T$ , Дж/моль
+2	$Mn_{ж} = [Mn]$	$\Delta G^0_4 = 4086 - 38,18T$ , Дж/моль
-1	$Si_{m\phi} = Si_{ж}$	$\Delta G^0_5 = 50670 + 30,05T$ , Дж/моль
-1	$Si_{ж} = [Si]$	$\Delta G^0_6 = -131591 - 17,25T$ , Дж/моль
-2	$MnO_{m\phi} = (MnO)$	$\Delta G^0_7 = 54430 - 26,45T$ , Дж/моль
+1	$SiO_{2m\phi} = (SiO_2)$	$\Delta G^0_8 = 12980 - 6,53T$ , Дж/моль

Шляхом алгебраїчного підсумовування одержимо

$$\Delta G^0 = -2\Delta G^0_1 + \Delta G^0_2 + 2\Delta G^0_3 + 2\Delta G^0_4 - \Delta G^0_5 - \Delta G^0_6 - 2\Delta G^0_7 + \Delta G^0_8 = -113577 + 26,17T. \text{ Звідки } \Delta G^0 = -67177,6 \text{ Дж/моль.}$$

Знаючи залежність  $\Delta G^0 = -19,155T \lg K_p$ , константу рівноваги даної реакції можна розрахувати по вираженню  $\lg K_p = \frac{5929,4}{T} - 1,37$ .

При  $T=1773 \text{ К}$ ,  $K_p = 94,25$ .

Відповідь:  $\Delta G^0 = -67177,6 \text{ Дж/моль}$ ,  $K_p = 94,25$ .

2. Розрахувати мольну частку  $\text{SiO}_2$  у шлаку наступного складу (мас.,%):  $\text{CaO} = 8\%$ ,  $\text{MgO} = 5\%$ ,  $\text{FeO} = 0,6\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 30\%$ ,  $\text{MnO} = 53\%$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 = 3,4\%$ .

Для перерахування складу розчину, вираженого в масових відсотках кожного компонента, розраховуємо число молів всіх компонентів в 100 кг шлаку. Мольна частка  $i$  – того компонента в розчині:  $X_i = \frac{n_i}{\sum n_i}$ , де  $n_i$  – число молів  $i$ -того компонента в розчині,  $\sum n_i$  – загальне число молів. Число молів кожного компонента знаходимо з вираження  $n_i = \%i / M_i$ , де  $\%i$  – масовий відсоток  $i$ -того компонента в розчині,  $M_i$  – атомна або молекулярна маса  $i$ -того компонента.

	$\%i$	$M_i$	$n_i$
CaO	8	56	0,143
MgO	5	40	0,125
FeO	0,6	72	0,008
SiO <sub>2</sub>	30	60	0,5
MnO	53	71	0,746
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,4	142	0,024
$\sum n_i$			1,546

Мольна частка  $\text{SiO}_2$  дорівнює  $X_{\text{SiO}_2} = n_{\text{SiO}_2} / \sum n_i = 0,5 / 1,546 = 0,323$ .

Відповідь: Мольна частка  $\text{SiO}_2$  дорівнює 0,323.

3. Розрахувати рівноважний склад газової фази для реакції  $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2 = 3\text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$  при  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , якщо відома температурна залежність для константи рівноваги даної реакції  $\lg K_p = -3760/T + 3,850$ .

Константа рівноваги реакції при відсутності твердих розчинів між оксидами

має вигляд  $K_p = \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2}} = \frac{\%H_2O}{\%H_2}$ . Відомо, що  $\%H_2O + \%H_2 = 100$ , позначимо  $\%H_2O$

$= x$ , звідки  $\%H_2 = 100 - x$ . Підставляючи ці значення у вираження  $K_p$ , одержимо

$K_p = \frac{x}{100 - x}$ , отже,  $x = \frac{100 K_p}{1 + K_p}$ . Знаючи, що  $\lg K_p = -3760/T + 3,850$ ,  $\lg K_p = -$

$3760/(1000+273) + 3,85 = 0,896$ , знаходимо  $K_p = 7,87$ .

Звідки  $\% H_2O = 88,73$ ,  $\% H_2 = 100 - 88,73 = 11,27$ .

Відповідь:  $\% H_2O = 88,73$ ,  $\% H_2 = 11,27$ .

4. Розрахувати активність вуглецю в розплавленій сталі складу (мас. %):

C – 0,05; Si – 0,5; Mn – 1,2; Ni – 9; Mo – 2 при температурі 1600 °C.

Активність вуглецю стосовно 1%-ного стандартного стану розраховується по формулі  $a_c = [\%C] \cdot f_c$ . Коефіцієнт активності вуглецю в розплаві:

$$\lg f_c = e_c^C [\%C] + e_c^{Si} [\%Si] + e_c^{Mn} [\%Mn] + e_c^{Ni} [\%Ni] + e_c^{Mo} [\%Mo].$$

Параметри взаємодії першого порядку наведені в додатку 4.

$$e_c^C = 0,14, \quad e_c^{Si} = 0,08, \quad e_c^{Mn} = -0,012, \quad e_c^{Ni} = 0,012, \quad e_c^{Mo} = -0,008.$$

Таким чином,  $\lg f_c = 0,14 \cdot 0,05 + 0,08 \cdot 0,5 - 0,012 \cdot 1,2 + 0,012 \cdot 9 - 0,008 \cdot 2 = 0,125$ , звідки

$$f_c = 1,33 \text{ та } a_c = [\%C] \cdot f_c = 1,33 \cdot 0,05 = 0,0665.$$

Відповідь: Активність вуглецю дорівнює 0,0665.

**Зміна енергії Гіббса для реакцій утворення сполук  
з компонентів в стандартних умовах**

Реакція	$\Delta G^\circ = M + NT$		Інтервал температури, К
	М, Дж	N, Дж/К	
<i>Оксиди</i>			
$2Al_{ж} + 3/2 O_2 = Al_2O_3$	-1687909	325,15	932—2303
$2Al_{ж} + 1/2 O_2 = Al_2O$	-170821	-49,40	933—2273
$2Al_{ж} + O_2 = Al_2O_2$	-47102	28,88	933—2273
$2B_T + 3/2 O_2 = B_2O_3$	-1246410	221,36	723—2300
$B_T + 1/2 O_2 = BO$	-3806	-88,84	298—2303
$Ba_{ж} + 1/2 O_2 = BaO_T$	-557933	94,83	983—1910
$Be_T + 1/2 O_2 = BeO_T$	-598796	96,88	298—1556
$Be_{ж} + 1/2 O_2 = BeO_T$	-606249	101,70	1556—2768
$2Bi_{ж} + 3/2 O_2 = Bi_2O_{3ж}$	-592348	295,71	544—1090
$C_T + 1/2 O_2 = CO$	-110560	-89,875	773—2273
$C_T + O_2 = CO_2$	-393260	-2,29	773—2273
$CO + 1/2 O_2 = CO_2$	-282695	87,585	773—2273
$C_T + CO_2 = 2CO$	172130	-177,46	773—2273
$Ca_{ж} + 1/2 O_2 = CaO_T$	-641836	110,20	1123—1765
$Cd_{ж} + 1/2 O_2 = CdO_T$	-278841	114,72	594—1040
$2Ge_T + 3/2 O_2 = Ge_2O_{3T}$	-1789229	286,80	298—1071
$Ce_T + O_2 = CeO_{2T}$	-1084381	211,98	298—1071
$Ce_{ж} + O_2 = CeO_{2T}$	-1078101	217,71	1077—2000
$Co_T + 1/2 O_2 = CoO_T$	-237308	72,72	298—1766
$Co_{ж} + 1/2 O_2 = CoO_T$	-261884	85,83	1766—2100
$3Co_T + 2O_2 = Co_3O_{4T}$	-957940	457,24	298—973
$2Cr_T + 3/2 O_2 = Cr_2O_{3T}$	-1110884	247,48	1173—1923
$3Cr_T + 2O_2 = Cr_3O_{4T}$	-1356104	264,82	1923—1938
			(пл)
$Cr_T + 1/2 O_2 = CrO_{ж}$	-334442	63,85	1938—2023
$2Cu_T + 1/2 O_2 = Cu_2O_T$	-168519	71,30	298—1356
$2Cu_{ж} + 1/2 O_2 = Cu_2O_{ж}$	-146605	50,41	1502—2820
$Cu_T + 1/2 O_2 = CuO_T$	-159852	91,02	298—1356
$Fe_{\alpha} + 1/2 O_2 = FeO_T$	-262387	63,56	843—1184
$Fe_{\gamma} + 1/2 O_2 = FeO_T$	-263182	64,22	1184—1650
$Fe_{\gamma,\delta} + 1/2 O_2 = FeO_{ж}$	-228934	43,46	1650—1809
$Fe_{ж} + 1/2 O_2 = FeO_{ж}$	-239987	49,57	1809—3000
$3Fe_T + 2O_2 = Fe_3O_{4T}$	-1105608	307,31	843—1809
$3FeO_T + 1/2 O_2 = Fe_3O_{4T}$	-318065	127,84	298—1184
$2Fe_T + 3/2 O_2 = Fe_2O_{3T}$	-814374	248,82	298—1809
$2/3 Fe_3O_{4T} + 1/6 O_2 = Fe_2O_{3T}$	-97795	56,7	298—1809

Реакція	$\Delta G^\circ = M + NT$		Інтервал температури, К
	М, Дж	Н, Дж/К	
$H_2 + 1/2 O_2 = H_2O$	-246115	54,12	400—3000
$Hf_\alpha + O_2 = HfO_{2T}$	-1102259	174,25	1000—1973
$Hf_\beta + O_2 = HfO_{2T}$	-1083921	164,96	1973—2495
$2K_{ж} + 1/2 O_2 = K_2O_T$	-367224	157,88	336—1030
$2La_T + 3/2 O_2 = La_2O_{3T}$	-1789522	304,00	298—1153
$2Li_{ж} + 1/2 O_2 = Li_2O_T$	-578825	135,86	500—1500
$Mg_T + 1/2 O_2 = MgO_T$	-601350	107,39	298—923
$Mg_{ж} + 1/2 O_2 = MgO_T$	-609350	116,06	923—1376
$Mg + 1/2 O_2 = MgO_T$	-728085	202,35	1376—3098
$Mn_T + 1/2 O_2 = MnO_T$	-385186	73,73	298—1517
$3Mn_T + 2O_2 = Mn_3O_{4T}$	-1385412	350,60	298—1516
$3MnO_T + 1/2 O_2 = Mn_3O_{4T}$	-232267	117,06	1198—1813 (пл)
$2Mn_T + 3/2 O_2 = Mn_2O_{3T}$	-959070	259,54	298—1516
$2/3 Mn_3O_{4T} + 1/6 O_2 = Mn_2O_{3T}$	-35085	28,09	1073—1273
$Mn_T + O_2 = MnO_{2T}$	-518954	177,19	298—1516
$Mo_T + O_2 = MoO_{2T}$	-584435	170,61	298—2500
$Mo_T + O_2 = MoO_{2ж}$	-545435	142,14	2500—2880
$Mo_T + 3/2 O_2 = MoO_{3T}$	-742194	247,10	298—1070
$Mo_T + 3/2 O_2 = MoO_3$	-664948	182,96	1070—1500
$1/2 N_2 + 1/2 O_2 = NO$	90477	12,69	298—2273
$1/2 N_2 + O_2 = NO_2$	32322	63,30	298—2273
$2Na_{ж} + 1/2 O_2 = Na_2O_T$	-421401	147,12	371—1405 (пл)
$2Na + 1/2 O_2 = Na_2O_{ж}$	-519163	243,88	1405—2223 (пл)
$Nb_T + 1/2 O_2 = NbO_T$	-402067	81,10	1000—2218
$2Nb_T + 5/2 O_2 = Nb_2O_{5T}$	-1874539	410,89	1000—1785
$Nb_T + O_2 = NbO_{2T}$	-773302	160,15	1000—2270
$Ni_T + 1/2 O_2 = NiO_T$	-234503	85,28	298—1725
$Ni_{ж} + 1/2 O_2 = NiO_T$	-262303	108,77	1725—2200
$1/2 P_2 + 1/2 O_2 = PO$	-77860	-11,60	298—1973
$1/2 P_2 + O_2 = PO_2$	-386023	16,29	298—1973
$4P_{кр} + 5O_2 = P_4O_{10}$	-2858915	699,61	631—704
$P_4 + 5O_2 = P_4O_{10}$	-3163965	975,94	1000—2000
$Pb_{ж} + 1/2 O_2 = PbO_T$	-218676	97,8	600—1159
$Pb_{ж} + 1/2 O_2 = PbO_{ж}$	-184931	69,08	1159—1765
$3Pb_{ж} + 2O_2 = Pb_3O_{4T}$	-702964	369,19	601—1473
$Pb_{ж} + O_2 = PbO_{2T}$	-27256	193,81	601—1173
$2Rb_{ж} + 1/2 O_2 = Rb_2O_T$	-336116	145,07	312—910
$1/2 S_2 + 1/2 O_2 = SO$	-64351	-5,02	800—3000
$1/2 S_2 + O_2 = SO_2$	-357134	72,52	800—3000
$1/2 S_2 + 3/2 O_2 = SO_3$	-458203	163,45	718—2273
$2Sb_{ж} + 3/2 O_2 = Sb_2O_{3ж}$	-653559	216,96	928—1698
$Si_T + 1/2 O_2 = SiO$	-104251	-82,56	298—1685
$Si_T + O_2 = SiO_2 \alpha\text{-кварц}$	-912237	180,74	298—848

Реакція	$\Delta G^\circ = M + NT$		Інтервал температури, К
	М, Дж	Н, Дж/К	
$\text{Si}_T + \text{O}_2 = \text{SiO}_2 \beta\text{-кварц}$	-906555	174,05	848—1298
	-902536	170,95	1298—1690
$\text{Si}_T + \text{O}_2 = \text{SiO}_2T$ — кристобалит	-906442	175,64	298—1685
$\text{Sn}_ж + \text{O}_2 = \text{SnO}_2г$	-581756	204,82	505—1898
$\text{Sr}_ж + 1/2 \text{O}_2 = \text{SrO}_T$	-596347	103,46	1045—1640
$\text{Ta}_T + 1/2 \text{O}_2 = \text{TaO}$	188406	-86,67	298—2273
$\text{Ta}_T + \text{O}_2 = \text{TaO}_2$	-209340	-20,52	298—2273
$\text{Ta}_T + 5/2 \text{O}_2 = \text{Ta}_2\text{O}_5T$	-2007152	401,56	1000—2150
$\text{Th}_T + 1/2 \text{O}_2 = \text{ThO}$	-66989	-52,75	1873—2273
$\text{Th}_T + \text{O}_2 = \text{ThO}_2T$	-1226732	180,03	1000—2028
$\text{Ti}_T + 1/2 \text{O}_2 = \text{TiO}_{\beta T}$	-511208	80,60	1000—1950
$\text{Ti}_T + \text{O}_2 = \text{TiO}_{2T}$ — рутил	-939535	175,76	1000—1950
$2\text{Ti}_T + 3/2 \text{O}_2 = \text{Ti}_2\text{O}_3T$	-1495106	251,21	1000—1950
$3\text{Ti}_T + 5/2 \text{O}_2 = \text{Ti}_3\text{O}_5T$	-2417004	414,41	1000—1950
$\text{U}_ж + \text{O}_2 = \text{UO}_2T$	-1089866	174,21	1406—3000
$4\text{U}_T + 9/2 \text{O}_2 = \text{U}_4\text{O}_9T$	-4494948	740,69	298—873
$3\text{U}_T + 4\text{O}_2 = \text{U}_3\text{O}_8T$	-3562966	652,97	298—873
$\text{U}_T + 3/2 \text{O}_2 = \text{UO}_3T$	-1227569	250,71	298—873
$\text{V}_T + 1/2 \text{O}_2 = \text{VO}_T$	-415666	81,18	298—2000
$2\text{V}_T + 3/2 \text{O}_2 = \text{V}_2\text{O}_3T$	-1231129	239,61	298—2185
$\text{V}_T + \text{O}_2 = \text{VO}_2T$	-706732	155,41	298—1633
			(пл)
$2\text{V} + 5/2 \text{O}_2 = \text{V}_2\text{O}_5жк$	-1464417	325,31	943—2185
$\text{W}_T + \text{O}_2 = \text{WO}_2T$	-585440	171,95	298—2000
$\text{W}_T + 3/2 \text{O}_2 = \text{WO}_3T$	-837821	245,68	298—1745
$2\text{Y}_T + 3/2 \text{O}_2 = \text{Y}_2\text{O}_3T$	1897709	298,35	298—1803
	1903236	324,64	1803—2000
$\text{Zn} + 1/2 \text{O}_2 = \text{ZnO}_T$	-493666	203,98	1180—2248
$\text{Zr}_T + 1/2 \text{O}_2 = \text{ZrO}$	54596	-67,16	1573—2123
$\text{Zr}_T + \text{O}_2 = \text{ZrO}_2T$	-1092754	183,80	298—2123
<i>Карбонати</i>			
$\text{BaO}_{(T)} + \text{CO}_2 = \text{BaCO}_3(T)$	-250915	147,17	1073—1333
$\text{CaO}_{(T)} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3(T)$	-170577	144,19	973—1473
$\text{Li}_2\text{O}_{(T)} + \text{CO}_2 = \text{Li}_2\text{CO}_3(ж)$	-147962	78,80	993—1843
$\text{MgO}_{(T)} + \text{CO}_2 = \text{MgCO}_3(T)$	-110825	120,16	298—1000
$\text{Na}_2\text{O}_{(T)} + \text{CO}_2 = \text{Na}_2\text{CO}_3(T)$	-297263	118,28	298—1123
$\text{Na}_2\text{O}_{(ж)} + \text{CO}_2 = \text{Na}_2\text{CO}_3(ж)$	-316564	130,92	1405—2273
$\text{Rb}_2\text{O}_{(T)} + \text{CO}_2 = \text{Rb}_2\text{CO}_3(T)$	-401933	145,70	298—873
$\text{SrO}_{(T)} + \text{CO}_2 = \text{SrCO}_3(T)$	-214783	141,68	973—1516
			(р)

Реакція	$\Delta G^\circ = M + NT$		Інтервал температури, К
	М, Дж	Н, Дж/К	
	<i>Карбіди</i>		
$4Al_{(ж)} + 3C_{(т)} = Al_4C_3(т)$	-265150	95,12	933—2473 (пл)
$4B_{(т)} + C_{(т)} = B_4C_{(т)}$	-41533	5,57	298—2303
$Ba_{(ж)} + 2C_{(т)} = BaC_2(т)$	-89597	2,09	402—1473
$2Be_{(т)} + C_{(т)} = Be_2C_{(т)}$	-93366	13,82	298—1560
$2Be_{(ж)} + C_{(т)} = Be_2C_{(т)}$	-115137	28,47	1560—2373
$Ca_{(ж)} + 2C_{(т)} = CaC_2(т)$	-60289	-26,29	1112—1757
$Ca + 2C_{(т)} = CaC_2(т)$	-210094	58,45	1760—2500
$2Ce_{(ж)} + 3C = Ce_2C_3(т)$	-188406	-14,65	1071—1473
$Ce_{(ж)} + 2C_{(т)} = CeC_2(т)$	-85285	-27,00	1071—2523 (пл)
$2Co_{(т)} + C_{(т)} = Co_2C_{(т)}$	16538	-8,71	298—1200
$4Cr_{(т)} + C_{(т)} = Cr_4C_{(т)}$	-96296	-11,72	298—1793 (пл)
$23Cr_{(т)} + 6C_{(т)} = Cr_{23}C_6(т)$	-309823	-77,46	298—1773
$7Cr_{(т)} + 3C = Cr_7C_3(т)$	-153656	-37,26	298—2130
$3Cr_{(т)} + 2C_{(т)} = Cr_3C_2(т)$	-79130	-17,67	298—2130
$3Fe_{(т)z} + C_{(т)} = Fe_3C_{(т)}$	29056	-28,05	298—1000
$3Fe_{(т)γ} + C_{(т)} = Fe_3C_{(т)}$	11242	-11,01	1000—1410
$2H_2 + C_{(т)} = CH_4$	-90225	109,53	500—2273
$Hf_{(т)} + C_{(т)} = HfC_{(т)}$	-230274	7,54	258—2273
$3Mn_{(ж)} + C_{(т)} = Mn_3C_{(т)}$	-13942	-1,09	298—1310 (пл)
$7Mn_{(т)} + 3C_{(т)} = Mn_7C_3(т)$	-127697	21,1	298—1473
$2Mo_{(т)} + C_{(т)} = Mo_2C_{(т)}$	-45636	-4,19	298—1373
$Mo_{(т)} + C_{(т)} = MoC_{(т)}$	-7536	-5,44	298—973
$2Nb_{(т)} + C_{(т)} = Nb_2C_{(т)}$	-193849	11,72	298—1773
$Nb_{(т)} + C_{(т)} = NbC_{(т)}$	-136992	2,43	298—1773
$3Ni_{(т)} + C_{(т)} = Ni_3C_{(т)}$	39775	-17,17	298—773
$Si_{(т)} + C_{(т)} = SiC_{(т)β}$	-73102	7,66	298—1693
$Si_{(ж)} + C_{(т)} = SiC_{(т)β}$	-122673	37,05	1685—2273
$2Ta_{(т)} + C_{(т)} = Ta_2C_{(т)}$	-200966	2,09	298—1973
$Ta_{(т)} + C_{(т)} = TaC_{(т)}$	-142351	1,2	298—1973
$Th_{(т)} + 2C_{(т)} = ThC_2(т)$	-125604	-8,37	298—2028
$Ti_{(т)} + C_{(т)} = TiC_{(т)}$	-184889	12,56	298—1943
$U_{(ж)} + C_{(т)} = UC_{(т)}$	-109694	1,84	1405—1973
$2U_{(ж)} + 3C_{(т)} = U_2C_3(т)$	-221900	2,5	1405—1973
$U_{(ж)} + 1,93C_{(т)} = UC_{1,93}(т)$	-90435	9,2	1405—1973
$2V_{(т)} + C_{(т)} = V_2C_{(т)}$	-146538	3,35	298—1973
$V_{(т)} + C_{(т)} = VC_{(т)}$	-102158	9,59	298—2273
$2W_{(т)} + C_{(т)} = W_2C_{(т)}$	-30564	-2,34	1575—1673
$W_{(т)} + C_{(т)} = WC_{(т)}$	-42287	4,98	1173—1575
$Zr_{(т)} + C_{(т)} = ZrC_{(т)}$	-196780	9,21	298—2123

Реакція	$\Delta G^\circ = M + NT$		Інтервал температури, К
	М, Дж	Н, Дж/К	
<i>Нітриди</i>			
$Al_{(ж)} + \frac{1}{2} N_2 = AlN_{(т)}$	-327282	111,41	933—2273
$B_{(т)} + \frac{1}{2} N_2 = BN_{(т)}$	-250789	87,67	298—2303
$3Ba_{(ж)} + N_2 = Ba_3N_{2(т)}$	-376058	274,70	1002—1273
$3Be_{(т)} + N_2 = Be_3N_{2(т)}$	-586152	185,52	298—1560
$3Be_{(ж)} + N_2 = Be_3N_{2(т)}$	-616716	203,35	1560—2473 (пл)
$C_{(т)} + \frac{1}{2} N_2 = CN$	433752	-99,69	298—2273
$3Ca_{(т)} + N_2 = Ca_3N_{2(т)}$	-435427	198,87	298—1112
$Ce_{(ж)} + \frac{1}{2} N_2 = CeN_{(т)}$	-488600	177,23	2273—2848
$2Cr_{(т)} + \frac{1}{2} N_2 = Cr_2N_{(т)}$	-99269	47,02	1273—1673
$Cr_{(т)} + \frac{1}{2} N_2 = CrN_{(т)}$	-113462	73,27	298—773
$4Fe_{(т)\gamma} + \frac{1}{2} N_2 = Fe_4N_{(т)}$	-33494	69,84	673—953
$La_{(т)} + \frac{1}{2} N_2 = LaN_{(т)}$	-297263	105,93	298—1193
$3Li_{(ж)} + \frac{1}{2} N_2 = Li_3N_{(т)}$	-200966	-159,52	454—1273
$3Mg_{(т)} + N_2 = Mg_3N_{2(т)}$	-460548	203,06	298—922
$2Mo_{(т)} + \frac{1}{2} N_2 = Mo_2N_{(т)}$	-60709	14,65	298—773
$2Nb + \frac{1}{2} N_2 = Nb_2N_{(т)}$	-251208	83,32	298—2673 (пл)
$Nb_{(т)} + \frac{1}{2} N_2 = NbN_{(т)}$	-230274	77,87	298—2323 (пл)
$3Si_{(т)} + 2N_2 = Si_3N_4_{(т)\alpha}$	-724316	315,27	298—1685
$3Si_{(ж)} + 2N_2 = Si_3N_4_{(т)\alpha}$	-875041	405,28	1685—1973
$Th_{(т)} + \frac{1}{2} N_2 = ThN_{(т)}$	-376812	86,25	298—2028
$3Th_{(т)} + 2N_2 = Th_3N_4_{(т)}$	-1314655	351,69	298—2028
$2Th_{(т)} + N_2 + \frac{1}{2} O_2 =$ $= Th_2N_2O_{(т)}$	-1281161	261,26	298—2028
$Ti_{(т)} + \frac{1}{2} N_2 = TiN_{(т)}$	-336535	93,32	298—1943
$U_{(т)} + \frac{1}{2} N_2 = UN_{(т)}$	-293076	80,81	298—1405
$V_{(т)} + 0,23 N_2 = VN_{0,46(т)}$	-129791	44,38	298—1973
$V_{(т)} + \frac{1}{2} N_2 = VN_{(т)}$	-214783	82,48	298—1619
$Y_{(т)} + \frac{1}{2} N_2 = YN_{(т)}$	-297263	99,65	298—1799
$Zr_{(т)} + \frac{1}{2} N_2 = ZrN_{(т)}$	-363833	92,11	298—2123



*Ентальпії і температури поліморфних перетворень ( $\Delta H_{пр}$ ),  
плавлення ( $\Delta H_{пл}$ ) і випаровування ( $\Delta H_{вип}$ )  
деяких металів і оксидів*

Речовина	Вид перетворення	Температура перетворення, К	Ентальпія перетворення Дж/моль (грамм-атом)	Речовина	Вид перетворення	Температура перетворення, К	Ентальпія перетворення Дж/моль (грамм-атом)
Al <sub>T</sub>	п	932	10670	Nb <sub>ж</sub>	к	5273	697100
Al <sub>ж</sub>	к	2773	324500	Ti <sub>α</sub>	т	1155	3350
V <sub>T</sub>	п	2300	22175	Ti <sub>T</sub>	п	1940	15500
V <sub>ж</sub>	к	4200	539300	Ti <sub>ж</sub>	к	3533	429150
V <sub>T</sub>	п	2185	17570	Cr <sub>T</sub>	п	2130	20930
V <sub>ж</sub>	к	3823	458900	Cr <sub>ж</sub>	к	2773	386000
W <sub>T</sub>	п	3650	35230	Cr <sub>α</sub>	т	998	2930
W <sub>ж</sub>	к	5800	766000	Cr <sub>T</sub>	п	1077	9200
Fe <sub>α</sub>	т	1033	5108	Cr <sub>ж</sub>	к	3200	314000
Fe <sub>β</sub>	т	1187	670	Zn <sub>T</sub>	п	693	7390
Fe <sub>γ</sub>	т	1664	837	Zn <sub>ж</sub>	к	1181	115388
Fe <sub>δ</sub>	п	1812	15190	Zr <sub>α</sub>	т	1143	4350
Fe <sub>ж</sub>	к	3343	375000	Zr <sub>T</sub>	п	2123	16750
Ca <sub>T</sub>	п	1123	8660	Zr <sub>ж</sub>	к	4700	582000
Ca <sub>ж</sub>	к	1765	149950	Al <sub>2</sub> O <sub>3T</sub>	п	2303	108860
Co <sub>T</sub>	п	1765	15230	B <sub>2</sub> O <sub>3T</sub>	п	723	23030
Co <sub>ж</sub>	к	3173	382700	V <sub>2</sub> O <sub>5T</sub>	п	943	65300
Si <sub>T</sub>	п	1686	50670	WO <sub>3T</sub>	п	1746	58400
Si <sub>ж</sub>	к	2873	303543	FeO <sub>T</sub>	п	1651	30980
Mg <sub>T</sub>	п	923	8950	CaO <sub>T</sub>	п	2873	79550
Mg <sub>ж</sub>	к	1390	128660	SiO <sub>2T</sub> (кварц)	п	1883	8540
Mn <sub>α</sub>	т	993	2220	SiO <sub>2T</sub> (крит-стобалит)	п	1986	12980
Mn <sub>β</sub>	т	1363	2220	SiO <sub>2T</sub> (тридимит)	п	1953	9000
Mn <sub>γ</sub>	т	1409	1800	MgO <sub>T</sub>	п	3073	77460
Mn <sub>T</sub>	п	1516	14640	MnO <sub>T</sub>	п	2058	54430
Mn <sub>ж</sub>	к	2368	224831	Cu <sub>2</sub> O <sub>T</sub>	п	1503	56100
Cu <sub>T</sub>	п	1356	13050	MoO <sub>3T</sub>	п	1068	49860
Cu <sub>ж</sub>	к	2843	332400	MoO <sub>3ж</sub>	к	1553	178870
Mo <sub>T</sub>	п	2880	27610	Nb <sub>2</sub> O <sub>5T</sub>	т	1763	125600
Ni <sub>T</sub>	п	1726	17610	TiO <sub>2T</sub>	п	2143	64900
Ni <sub>ж</sub>	к	3183	374300	ZrO <sub>2T</sub>	п	2973	87090
Nb <sub>T</sub>	п	2741	26360				

**Термодинамічні характеристики  
рідких розбавлених розчинів на основі заліза**

Розчинений елемент $i$	Коефіцієнт активності $\gamma_i(1873)$	Коефіцієнти рівняння $\Delta G = M + NT$ для реакції $i = [i]_{1\%}$ Дж/грамм-атом		Розчинений елемент $i$	Коефіцієнт активності $\gamma_i(1873)$	Коефіцієнти рівняння $\Delta G = M + NT$ для реакції $i = [i]_{1\%}$ Дж/грамм-атом	
		M	N			M	N
Al <sub>(ж)</sub>	0,029	-63221	-27,93	V <sub>(г)</sub>	0,1	-20725	-45,64
C <sub>(гр)</sub>	0,57	22609	-42,29	W <sub>(г)</sub>	1,2	31401	-63,64
Co <sub>(ж)</sub>	1,07	1005	-38,77	Zr <sub>(г)</sub>	0,043	-34750	-50,03
Cr <sub>(г)</sub>	1,14	19259	-46,89	$\frac{1}{2}$ H <sub>2</sub> (г)	—	36509	30,48
Cu <sub>(ж)</sub>	8,6	33494	-39,40	$\frac{1}{2}$ N <sub>2</sub> (г)	—	3600	23,91
Mn <sub>(ж)</sub>	1,3	4086	-38,18	$\frac{1}{2}$ O <sub>2</sub> (г)	—	-117230	-2,89
Ni <sub>(ж)</sub>	0,66	-20934	-31,07	$\frac{1}{2}$ P <sub>2</sub> (г)	—	-122254	-19,26
Si <sub>(ж)</sub>	0,0013	-131591	-17,25	$\frac{1}{2}$ S <sub>2</sub> (г)	—	-135150	23,45
Ti <sub>(г)</sub>	0,038	-31150	-45,01				

**Параметри взаємодії першого порядку для розчинів C, H, N, O і S в  
рідкому залізі при 1600 °C**

Елемент, X	$e_C^X$	$e_H^X$	$e_N^X$	$e_O^X$	$e_S^X$
Al	0,043	0,013	-0,028	-3,9	0,035
B	0,24	0,05	0,094	-2,6	0,13
C	0,14	0,06	0,13	-0,13	0,11
Co	0,008	0,002	0,011	0,008	0,003
Cr	-0,024	-0,002	-0,047	-0,04	-0,011
Cu	0,016	0,001	0,009	-0,013	-0,008
Mn	-0,012	-0,001	-0,002	-0,021	-0,026
Mo	-0,008	0,002	-0,011	0,004	0,003
N	0,11	—	0	0,057	0,01
Nb	-0,06	-0,002	-0,06	-0,14	-0,013
Ni	0,012	0	0,01	0,006	0
O	-0,34	-0,19	0,05	-0,20	-0,27
P	0,051	0,011	0,045	0,07	0,29
S	0,046	0,008	0,007	-0,133	-0,028
Si	0,08	0,027	0,047	-0,131	0,063
Sn	0,041	0,005	0,007	-0,011	-0,004
Ti	—	-0,019	-0,53	-0,31	-0,072
V	-0,077	-0,007	-0,093	-0,14	-0,016
W	-0,006	0,005	-0,002	-0,009	0,01
Zr	—	—	-0,63	(-3,0)	-0,052

## ЛІТЕРАТУРА, ЩО РЕКОМЕНДУЄТЬСЯ

1. Теорія металургійних процесів: підручник/В. Б. Охотський, О. Л. Костьолов, В. К. Симонов та ін. – К.: ІЗМН, 1997. – 512 с.
2. Теория металлургических процессов: Учебник для вузов/Д. И. Рыжонков, П. П. Арсентьев, В. В. Яковлев и др. – М.: Металлургия, 1989. – 392 с.
3. Теория металлургических процессов: Учебное пособие для вузов /С. И. Попель, А. И. Сотников, В. Н. Бороненков. – М.: Металлургия, 1986. – 463 с.
4. Гольдштейн Н. Л. Краткий курс теории металлургических процессов. – Свердловськ: Металлургиздат, 1961. – 334 с.