

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

**РОБОЧА ПРОГРАМА,**  
методичні вказівки та індивідуальні завдання  
до вивчення дисципліни “Теорія металургійних процесів”  
для студентів напрямів 136 – металургія,  
015 - ( )

**м. Дніпро НМетАУ**

## РОЗПОДІЛ НАВЧАЛЬНИХ ГОДИН

### дисципліни Теорія металургійних процесів

	Усього	семестр
		V
Усього часів за навчальним планом	60	60
у тому числі:		
Аудиторні заняття	8	8
з них:		
- лекції	4	4
- лабораторні заняття	4	4
- практичні заняття	-	-
- семінари	-	-
Самостійна робота	52	52
Кількість контрольних робіт	1	1
Підсумковий контроль	Диф. залік	

### ВСТУП

У сучасних умовах цілі металургії полягають в істотному поліпшенні якості еталу, додання металу нових функціональних властивостей із зменшенням техногенного впливу на навколишнє середовище. Рішення цих питань ожливо на основі тер одинамічних і кінетичних досліджень закономірностей технологічних процесів, розуміння закономірностей і зв'язків між параметрами процесів й їх результати.

Завдання курсу «Теорії металургійних процесів» навчитися застосовувати загальні закони хі ії, фізики й фізичної хімії до конкретних умов одержання металів з руд і подальшого переділу металу. Вивчення теорії металургійних процесів включає лекції по розділах курсу, самостійну роботу над підручниками, виконання лабораторного практикуму й індивідуального завдання. Виконані індивідуальні завдання повинні бути представлені для перевірки.

Рекомендується перед початком вивчення курсу теорії металургійних процесів повторити наступні розділи фізичної хімії:

1. Перший, другий, третій початок термодинаміки;
2. Закон Гесса і його застосування для обчислення теплових ефектів складних реакцій;
3. Правило Лє-Шательє в застосуванні до хімічних реакцій;
4. Вплив температури на тепловий ефект реакції, способи його розрахунку при різних температурах за термохімічним даними;
5. Вчення про фізико-хімічну рівновагу: поняття про рівноважний фізико-хімічний стан системи й залежності константи рівноваги від температури; закон розподілу речовин у двох дотичних рідинах; термодинамічні дослідження рівноважних систем і способи розрахунку констант рівноваги;
6. Правило фаз Гіббса.
7. Хімічна кінетика: поняття про швидкості хімічної реакції для гетерогенних і гомогенних систем; вплив різних факторів на швидкість хімічних реакцій (температури, тиску, каталізаторів і т.д.).

#### 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.
5. Лещинская Е. И. Термодинамика и основы кинетики металлургических процессов: Учебное пособие. – Днепропетровск: ДМетИ, 1981, –108 с.
6. Методические указания к лабораторному практикуму по дисциплине «Теория металлургических процессов» для студентов всех специальностей (часть 1) / Сост.: О.Л. Костелов, Л.В. Камкина. – Днепропетровск: ГМетАУ, 1997, - 41 с.
7. Методические указания к лабораторному практикуму по курсу «Теория металлургических процессов» для студентов всех специальностей. Часть 2. /

Сост.: Р.В. Анкудинов, Л.В. Камкина, В.К. Симонов и др.– Днепропетровск: ГМетАУ, 1997. - 45 с.

8. Методичні вказівки до виконання практичних робіт та індивідуальних завдань з дисципліни «Теорія металургійних процесів» для студентів напрямку 0904 - металургія / Укл.: О.Л. Костьолов, Л.В. Камкіна. – Дніпропетровськ : НМетАУ, 2003. – 41 с.
9. Справочник по расчетам равновесий металлургических реакций / Крестовников А.Н., Владимиров Л.П., Гуляницкий Б.С., Фишер А.Я. - М.: Металлургиздат, 1963. – 416 с.
10. Казачков Е. А. Расчеты по теории металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1988. – 288 с.

## ТЕМИ НАВЧАЛЬНОЇ ПРОГРАМИ

### *Тема 1. Теорія утворення й дисоціації складних хімічних сполук*

#### Питання навчальної програми

Сутність процесів дисоціації карбонатів, оксидів, сульфідів, фізико-хімічні особливості цих процесів. Поняття пружності дисоціації. Критерії міцності сполук – пружність дисоціації сполук, зміна вільної енергії Гіббса -  $\Delta G^0$ . Ряд хімічної спорідненості металів до кисню, його аналіз із погляду поводження їх в умовах металургійних агрегатів (відновлювальні й окислювальні плавки). Принцип ступінчастості перетворень у системі метал-кисень. Система залізо-кисень, діаграма стану цієї системи. Механізм й основи кінетики дисоціації карбонатів й оксидів. Послідовно сполучені ланки в складному гетерогенному процесі. Сутність і роль кожної ланки. Залежність спостережуваної швидкості процесу від швидкостей окремих її ланок.

Література: [1, С. 5-46; 2, С. 70-122; 3, С. 12-54; 4, С. 111-169; 5, С. 10-37].

#### Питання для самоперевірки

1. Які величини можуть служити мірою міцності карбонатів, оксидів?
2. Який фізичний вміст пружності дисоціації карбонатів, оксидів?
3. Як визначається величина пружності дисоціації і від яких факторів вона залежить?
4. Накреслить діаграму, що ілюструє залежність пружності дисоціації карбонату, оксиду від температури. Визначите напрямки реакції в кожній області, виявите умови утворення й дисоціації хімічної сполуки.

5. Який зв'язок між величиною пружності дисоціації й міцністю сполуки, між величиною пружності дисоціації й величиною  $\Delta G^0$  реакції утворення хімічної сполуки?
6. Напишіть реакції дисоціації карбонатів кальцію, магнію й заліза.
7. Які особливості процесу дисоціації карбонату заліза, доломіту? Область їхнього застосування.
8. Які оксиди утворюються в системі Fe-O? Напишіть реакції утворення оксидів, охарактеризуйте кожен оксид. Користуючись графіком залежності пружності дисоціації оксидів від температури, порівняйте їх міцність. Розгляньте можливі реакції в кожній області графіка, стійкі фази.
9. Розгляньте діаграму стану системи залізо-кисень і дайте фазову характеристику різних областей діаграми.
10. Як побудований ряд металів по спорідненості до кисню? На які питання можна одержати відповідь при аналізі ряду металів по спорідненості до кисню?
11. Як змінюється хімічна спорідненість вуглецю до кисню з підвищенням температури, чому вуглець є універсальним відновлювачем?
12. Користуючись графіком  $\Delta G^0 = f(t)$  для реакцій окислювання елементів, що використовуються в металургії, наведіть ряд елементів по спорідненості до кисню.
13. Розгляньте поведження елемента залежно від спорідненості до кисню в умовах доменної плавки, в умовах сталеплавильного агрегату.
14. З яких ланок складається процес дисоціації - утворення карбонатів, оксидів? Які ланки лімітують швидкість процесу при низьких і високих температурах?
15. Як структура, щільність і міцність оксидної плівки впливають на швидкість процесу окислювання?

## *Тема 2. Основи теорії горіння палива*

### Питання навчальної програми

Загальна характеристика процесів горіння палива залежно від умов, що створюються в металургійних агрегатах. Термодинамічний аналіз реакцій горіння в системах C-O, H-O, C-H-O. Порівняння хімічного споріднення CO і H<sub>2</sub> до кисню, порівняльна термодинамічна відновлювальна здатність цих газів, окислювальна здатність CO<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>O. Основи механізму горіння CO і H<sub>2</sub> і взаємодії кисню із твердим вуглецем.

Література: [1, С. 47-72; 2, С. 14-69; 4, С. 19-110; 5, С. 37-50].

### Питання для самоперевірки

1. Розгляньте види палива й методи їхнього застосування в чорній металургії.
2. Наведіть якісний склад продуктів горіння в доменній печі й розгляньте їхній вплив на доменний процес.
3. Розгляньте основні реакції в системах C-O, H-O та C-H-O. Визначте роль кожної реакції в умовах металургійних агрегатів.
4. Якими реакціями визначається рівноважний склад продуктів горіння, якщо процес відбувається: 1) в умовах надлишку вуглецю, 2) в умовах надлишку кисню?
5. Приведіть якісний склад продуктів горіння в мартенівській печі і їхній вплив на процес.
6. Розгляньте вплив температури на горіння вуглецю, горіння CO і H<sub>2</sub>, реакції газифікації вуглецю.
7. Порівняйте відновлювальну здатність CO і H<sub>2</sub>.
8. Викладіть сутність ланцюгового механізму реакцій горіння CO і водню.
9. Розгляньте механізм реакцій взаємодії вуглецю з киснем.

### *Тема 3. Основи теорії відновлювальної плавки*

#### Питання навчальної програми

Основні технологічні функції металургійних шлаків, класифікація шлаків по їхньому складу. Фізико-хімічна сутність металургійного відновлення: умови плину реакції у бік відновлення, види металотермічного відновлення. Термодинамічний аналіз процесів непрямого й прямого відновлення оксидів металів з різною спорідненістю до кисню. Термодинамічний аналіз процесів відновлення оксидів заліза оксидом вуглецю й воднем, а також твердим вуглецем.

Література: [1, С. 73-145; 2, С. 123-148; 3, С. 55-192; 4, С. 170-249; 5, С. 50-53, 67-83].

### Питання для самоперевірки

1. Які основні складові шлаків?
2. Розгляньте основні технологічні функції шлаків у металургійному агрегаті.
3. Розгляньте класифікацію металургійних шлаків по вмісту CaO й SiO<sub>2</sub>, по вмісту FeO.
4. Як впливає в'язкість металу й шлаку на швидкість їхньої взаємодії, повноту поділу.

5. Як впливає зміна температури на в'язкість кислих й основних шлаків?
6. Якими властивостями повинен володіти елемент, щоб бути відновлювачем іншого елемента?
7. Розгляньте сутність металотермічного відновлення, види металотермії, області застосування.
8. Розгляньте принцип ступінчастості вищих оксидів (принцип А. А. Байкова); дайте конкретні приклади такого процесу.
9. Розгляньте особливості відновлення оксидів заліза при температурах вище й нижче 570 °С.
10. Розгляньте реакції відновлення заліза з  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  оксидом вуглецю й воднем, наведіть діаграму, що ілюструє вплив температури на рівноважний склад газової фази всіх реакцій, проведіть аналіз перетворень в умовах кожної області діаграми.
11. Які сучасні погляди на механізм відновлення оксидів заліза газами?
12. Назвіть основні кінетичні типи процесів відновлення оксидів заліза газами.
13. Розгляньте вплив різних факторів (температури, тиску газової фази, розміру й пористості рудного зразка) на швидкість відновлення.

#### *Тема 4. Основи теорії окислювальної плавки*

##### **Питання навчальної програми**

Різновиди сталеплавильних процесів, особливості кожного процесу й способи постачання системи киснем. Загальні закономірності окислювальних процесів і поведінки різних елементів у сталеплавильній ванні. Сучасні погляди щодо форм існування кисню в металевій і шлаковій фазах. Способи визначення активності кисню в шлаку й металі. Залежність активності  $\text{FeO}$  у шлаку, що визначає активність кисню в металі, від основності й окислювальної здатності шлаків. Термодинаміка реакцій окислювання марганцю, кремнію, вуглецю. Розкислення стали: способи розкислення, сутність кожного способу, його недоліки й переваги, розповсюджені розкислювачі. Термодинамічний аналіз реакцій десульфурзації й дефосфорації металу, вплив температури, основності й окислювальної здатності шлаків на процес видалення сірки й фосфору з металу в шлак. Джерела водню й азоту, що потрапляють в метал, умови й методи дегазації стали.

Література: [1, С. 351-394; 2, С. 244-327; 3, С. 301-405; 4, С. 254-327; 5, С. 83-102].

### Питання для самоперевірки

1. Перелічить сучасні сталеплавильні процеси й дайте їх коротку характеристику.
2. Як впливає хімічна спорідненість елемента до кисню на його поведінку в сталеплавильній ванні?
3. Розгляньте найбільш імовірні форми існування кисню в металевій і шлаковій фазах.
4. Наведіть реакції окислювання марганцю, кремнію, зробіть термодинамічний аналіз реакцій; виявіть вплив основності, окислювальної здатності шлаків, температури на коефіцієнт розподілу марганцю й кремнію.
5. Зробіть термодинамічний аналіз реакцій окислювання вуглецю в сталеплавильній ванні; виведіть рівняння залежності вмісту кисню від вмісту вуглецю; розгляньте значення реакція для процесу.
6. Розгляньте сучасні шляхи інтенсифікації сталеплавильних процесів.
7. У чому полягає сутність дифузійного способу розкислення сталі, етапи розкислення, переваги та недоліки.
8. Викладіть сутність осаджуючого розкислення сталі, приведіть реакції розкислення, переваги й недоліки способу.
9. Розгляньте рівняння Стокса: виявіть, які фактори впливають на швидкість спливання продуктів розкислення. Укажіть шляхи зниження забруднення сталі неметалічними включеннями при розкисленні.
10. Як впливає сірка й фосфор на властивості металу?
11. У чому полягає сутність процесу десульфурації металу?
12. Які фактори впливають на видалення сірки? Проаналізуйте їхній вплив на коефіцієнт розподілу сірки.
13. Проаналізуйте основні фактори, що впливає на коефіцієнт розподілу фосфору.
14. Розгляньте поведінку сірки й фосфору в умовах доменної й сталеплавильної плавки.
15. Розгляньте джерела забруднення сталі газами (воднем й азотом) і шляхи дегазації металу.

### 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 °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),  $\Delta G^\circ = -8,3192 T \ln K_p$ . При переході до десятинних логарифмів одержуємо  $\Delta G^\circ = -19,155 T \lg K_p$ .

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	$Mn_{m\phi} + 1/2 O_2 = MnO_{m\phi}$ ,	$\Delta G^0_1 = -385186 + 73,73T$ , Дж/моль
+1	$Si_{m\phi} + O_2 = SiO_{2m\phi}$	$\Delta G^0_2 = -906442 + 175,64T$ , Дж/моль
+2	$Mn_{m\phi} = Mn_{жс}$	$\Delta G^0_3 = 14640 - 9,66T$ , Дж/моль
+2	$Mn_{жс} = [Mn]$	$\Delta G^0_4 = 4086 - 38,18T$ , Дж/моль
-1	$Si_{m\phi} = Si_{жс}$	$\Delta G^0_5 = 50670 + 30,05T$ , Дж/моль
-1	$Si_{жс} = [Si]$	$\Delta G^0_6 = -131591 - 17,25T$ , 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

$\Delta G^0 = -2\Delta G^0_1 + \Delta G^0_2 + 2\Delta G^0_3 + 2\Delta G^0_4 - \Delta G^0_5 - \Delta G^0_6 - 2\Delta G^0_7 + \Delta G^0_8 = -113577 + 26,17T$ . Звідки  $\Delta G^0 = -67177,6$  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  $T=1773$  К,  $K_p = 94,25$ .

Відповідь:  $\Delta G^0 = -67177,6$  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  $1000^\circ\text{C}$ , 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  $f_c = 1,33$  та  $a_c = [\%C] \cdot f_c = 1,33 \cdot 0,05 = 0,0665$ .

Відповідь: Активність вуглецю дорівнює 0,0665.

### 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 °C. 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 й 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 °C

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

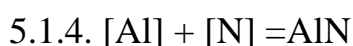
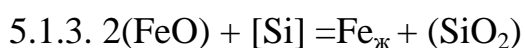
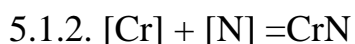
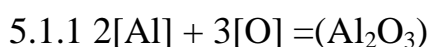
де *A* - остання цифра, *B* - передостання цифра в заліковій книжці студента

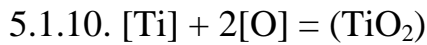
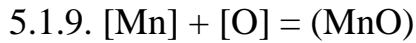
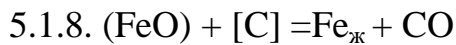
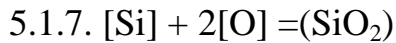
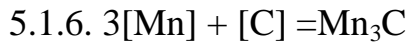
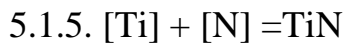
#### Завдання до п'ятого питання

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 °C.





## 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.,%):  $\text{CaO} = 35\%$ ,  $\text{MgO} = 7\%$ ,  $\text{FeO} = 12\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 30\%$ ,  $\text{MnO} = 13\%$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 = 3\%$ .



**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	
Оксиди			
$2\text{Al}_{\text{ж}} + \frac{3}{2} \text{O}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3$	-1687909	325,15	932—2303
$2\text{Al}_{\text{ж}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Al}_2\text{O}$	-170821	-49,40	933—2273
$2\text{Al}_{\text{ж}} + \text{O}_2 = \text{Al}_2\text{O}_2$	-47102	28,88	933—2273
$2\text{B}_{\text{т}} + \frac{3}{2} \text{O}_2 = \text{B}_2\text{O}_3$	-1246410	221,36	723—2300
$\text{B}_{\text{т}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{BO}$	-3806	-88,84	298—2303
$\text{Ba}_{\text{ж}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{BaO}_{\text{т}}$	-557933	94,83	983—1910
$\text{Be}_{\text{т}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{BeO}_{\text{т}}$	-598796	96,88	298—1556
$\text{Be}_{\text{ж}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{BeO}_{\text{т}}$	-606249	101,70	1556—2768
$2\text{Bi}_{\text{ж}} + \frac{3}{2} \text{O}_2 = \text{Bi}_2\text{O}_{3\text{ж}}$	-592348	295,71	544—1090
$\text{C}_{\text{т}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}$	-110560	-89,875	773—2273
$\text{C}_{\text{т}} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	-393260	-2,29	773—2273
$\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}_2$	-282695	87,585	773—2273
$\text{C}_{\text{т}} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$	172130	-177,46	773—2273
$\text{Ca}_{\text{ж}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CaO}_{\text{т}}$	-641836	110,20	1123—1765
$\text{Cd}_{\text{ж}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CdO}_{\text{т}}$	-278841	114,72	594—1040
$2\text{Ge}_{\text{т}} + \frac{3}{2} \text{O}_2 = \text{Ge}_2\text{O}_{3\text{т}}$	-1789229	286,80	298—1071
$\text{Ce}_{\text{т}} + \text{O}_2 = \text{CeO}_{2\text{т}}$	-1084381	211,98	298—1071
$\text{Ce}_{\text{ж}} + \text{O}_2 = \text{CeO}_{2\text{т}}$	-1078101	217,71	1077—2000
$\text{Co}_{\text{т}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CoO}_{\text{т}}$	-237308	72,72	298—1766
$\text{Co}_{\text{ж}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CoO}_{\text{т}}$	-261884	85,83	1766—2100
$3\text{Co}_{\text{т}} + 2\text{O}_2 = \text{Co}_3\text{O}_{4\text{т}}$	-957940	457,24	298—973
$2\text{Cr}_{\text{т}} + \frac{3}{2} \text{O}_2 = \text{Cr}_2\text{O}_{3\text{т}}$	-1110884	247,48	1173—1923
$3\text{Cr}_{\text{т}} + 2\text{O}_2 = \text{Cr}_3\text{O}_{4\text{т}}$	-1356104	264,82	1923—1938
$\text{Cr}_{\text{т}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CrO}_{\text{ж}}$	-334442	63,85	(пл) 1938—2023
$2\text{Cu}_{\text{т}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Cu}_2\text{O}_{\text{т}}$	-168519	71,30	298—1356
$2\text{Cu}_{\text{ж}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Cu}_2\text{O}_{\text{ж}}$	-146605	50,41	1502—2820
$\text{Cu}_{\text{т}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CuO}_{\text{т}}$	-159852	91,02	298—1356
$\text{Fe}_{\alpha} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{FeO}_{\text{т}}$	-262387	63,56	843—1184
$\text{Fe}_{\gamma} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{FeO}_{\text{т}}$	-263182	64,22	1184—1650
$\text{Fe}_{\gamma,\delta} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{FeO}_{\text{ж}}$	-228934	43,46	1650—1809
$\text{Fe}_{\text{ж}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{FeO}_{\text{ж}}$	-239987	49,57	1809—3000
$3\text{Fe}_{\text{т}} + 2\text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_{4\text{т}}$	-1105608	307,31	843—1809
$3\text{FeO}_{\text{т}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_{4\text{т}}$	-318065	127,84	298—1184
$2\text{Fe}_{\text{т}} + \frac{3}{2} \text{O}_2 = \text{Fe}_2\text{O}_{3\text{т}}$	-814374	248,82	298—1809
$\frac{2}{3} \text{Fe}_3\text{O}_{4\text{т}} + \frac{1}{6} \text{O}_2 = \text{Fe}_2\text{O}_{3\text{т}}$	-97795	56,7	298—1809

Реакція	$\Delta G^\circ = M + NT$		Інтервал температури, К
	М, Дж	N, Дж/К	
$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$	-246115	54,12	400—3000
$\text{Hf}_\alpha + \text{O}_2 = \text{HfO}_{2\text{T}}$	-1102259	174,25	1000—1973
$\text{Hf}_\beta + \text{O}_2 = \text{HfO}_{2\text{T}}$	-1083921	164,96	1973—2495
$2\text{K}_\text{ж} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{K}_2\text{O}_\text{T}$	-367224	157,88	336—1030
$2\text{La}_\text{T} + \frac{3}{2} \text{O}_2 = \text{La}_2\text{O}_{3\text{T}}$	-1789522	304,00	298—1153
$2\text{Li}_\text{ж} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Li}_2\text{O}_\text{T}$	-578825	135,86	500—1500
$\text{Mg}_\text{T} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{MgO}_\text{T}$	-601350	107,39	298—923
$\text{Mg}_\text{ж} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{MgO}_\text{T}$	-609350	116,06	923—1376
$\text{Mg} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{MgO}_\text{T}$	-728085	202,35	1376—3098
$\text{Mn}_\text{T} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{MnO}_\text{T}$	-385186	73,73	298—1517
$3\text{Mn}_\text{T} + 2\text{O}_2 = \text{Mn}_3\text{O}_{4\text{T}}$	-1385412	350,60	298—1516
$3\text{MnO}_\text{T} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Mn}_3\text{O}_{4\text{T}}$	-232267	117,06	1198—1813 (пл)
$2\text{Mn}_\text{T} + \frac{3}{2} \text{O}_2 = \text{Mn}_2\text{O}_{3\text{T}}$	-959070	259,54	298—1516
$\frac{2}{3} \text{Mn}_3\text{O}_{4\text{T}} + \frac{1}{6} \text{O}_2 = \text{Mn}_2\text{O}_{3\text{T}}$	-35085	28,09	1073—1273
$\text{Mn}_\text{T} + \text{O}_2 = \text{MnO}_{2\text{T}}$	-518954	177,19	298—1516
$\text{Mo}_\text{T} + \text{O}_2 = \text{MoO}_{2\text{T}}$	-584435	170,61	298—2500
$\text{Mo}_\text{T} + \text{O}_2 = \text{MoO}_{2\text{ж}}$	-545435	142,14	2500—2880
$\text{Mo}_\text{T} + \frac{3}{2} \text{O}_2 = \text{MoO}_{3\text{T}}$	-742194	247,10	298—1070
$\text{Mo}_\text{T} + \frac{3}{2} \text{O}_2 = \text{MoO}_3$	-664948	182,96	1070—1500
$\frac{1}{2} \text{N}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{NO}$	90477	12,69	298—2273
$\frac{1}{2} \text{N}_2 + \text{O}_2 = \text{NO}_2$	32322	63,30	298—2273
$2\text{Na}_\text{ж} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Na}_2\text{O}_\text{T}$	-421401	147,12	371—1405 (пл)
$2\text{Na} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Na}_2\text{O}_\text{ж}$	-519163	243,88	1405—2223 (пл)
$\text{Nb}_\text{T} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{NbO}_\text{T}$	-402067	81,10	1000—2218
$2\text{Nb}_\text{T} + \frac{5}{2} \text{O}_2 = \text{Nb}_2\text{O}_{5\text{T}}$	-1874539	410,89	1000—1785
$\text{Nb}_\text{T} + \text{O}_2 = \text{NbO}_{2\text{T}}$	-773302	160,15	1000—2270
$\text{Ni}_\text{T} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{NiO}_\text{T}$	-234503	85,28	298—1725
$\text{Ni}_\text{ж} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{NiO}_\text{T}$	-262303	108,77	1725—2200
$\frac{1}{2} \text{P}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{PO}$	-77860	-11,60	298—1973
$\frac{1}{2} \text{P}_2 + \text{O}_2 = \text{PO}_2$	-386023	16,29	298—1973
$4\text{P}_\text{кр} + 5\text{O}_2 = \text{P}_4\text{O}_{10}$	-2858915	699,61	631—704
$\text{P}_4 + 5\text{O}_2 = \text{P}_4\text{O}_{10}$	-3163965	975,94	1000—2000
$\text{Pb}_\text{ж} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{PbO}_\text{T}$	-218676	97,8	600—1159
$\text{Pb}_\text{ж} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{PbO}_\text{ж}$	-184931	69,08	1159—1765
$3\text{Pb}_\text{ж} + 2\text{O}_2 = \text{Pb}_3\text{O}_{4\text{T}}$	-702964	369,19	601—1473
$\text{Pb}_\text{ж} + \text{O}_2 = \text{PbO}_{2\text{T}}$	-27256	193,81	601—1173
$2\text{Rb}_\text{ж} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Rb}_2\text{O}_\text{T}$	-336116	145,07	312—910
$\frac{1}{2} \text{S}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{SO}$	-64351	-5,02	800—3000
$\frac{1}{2} \text{S}_2 + \text{O}_2 = \text{SO}_2$	-357134	72,52	800—3000
$\frac{1}{2} \text{S}_2 + \frac{3}{2} \text{O}_2 = \text{SO}_3$	-458203	163,45	718—2273
$2\text{Sb}_\text{ж} + \frac{3}{2} \text{O}_2 = \text{Sb}_2\text{O}_{3\text{ж}}$	-653559	216,96	928—1698
$\text{Si}_\text{T} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{SiO}$	-104251	-82,56	298—1685
$\text{Si}_\text{T} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2 \alpha\text{-кварц}$	-912237	180,74	298—848

Реакція	$\Delta G^\circ = M + NT$		Інтервал температури, К
	М, Дж	N, Дж/К	
$\text{Si}_T + \text{O}_2 = \text{SiO}_2 \beta\text{-кварц}$	-906555	174,05	848—1298
	-902536	170,95	1298—1690
$\text{Si}_T + \text{O}_2 = \text{SiO}_2\text{T}$ — кристобалит	-906442	175,64	298—1685
$\text{Sn}_{\text{ж}} + \text{O}_2 = \text{SnO}_{2\text{T}}$	-581756	204,82	505—1898
$\text{Sr}_{\text{ж}} + 1/2 \text{O}_2 = \text{SrO}_T$	-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
$\text{Ta}_T + 5/2 \text{O}_2 = \text{Ta}_2\text{O}_5\text{T}$	-2007152	401,56	1000—2150
$\text{Th}_T + 1/2 \text{O}_2 = \text{ThO}$	-66989	-52,75	1873—2273
$\text{Th}_T + \text{O}_2 = \text{ThO}_{2\text{T}}$	-1226732	180,03	1000—2028
$\text{Ti}_T + 1/2 \text{O}_2 = \text{TiO}_{\beta\text{T}}$	-511208	80,60	1000—1950
$\text{Ti}_T + \text{O}_2 = \text{TiO}_{2\text{T}}$ — рутил	-939535	175,76	1000—1950
$2\text{Ti}_T + 3/2 \text{O}_2 = \text{Ti}_2\text{O}_3\text{T}$	-1495106	251,21	1000—1950
$3\text{Ti}_T + 5/2 \text{O}_2 = \text{Ti}_3\text{O}_5\text{T}$	-2417004	414,41	1000—1950
$\text{U}_{\text{ж}} + \text{O}_2 = \text{UO}_{2\text{T}}$	-1089866	174,21	1406—3000
$4\text{U}_T + 9/2 \text{O}_2 = \text{U}_4\text{O}_{10}\text{T}$	-4494948	740,69	298—873
$3\text{U}_T + 4\text{O}_2 = \text{U}_3\text{O}_8\text{T}$	-3562966	652,97	298—873
$\text{U}_T + 3/2 \text{O}_2 = \text{UO}_{3\text{T}}$	-1227569	250,71	298—873
$\text{V}_T + 1/2 \text{O}_2 = \text{VO}_T$	-415666	81,18	298—2000
$2\text{V}_T + 3/2 \text{O}_2 = \text{V}_2\text{O}_{3\text{T}}$	-1231129	239,61	298—2185
$\text{V}_T + \text{O}_2 = \text{VO}_{2\text{T}}$	-706732	155,41	298—1633
			(пл)
$2\text{V} + 5/2 \text{O}_2 = \text{V}_2\text{O}_{5\text{ж}}$	-1464417	325,31	943—2185
$\text{W}_T + \text{O}_2 = \text{WO}_{2\text{T}}$	-585440	171,95	298—2000
$\text{W}_T + 3/2 \text{O}_2 = \text{WO}_{3\text{T}}$	-837821	245,68	298—1745
$2\text{Y}_T + 3/2 \text{O}_2 = \text{Y}_2\text{O}_{3\text{T}}$	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
$\text{Zr}_T + \text{O}_2 = \text{ZrO}_{2\text{T}}$	-1092754	183,80	298—2123

## Карбонати

$\text{BaO}_{(\text{T})} + \text{CO}_2 = \text{BaCO}_{3(\text{T})}$	-250915	147,17	1073—1333
$\text{CaO}_{(\text{T})} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_{3(\text{T})}$	-170577	144,19	973—1473
$\text{Li}_2\text{O}_{(\text{T})} + \text{CO}_2 = \text{Li}_2\text{CO}_{3(\text{ж})}$	-147962	78,80	993—1843
$\text{MgO}_{(\text{T})} + \text{CO}_2 = \text{MgCO}_{3(\text{T})}$	-110825	120,16	298—1000
$\text{Na}_2\text{O}_{(\text{T})} + \text{CO}_2 = \text{Na}_2\text{CO}_{3(\text{T})}$	-297263	118,28	298—1123
$\text{Na}_2\text{O}_{(\text{ж})} + \text{CO}_2 = \text{Na}_2\text{CO}_{3(\text{ж})}$	-316564	130,92	1405—2273
$\text{Rb}_2\text{O}_{(\text{T})} + \text{CO}_2 = \text{Rb}_2\text{CO}_{3(\text{T})}$	-401933	145,70	298—873
$\text{SrO}_{(\text{T})} + \text{CO}_2 = \text{SrCO}_{3(\text{T})}$	-214783	141,68	973—1516
			(р)

Реакція	$\Delta G^\circ = M + NT$		Інтервал температури, К
	М, Дж	N, Дж/К	
Карбіди			
$4\text{Al}_{(\text{ж})} + 3\text{C}_{(\text{т})} = \text{Al}_4\text{C}_{3(\text{т})}$	-265150	95,12	933—2473 (пл)
$4\text{B}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{B}_4\text{C}_{(\text{т})}$	-41533	5,57	298—2303
$\text{Ba}_{(\text{ж})} + 2\text{C}_{(\text{т})} = \text{BaC}_{2(\text{т})}$	-89597	2,09	402—1473
$2\text{Be}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{Be}_2\text{C}_{(\text{т})}$	-93366	13,82	298—1560
$2\text{Be}_{(\text{ж})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{Be}_2\text{C}_{(\text{т})}$	-115137	28,47	1560—2373
$\text{Ca}_{(\text{ж})} + 2\text{C}_{(\text{т})} = \text{CaC}_{2(\text{т})}$	-60289	-26,29	1112—1757
$\text{Ca} + 2\text{C}_{(\text{т})} = \text{CaC}_{2(\text{т})}$	-210094	58,45	1760—2500
$2\text{Ce}_{(\text{ж})} + 3\text{C} = \text{Ce}_2\text{C}_{3(\text{т})}$	-188406	-14,65	1071—1473
$\text{Ce}_{(\text{ж})} + 2\text{C}_{(\text{т})} = \text{CeC}_{2(\text{т})}$	-85285	-27,00	1071—2523 (пл)
$2\text{Co}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{Co}_2\text{C}_{(\text{т})}$	16538	-8,71	298—1200
$4\text{Cr}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{Cr}_4\text{C}_{(\text{т})}$	-96296	-11,72	298—1793 (пл)
$23\text{Cr}_{(\text{т})} + 6\text{C}_{(\text{т})} = \text{Cr}_{23}\text{C}_{6(\text{т})}$	-309823	-77,46	298—1773
$7\text{Cr}_{(\text{т})} + 3\text{C} = \text{Cr}_7\text{C}_{3(\text{т})}$	-153656	-37,26	298—2130
$3\text{Cr}_{(\text{т})} + 2\text{C}_{(\text{т})} = \text{Cr}_3\text{C}_{2(\text{т})}$	-79130	-17,67	298—2130
$3\text{Fe}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{Fe}_3\text{C}_{(\text{т})}$	29056	-28,05	298—1000
$3\text{Fe}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{Fe}_3\text{C}_{(\text{т})}$	11242	-11,01	1000—1410
$2\text{H}_2 + \text{C}_{(\text{т})} = \text{CH}_4$	-90225	109,53	500—2273
$\text{Hf}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{HfC}_{(\text{т})}$	-230274	7,54	258—2273
$3\text{Mn}_{(\text{ж})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{Mn}_3\text{C}_{(\text{т})}$	-13942	-1,09	298—1310 (пл)
$7\text{Mn}_{(\text{т})} + 3\text{C}_{(\text{т})} = \text{Mn}_7\text{C}_{3(\text{т})}$	-127697	21,1	298—1473
$2\text{Mo}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{Mo}_2\text{C}_{(\text{т})}$	-45636	-4,19	298—1373
$\text{Mo}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{MoC}_{(\text{т})}$	-7536	-5,44	298—973
$2\text{Nb}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{Nb}_2\text{C}_{(\text{т})}$	-193849	11,72	298—1773
$\text{Nb}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{NbC}_{(\text{т})}$	-136992	2,43	298—1773
$3\text{Ni}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{Ni}_3\text{C}_{(\text{т})}$	39775	-17,17	298—773
$\text{Si}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{SiC}_{(\text{т})}$	-73102	7,66	298—1693
$\text{Si}_{(\text{ж})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{SiC}_{(\text{т})}$	-122673	37,05	1685—2273
$2\text{Ta}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{Ta}_2\text{C}_{(\text{т})}$	-200966	2,09	298—1973
$\text{Ta}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{TaC}_{(\text{т})}$	-142351	1,2	298—1973
$\text{Th}_{(\text{т})} + 2\text{C}_{(\text{т})} = \text{ThC}_{2(\text{т})}$	-125604	-8,37	298—2028
$\text{Ti}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{TiC}_{(\text{т})}$	-184889	12,56	298—1943
$\text{U}_{(\text{ж})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{UC}_{(\text{т})}$	-109694	1,84	1405—1973
$2\text{U}_{(\text{ж})} + 3\text{C}_{(\text{т})} = \text{U}_2\text{C}_{3(\text{т})}$	-221900	2,5	1405—1973
$\text{U}_{(\text{ж})} + 1,93\text{C}_{(\text{т})} = \text{UC}_{1,93(\text{т})}$	-90435	9,2	1405—1973
$2\text{V}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{V}_2\text{C}_{(\text{т})}$	-146538	3,35	298—1973
$\text{V}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{VC}_{(\text{т})}$	-102158	9,59	298—2273
$2\text{W}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{W}_2\text{C}_{(\text{т})}$	-30564	-2,34	1575—1673
$\text{W}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{WC}_{(\text{т})}$	-42287	4,98	1173—1575
$\text{Zr}_{(\text{т})} + \text{C}_{(\text{т})} = \text{ZrC}_{(\text{т})}$	-196780	9,21	298—2123

Реакція	$\Delta G^\circ = M + NT$		Інтервал температури, К
	М, Дж	Н, Дж/К	
Нітриди			
$\text{Al}_{(\text{ж})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{AlN}_{(\text{т})}$	—327282	111,41	933—2273
$\text{B}_{(\text{т})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{BN}_{(\text{т})}$	—250789	87,67	298—2303
$3\text{Ba}_{(\text{ж})} + \text{N}_2 = \text{Ba}_3\text{N}_{2(\text{т})}$	—376058	274,70	1002—1273
$3\text{Be}_{(\text{т})} + \text{N}_2 = \text{Be}_3\text{N}_{2(\text{т})}$	—586152	185,52	298—1560
$3\text{Be}_{(\text{ж})} + \text{N}_2 = \text{Be}_3\text{N}_{2(\text{т})}$	—616716	203,35	1560—2473 (пл)
$\text{C}_{(\text{т})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{CN}$	433752	—99,69	298—2273
$3\text{Ca}_{(\text{т})} + \text{N}_2 = \text{Ca}_3\text{N}_{2(\text{т})}$	—435427	198,87	298—1112
$\text{Ce}_{(\text{ж})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{CeN}_{(\text{т})}$	—488600	177,23	2273—2848
$2\text{Cr}_{(\text{т})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{Cr}_2\text{N}_{(\text{т})}$	—99269	47,02	1273—1673
$\text{Cr}_{(\text{т})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{CrN}_{(\text{т})}$	—113462	73,27	298—773
$4\text{Fe}_{(\text{т})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{Fe}_4\text{N}_{(\text{т})}$	—33494	69,84	673—953
$\text{La}_{(\text{т})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{LaN}_{(\text{т})}$	—297263	105,93	298—1193
$3\text{Li}_{(\text{ж})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{Li}_3\text{N}_{(\text{т})}$	—200966	—159,52	454—1273
$3\text{Mg}_{(\text{т})} + \text{N}_2 = \text{Mg}_3\text{N}_{2(\text{т})}$	—460548	203,06	298—922
$2\text{Mo}_{(\text{т})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{Mo}_2\text{N}_{(\text{т})}$	—60709	14,65	298—773
$2\text{Nb} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{Nb}_2\text{N}_{(\text{т})}$	—251208	83,32	298—2673 (пл)
$\text{Nb}_{(\text{т})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{NbN}_{(\text{т})}$	—230274	77,87	298—2323 (пл)
$3\text{Si}_{(\text{т})} + 2\text{N}_2 = \text{Si}_3\text{N}_{4(\text{т})\alpha}$	—724316	315,27	298—1685
$3\text{Si}_{(\text{ж})} + 2\text{N}_2 = \text{Si}_3\text{N}_{4(\text{т})\alpha}$	—875041	405,28	1685—1973
$\text{Th}_{(\text{т})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{ThN}_{(\text{т})}$	—376812	86,25	298—2028
$3\text{Th}_{(\text{т})} + 2\text{N}_2 = \text{Th}_3\text{N}_{4(\text{т})}$	—1314655	351,69	298—2028
$2\text{Th}_{(\text{т})} + \text{N}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 =$ $= \text{Th}_2\text{N}_2\text{O}_{(\text{т})}$	—1281161	261,26	298—2028
$\text{Ti}_{(\text{т})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{TiN}_{(\text{т})}$	—336535	93,32	298—1943
$\text{U}_{(\text{т})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{UN}_{(\text{т})}$	—293076	80,81	298—1405
$\text{V}_{(\text{т})} + 0,23 \text{N}_2 = \text{VN}_{0,46(\text{т})}$	—129791	44,38	298—1973
$\text{V}_{(\text{т})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{VN}_{(\text{т})}$	—214783	82,48	298—1619
$\text{Y}_{(\text{т})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{YN}_{(\text{т})}$	—297263	99,65	298—1799
$\text{Zr}_{(\text{т})} + \frac{1}{2} \text{N}_2 = \text{ZrN}_{(\text{т})}$	—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>т</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>т</sub>	п	2300	22175	Ti <sub>т</sub>	п	1940	15500
V <sub>ж</sub>	к	4200	539300	Ti <sub>ж</sub>	к	3533	429150
V <sub>т</sub>	п	2185	17570	Cr <sub>т</sub>	п	2130	20930
V <sub>ж</sub>	к	3823	458900	Cr <sub>ж</sub>	к	2773	386000
W <sub>т</sub>	п	3650	35230	Ce <sub>α</sub>	т	998	2930
W <sub>ж</sub>	к	5800	766000	Ce <sub>т</sub>	п	1077	9200
Fe <sub>α</sub>	т	1033	5108	Ce <sub>ж</sub>	к	3200	314000
Fe <sub>β</sub>	т	1187	670	Zn <sub>т</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>т</sub>	п	2123	16750
Ca <sub>т</sub>	п	1123	8660	Zr <sub>ж</sub>	к	4700	582000
Ca <sub>ж</sub>	к	1765	149950	Al <sub>2</sub> O <sub>3т</sub>	п	2303	108860
Co <sub>т</sub>	п	1765	15230	B <sub>2</sub> O <sub>3т</sub>	п	723	23030
Co <sub>ж</sub>	к	3173	382700	V <sub>2</sub> O <sub>5т</sub>	п	943	65300
Si <sub>т</sub>	п	1686	50670	WO <sub>3т</sub>	п	1746	58400
Si <sub>ж</sub>	к	2873	303543	FeO <sub>т</sub>	п	1651	30980
Mg <sub>т</sub>	п	923	8950	CaO <sub>т</sub>	п	2873	79550
Mg <sub>ж</sub>	к	1390	128660	SiO <sub>2т</sub> (кварц)	п	1883	8540
Mn <sub>α</sub>	т	993	2220	SiO <sub>2т</sub> (крн-стобалит)	п	1986	12980
Mn <sub>β</sub>	т	1363	2220	SiO <sub>2т</sub> (три-димит)	п	1953	9000
Mn <sub>γ</sub>	т	1409	1800	MgO <sub>т</sub>	п	3073	77460
Mn <sub>т</sub>	п	1516	14640	MnO <sub>т</sub>	п	2058	54430
Mn <sub>ж</sub>	к	2368	224831	Cu <sub>2</sub> O <sub>т</sub>	п	1503	56100
Cu <sub>т</sub>	п	1356	13050	MoO <sub>3т</sub>	п	1068	49860
Cu <sub>ж</sub>	к	2843	332400	MoO <sub>3ж</sub>	к	1553	178870
Mo <sub>т</sub>	п	2880	27610	Nb <sub>2</sub> O <sub>5т</sub>	т	1763	125600
Ni <sub>т</sub>	п	1726	17610	TiO <sub>2т</sub>	п	2143	64900
Ni <sub>ж</sub>	к	3183	374300	ZrO <sub>2т</sub>	п	2973	87090
Nb <sub>т</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>(т)</sub>	0,1	—20725	—45,64
C <sub>(гр)</sub>	0,57	22609	—42,29	W <sub>(т)</sub>	1,2	31401	—63,64
Co <sub>(ж)</sub>	1,07	1005	—38,77	Zr <sub>(т)</sub>	0,043	—34750	—50,03
Cr <sub>(т)</sub>	1,14	19259	—46,89	$1/2$ H <sub>2</sub> (г)	—	36509	30,48
Cu <sub>(ж)</sub>	8,6	33494	—39,40	$1/2$ N <sub>2</sub> (г)	—	3600	23,91
Mn <sub>(ж)</sub>	1,3	4086	—38,18	$1/2$ O <sub>2</sub> (г)	—	—117230	—2,89
Ni <sub>(ж)</sub>	0,66	—20934	—31,07	$1/2$ P <sub>2</sub> (г)	—	—122254	—19,26
Si <sub>(ж)</sub>	0,0013	—131591	—17,25	$1/2$ S <sub>2</sub> (г)	—	—135150	23,45
Ti <sub>(т)</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

## ЗМІСТ

РОЗПОДІЛ НАВЧАЛЬНИХ ГОДИН ДИСЦИПЛІНИ ТЕОРІЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ.....	3
ВСТУП .....	4
ЛІТЕРАТУРА, ЩО РЕКОМЕНДУЄТЬСЯ.....	5
ТЕМИ НАВЧАЛЬНОЇ ПРОГРАМИ .....	6
ТЕМА 1. ТЕОРІЯ УТВОРЕННЯ Й ДИСОЦІАЦІЇ СКЛАДНИХ ХІМІЧНИХ СПОЛУК .....	6
ТЕМА 2. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ГОРІННЯ ПАЛИВА .....	7
ТЕМА 3. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ПЛАВКИ.....	8
ТЕМА 4. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ОКИСЛЮВАЛЬНОЇ ПЛАВКИ.....	9
ПРИКЛАДИ РІШЕННЯ ЗАДАЧ.....	10
ПИТАННЯ ДО ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ.....	13

Підписано до друку 20.05.09. Формат 60x84 1/16. Папір друк. Друк плоский.  
Облік.-вид. арк. 1,58. Умов. друк. арк. 1,56. Тираж 300 пр. Замовлення №

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

---

Редакційно-видавничий відділ НметАУ