МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету

О. В. Харченко

БЕЗКОКСОВА ТЕХНОЛОГІЯ

Методичні рекомендації
до лабораторних робіт
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальності G10 «Металургія» освітньо-професійних програм
«Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів»,
«Обробка металів тиском»

Затверджено
вченою радою ЗНУ
Протокол № 8 від 25.02.2025р.

Запоріжжя
2025

УДК 669.181
Х227

Харченко О. В. Безкоксова технологія : методичні рекомендації до лабораторних робіт для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності G10 «Металургія» освітньо-професійних програм «Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів», «Обробка металів тиском». Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2025. 55 с.

У методичних рекомендаціях подано теоретичні відомості про основні фізико-хімічні процеси безкоксової металургії заліза, зміст лабораторних робіт за курсом «Безкоксова технологія», основні вимоги до завдань і звітів за результатами їх виконання, контрольні питання. Видання призначене для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності G10 «Металургія» освітньо-професійних програм «Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів», «Обробка металів тиском».

Рецензент
Прутцьков Д. В., доктор хімічних наук, професор кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету

Відповідальний за випуск
Ю. О. Бєлоконь, доктор технічних наук, завідувач кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету

ЗМІСТ

ВСТУП 5
1 ОСНОВНІ ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ БЕЗКОКСОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ ЗАЛІЗА 7
1.1 Реакції відновлення заліза з оксидів 7
1.1.1 Відновлення газами 7
1.1.2 Відновлення вуглецем 19
1.1.3 Відновлення рудно-вугільних окатишів і брикетів твердим вуглецем 21
2.1.4 Відновлення заліза з розплаву 24
2 ІНСТРУКЦІЯ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ 28
2.1 Загальні положення 28
2.2 Вимоги безпеки перед початком роботи 30
2.3 Вимоги безпеки під час виконання роботи 31
2.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи 32
2.5 Вимоги безпеки в аварійній ситуації 32
3 ЗМІСТ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ 33
3.1 Лабораторна робота №1. Ознайомлення з інтерфейсом користувача програмного комплексу «Excalibur». Відновлення рідкого оксиду заліза воднем 33
3.1.1 Порядок виконання роботи 33
3.1.2 Звіт з лабораторної роботи №1 34
3.2 Лабораторна робота №2. Відновлення рідкого оксиду заліза монооксидом вуглецю 35
3.2.1 Порядок виконання роботи 35
3.2.2 Звіт з лабораторної роботи №2 36
3.3 Лабораторна робота №3. Відновлення рідкого оксиду заліза сумішшю водню і монооксиду вуглецю 37
3.3.1 Порядок виконання роботи 37
3.3.2 Звіт з лабораторної роботи №3 38
3.4 Лабораторна робота №4. Відновлення рідкого оксиду заліза метаном природного газу 39
3.4.1 Порядок виконання роботи 39
3.4.2 Звіт з лабораторної роботи №4 40
3.5 Лабораторна робота №5. Відновлення шихти при виробництві напівпродукту із застосуванням залізорудних окатишів, вапна і метану природного газу в якості відновника 41
3.5.1 Порядок виконання роботи 41
3.5.2 Звіт з лабораторної роботи №5 42
3.6 Лабораторна робота №6. Твердофазне пряме відновлення шихти при виробництві напівпродукту із застосуванням офлюсованого агломерату, окатишів, залізної руди, вапна і твердого вуглецю в якості відновника 43
3.6.1 Порядок виконання роботи 43
3.6.2 Звіт з лабораторної роботи №6 44

3.7 Лабораторна робота №7. Рідкофазне пряме відновлення при виробництві напівпродукту із застосуванням рідкої шихти: офлюсованого агломерату, окатишів, залізної руди, вапна і водню в якості відновника 45
3.7.1 Порядок виконання роботи 45
3.7.2 Звіт з лабораторної роботи №7 46
4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ 47
4.1 Контрольні питання до лабораторного заняття №1 47
4.2 Контрольні питання до лабораторного заняття №2 47
4.3 Контрольні питання до лабораторного заняття №3 48
4.4 Контрольні питання до лабораторного заняття №4 49
4.5 Контрольні питання до лабораторного заняття №5 49
4.6 Контрольні питання до лабораторного заняття №6 50
4.7 Контрольні питання до лабораторного заняття №7 51
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА 52
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА 52

ВСТУП

Дисципліна «Безкоксова технологія» розглядає комплекс питань, що стосуються технологічних, фізико-хімічних та техніко-економічних аспектів виробництва чавуну та сталі безкоксовими методами.

В курсі «Безкоксова технологія» викладаються фундаментальні та прикладні знання для проведення різноманітних досліджень та вирішення задач: отримання напівпродуктів чавуну і сталі методами твердофазного і рідкофазного відновлення залізовмісної шихти із застосуванням водню, твердого вуглецю і вуглеводневих газів; вивчення сучасних тенденцій щодо розробки та впровадження нових і вдосконалення існуючих технологічних схем і процесів безкоксової металургії.

Курс «Безкоксова технологія» розрахований на здобувачів денної та заочної форми ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності G10 «Металургія» освітньо-професійних програм «Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів», «Обробка металів тиском».

Основна **мета дисципліни** – надання студентам уявлень про історію розвитку та сучасний стан виробництва чавуну та сталі безкоксовими методами; формування знань теоретичних основ і навичок щодо практичного здійснення безкоксових технологій; підготовка фахівця для виробничої, технологічної і дослідницької діяльності у сфері безкоксової технології.

Основними **завданнями** вивчення **дисципліни** є оволодіння здобувачами знаннями з процесів вироблення чавуну та сталі безкоксовими методами, вивчення фізико-хімічних закономірностей і технологічних особливостей процесів безкоксової металургії.

У виданні наведено фізико-хімічні основи безкоксової металургії заліза, а також розглянуті конструкції та технології сучасних промислових методів, які знайшли використання у світовій практиці виробництва метала в останній чверті XX та на початку XXI сторіччя. На основі узагальнення існуючих техніко-економічних даних та експертних оцінок спеціалістів розглянутий прогноз розвитку безкоксової металургії, у тому числі міні-металургійних заводів, які використовують в якості вихідної сировини її продукцію.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

– знати: основні процеси безкоксової металургії сталі та чавуну; вимоги до сировини; технології сучасних процесів безкоксової металургії; фізико-хімічні процеси відновлення заліза воднем, вуглецем і вуглеводневими газами; властивості металізованого продукту; можливості ресурсо- та енергозбереження при застосуванні безкоксових технологій.

– вміти: розрахувати оптимальний склад шихти для отримання продукту з заданими властивостями; виконувати термодинамічний аналіз процесів безкоксової металургії.

В результаті вивчення навчальної дисципліни «Безкоксова технологія» здобувач повинен набути таких **результатів навчання (компетентностей):**

– Здатність застосовувати системний підхід до вирішення проблем безкоксової металургії.

– Здатність вирішувати типові інженерні завдання відповідно до спеціалізації.

– Критичне осмислення наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів, необхідних для професійної діяльності в сфері безкоксової металургії.

– Здатність застосовувати і інтегрувати знання на основі розуміння інших інженерних спеціальностей.

– Здатність застосовувати наукові і інженерні методи, а також комп'ютерне програмне забезпечення для вирішення типових та комплексних завдань безкоксової металургії, у тому числі в умовах невизначеності.

– Усвідомлення характеристик специфічних матеріалів, обладнання, процесів та продуктів безкоксової металургії.

– Здатність управляти комплексними діями або проектами відповідно до спеціалізації для забезпечення досягнення поставленої мети з урахуванням всіх аспектів вирішуваної проблеми, у тому числі пов'язаних із виробництвом, експлуатацією, технічним обслуговуванням та утилізацією.

– Здатність забезпечувати якість продукції безкоксової металургії.

– Усвідомлення вимог до діяльності в сфері спеціалізації, зумовлених необхідністю забезпечення сталого розвитку.

– Здатність реалізовувати концепції ощадливого виробництва та загальні принципи зниження виробничих витрат у безкоксової металургії, а також впроваджувати ресурсозберігаючі технології, які дозволяють акумулювати ресурси, спрямовані на досягнення цілей в усіх напрямках діяльності металургійного підприємства.

Навчальна дисципліна «Безкоксова технологія» продовжує фахову підготовку здобувача і базується на знаннях, отриманих при вивченні таких дисциплін, як: «Хімічна термодинаміка», «Сировинні матеріали та їх підготовка до металургійного виробництва», «Теорія металургійних процесів», «Конструкція металургійних агрегатів» та ін.

Лабораторні роботи курсу виконуються із застосуванням багатофункціональної програми «EXCALIBUR» для термодинамічного аналізу процесів в системах «метал-шлак-газ» з урахуванням теплоти хімічних реакцій, ентальпійного теплового балансу і розрахунку різних варіантів відновлення залізорудних матеріалів. Лабораторні заняття є важливою складовою частиною засвоєння навчального матеріалу з дисципліни «Безкоксова технологія».

Видання допоможе здобувачам засвоїти теми, що передбачені силабусом навчальної дисципліни «Безкоксова технологія», насамперед, основні фізико-хімічні процеси безкоксової металургії заліза.

Курсом передбачені контрольні питання для самоконтролю студентів.

1 ОСНОВНІ ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ БЕЗКОКСОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ ЗАЛІЗА

1.1 Реакції відновлення заліза з оксидів

Відновниками в процесах безкоксової металургії можуть бути нагріті гази, зазвичай суміші водню та монооксида вуглецю, а також різні види твердого палива. Відновлювальні гази звичайно одержують конверсією природного газу. Найпоширенішою є конверсія природного газу діоксидом вуглецю, водяною парою або киснем.

Відновлення твердим вуглецем зазвичай застосовують у трубчастих обертових печах.

При відновленні газом одержують більш чистий продукт, оскільки газ не вносить золу і якщо виникає потреба, то його можна заздалегідь очистити від сірки.

Процеси відновлення воднем, монооксидом вуглецю і твердим вуглецем – це складні фізико-хімічні процеси, оскільки у змінних умовах здійснюються взаємопов'язані та взаємообумовлені перетворення як з термодинамічних, так і з кінетичних позицій.

1.1.1 Відновлення газами

Відновлення воднем. Реакції відновлення воднем при температурі вище за 570 °С та їхні характеристики представлені у табл. 1.1.

Нижче температури 570 °С відновлення магнетиту проходить в одну стадію:

$$Fe_3O_4 + 4H_2 \leftrightarrow 3Fe + 4H_2O$$

Лише на першому ступені відновлення воднем Fe_2O_3 до Fe_3O_4 реакція є слабо екзотермічною і проходить із виділенням тепла; на наступних ступенях ця реакція, а також сумарні реакції відновлення Fe_2O_3 і Fe_3O_4 до заліза є ендотермічними, тобто вимагають підведення тепла. При виконанні теплових розрахунків разом із теплом на проведення реакції слід враховувати тепло, що витрачається на нагрів вихідних матеріалів до температури процесу.

Стехіометричні показники водню у вище наведеній формулі вказують на його витрату лише на реакції відновлення, тобто кількість водню, що перетворюється в H_2O при відновленні. Фактично для проведення процесу відновлення слід подавати більшу кількість газу зі врахуванням надлишку, який необхідний за умов рівноваги для протікання процесу. Надлишок водню, що подається на відновлення, залежить від температури процесу і схеми його проведення.

Для відображення необхідності подачі надлишку відновника формулу відновлення записують у вигляді:

$$Fe_2O_3 + nH_2 = 2Fe + 3H_2O + (n–3)H_2$$

Таблиця 1.1

Склад рівноважних газових сумішей та мінімальна кількість H_2 для реакцій відновлення окислів заліза воднем

Крива на рис. 1.1	Реакція та її тепловий ефект при стандартних умовах (тиск дорівнює 1атм., температура 25^0 С)	Показники	Температура, ^{0}С							
			600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
3а	$FeO+H_2=Fe+H_2O$ – 6690 кал	Склад рівноважної газової фази, %:								
		H_2O	23,9	29,9	34,0	38,1	41,1	42,6	44,5	46,2
		H_2	76,1	70,1	66,0	61,9	58,9	57,4	55,5	53,8
		Мінімальна кількість газу для відновлення, моль/атом Fe:								
		n=100/% $H_2O_{рівн}$	4,18	3,34	2,94	2,62	2,37	2,32	2,25	2,16
2а	$Fe_3O_4+H_2=3FeO+$ $+H_2O$ – 15190 кал або – 5060 кал/атом Fe	Склад рівноважної газової фази, %:								
		H_2O	30,1	54,2	71,3	82,3	89,0	92,7	95,2	96,9
		H_2	69,9	45,8	28,7	17,7	11,0	7,3	4,8	3,1
		Мінімальна кількість газу для відновлення, моль/атом Fe:								
		n=133,3/% $H_2O_{рівн}$	4,43	2,46	1,87	1,62	1,50	1,44	1,40	1,38
Лінія сумарної реакції	$Fe_2O_3+nH_2=2Fe+$ $+3H_2O+$ $+(n-3)H_2$ – 21770 кал або – 10880 кал/атом Fe	Мінімальна кількість газу для ступінчастого відновле-ння в противотоці:								
		n, моль газу/моль окислу	8,86	6,68	5,88	5,24	4,74	4,64	4,50	4,32
			1,77	1,34	1,18	1,05	0,95	0,93	0,90	0,86

Джерело: складено за матеріалами [2, с. 16]

В основному величина коефіцієнту *n* залежить від рівноваги реакції відновлення закису заліза. Тому надмірна кількість водню у порівнянні зі стехіометричною однакова для Fe_2O_3 та Fe_3O_4 (із розрахунку на 1 атом заліза).

З підвищенням температури відновлення, як це випливає із кривих рівноваги, зображених на рис. 1.1, відновна здатність водню (тобто теоретично можливий ступінь його використання) підвищується і величина коефіцієнту n зменшується. Розраховані мінімальні витратні коефіцієнти водню на відновлення наведені у табл. 1.1. З розрахунку на одиницю маси заліза теоретична витрата газу складає 0,2*n* $м^3$/кг.

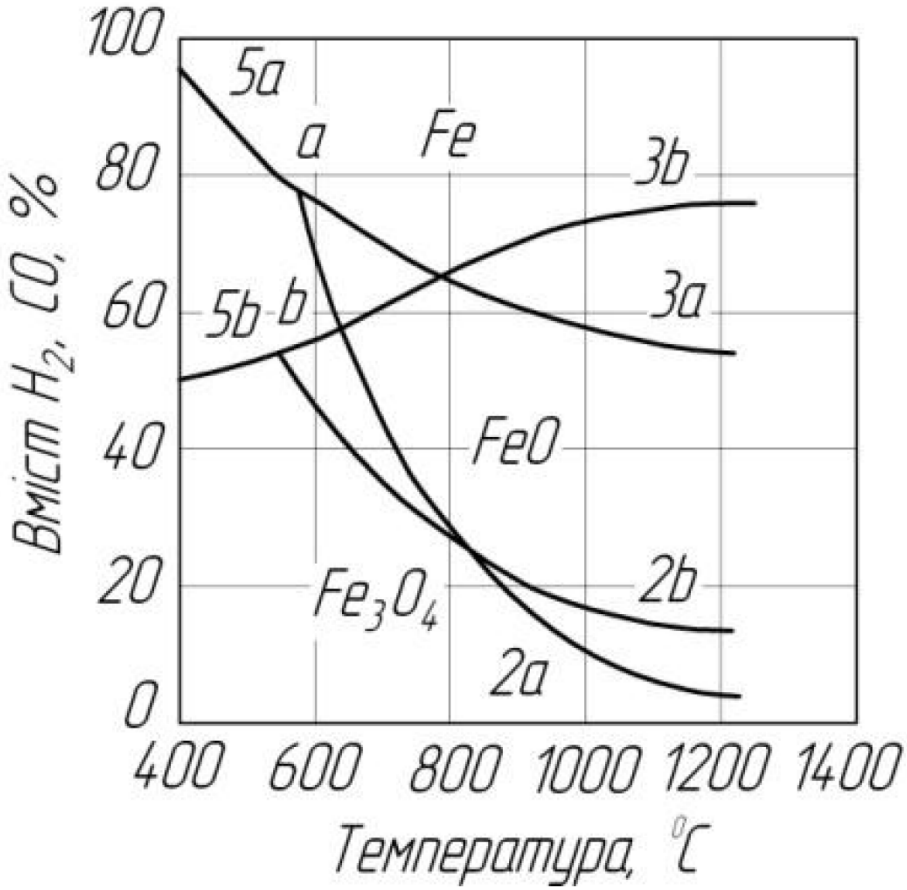


Рисунок 1.1 – Діаграма рівноваги реакцій відновлення окислів заліза воднем та окисом вуглецю:
a – вміст H_2 в суміші $H_2 + H_2O$;
b – вміст CO в суміші $CO + CO_2$

Джерело: [2, с. 18]

З рис. 1.1 видно, що групи кривих, які відповідають відновленню монооксидом вуглецю і воднем, перетинаються при температурі 810 °С, що відповідає рівновазі реакції водяного газу $H_2O + CO = H_2 + CO_2$. Нижче за температуру 810 °С хімічна спорідненість монооксиду вуглецю до кисню є вищою, в рівновазі з відповідними оксидами заліза знаходиться газова суміш $CO + CO_2$ з меншим вмістом CO у ній, ніж вміст H_2 у рівноважній газовій суміші $H_2 + H_2O$. Вище за 810 °С, навпаки, водень за умов рівноваги може бути використаний в реакції відновлення у більшому ступені.

Відновлення газами (H_2 і CO) проходить без зміни їх об'єму, і тому зміна загального тиску не змінює рівноважні співвідношення.

В залежності від конструкції установок і організації процесу (прямотечія, протитечія, ступінчастість обробки газом рудних матеріалів) фактичні витрати у реальних умовах можуть наближатися до наведених у табл. 1.1 показників. Стехіометрична витрата газу, тобто повне його використання при відновленні до заліза, може бути досягнута лише при циркуляції його з проміжним відмиванням від H_2O або регенерацією.

Кінетично водень загалом є активнішим відновником, ніж монооксид вуглецю, внаслідок його більшої дифузійної здатності.

Відновлення монооксидом вуглецю. Відновлення монооксидом вуглецю протікає по реакціях, наведених у табл. 1.2. На відміну від відновлення воднем при відновленні монооксидом вуглецю на всіх ступенях, за винятком відновлення магнетиту до вюститу, виділяється тепло; екзотермічні сумарні реакції відновлення гематиту і магнетиту до металічного заліза. Відмінністю монооксиду вуглецю від водню є також можливість мимовільного перетворення його в окислювальний газ CO_2 шляхом розпаду та навуглецьовування заліза (рис. 1.2).

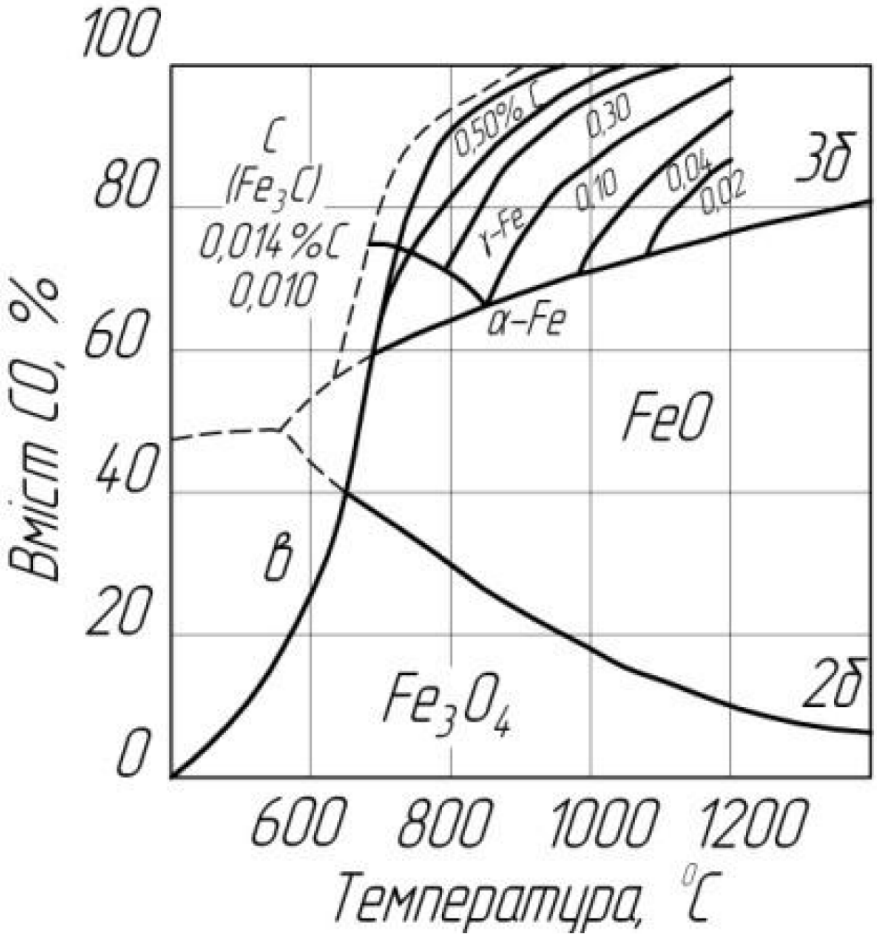


Рисунок 1.2 – Діаграма рівноваги реакцій відновлення окислів заліза окисом вуглецю, газифікації вуглецю та цементації

Джерело: [2, с. 19]

Витрата монооксиду вуглецю на відновлення оксидів заліза із врахуванням його стехіометричної витрати на реакції і рівноважного співвідношення наведені у табл. 1.2. Оскільки при відновленні оксидів кожна молекула і водню і монооксиду вуглецю приєднує один атом кисню, стехіометрична витрата газів у реакціях відновлення однакова. Різниця у витратних показниках виникає внаслідок відмінності у рівноважних співвідношеннях.

Аналогічно до відновлення воднем, при відновленні монооксидом вуглецю до заліза використовувати весь монооксид вуглецю неможливо.

Тільки при частковому відновленні в умовах протитечії (тобто при ступінчастому відновленні) можна досягти 100 % - вого перетворення монооксиду вуглецю у діоксид.

Якщо поставити задачу повного використання відновника в процесі, то такий ідеальний процес (рис. 1.3) можна уявити собі як двохстадійний: попереднє відновлення при 900 °С і остаточне відновлення.

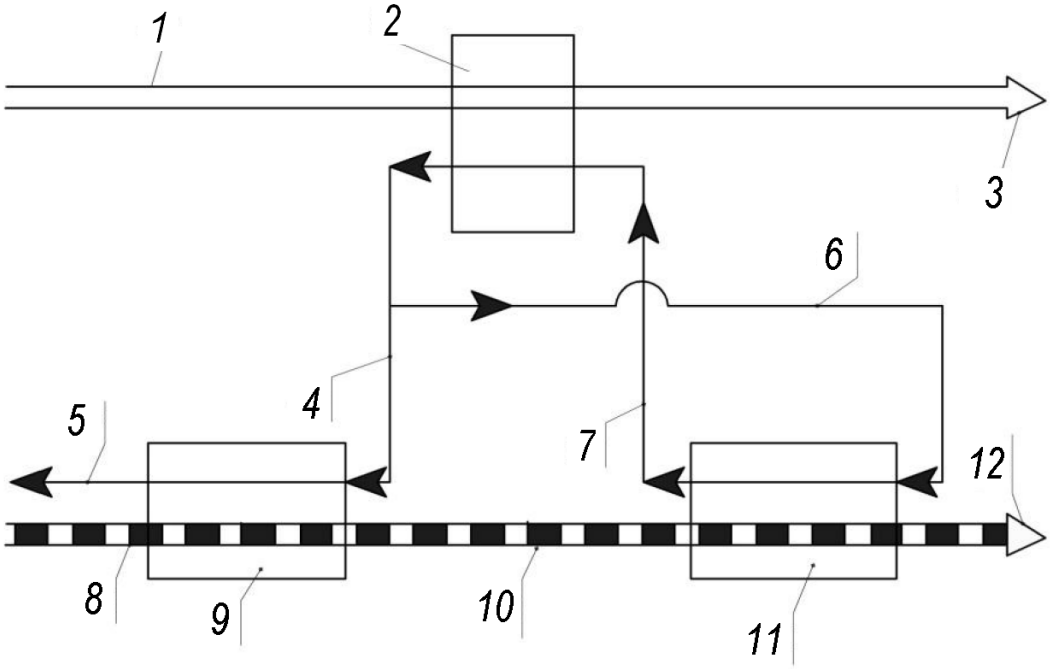


Рисунок 1.3 – Схема ідеального процесу відновлення оксидом вуглецю: 1 – кокс; 2 – регенератор газу; 3 – зола коксу; 4 – потік CO на попереднє відновлення (23,5 %); 5 – CO_2 в атмосферу; 6 – потік CO на кінцеве відновлення (76,5 %); 7 – потік суміші CO і CO_2 (53 частини CO – 23,5 частини CO_2) на генерацію; 8 – руда; 9 – реактор попереднього відновлення; 10 – попередньо відновлена руда (ступінь відновлення 48 %); 11 – реактор кінцевого відновлення; 12 – залізна губка (ступінь відновлення 90 %)

Джерело: складено за матеріалами [2, с. 22]

Для обох стадій використовують свіжий газ-відновник, тобто чистий монооксид вуглецю, який одержують із газів другої стадії процесу, що відходять, шляхом його регенерації (відновлення вуглекислого газу вуглецем).

На обох стадіях від руди віднімаються однакові кількості кисню.

Таблиця 1.2

Склади рівноважних газових сумішей та мінімальна кількість CO для реакції відновлення окислів заліза окисом вуглецю

Крива на рис. 1.1 та 1.2	Реакція та її тепловий ефект при стандартних умовах	Показники	Температура, ^{0}C							
			600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
3б	$FeO+CO=Fe+CO_2+3150$ кал	Склад рівноважної газової суміші, %:								
		CO_2	47,2	40,0	34,7	31,5	28,4	26,2	24,3	22,9
		CO	52,8	60,0	65,3	68,5	71,6	73,8	75,7	77,1
		Мінімальна кількість газу для відновлення $n_{3б}$=100% $CO_{2\ рівн}$ моль/г-атом Fe	2,11	2,50	2,88	3,18	3,52	3,82	4,10	4,35
2б	$Fe_3O_4+CO=3FeO+CO-5350$ кал	Склад рівноважної газової фази, %:								
		CO_2	55,2	64,8	71,9	77,6	82,2	85,9	88,9	91,5
		CO	44,8	35,2	28,1	22,4	17,8	14,1	11,1	8,5
		Мінімальна кількість газу для відновлення $n_{2б}$=133,3/$CO_{2рівн}$ моль/г-атом Fe	2,42	2,10	1,86	1,72	1,62	1,57	1,50	1,46
Лінія сумарної реакції	$Fe_2O_3+nCO=2Fe+3CO_2+(n-3)CO+15050$ кал	Мінімальна кількість газу для ступінчатого відновлення в противотоці:								
		n моль газу на моль окислу	4,84	5,00	5,76	6,36	7,04	7,64	8,20	8,70
		$м^3$ газу на 1 кг Fe, рівна 0,2n	0,97	1,00	1,15	1,27	1,41	1,53	1,64	1,74

Джерело: складено за матеріалами [2, с. 21]

Відновлення при такому ідеальному процесі показане на рис.1.4, на якому зображено ізотерми віддачі кисню рудою і зміни складу газу в залежності від ступеня відновлення. Склад газу, що подається на попереднє відновлення, змінюється в залежності від ступеня відновлення (1). CO тут повністю перетворюється у CO_2, досягається ступінь відновлення гематиту 48 %. На стадії остаточного відновлення склад газу змінюється (2), рівновага при температурі 900 °C досягається при масовій частці CO 69 % у відхідному газі, остаточний ступінь відновлення складає 96 %. Крива (3) відповідає регенерації газу, що виходить після остаточного відновлення. Цей газ потім розділяється на два потоки: один, що спрямовується на остаточне відновлення (76,5 %), і другий, що спрямовується на попереднє відновлення (23,5 %).

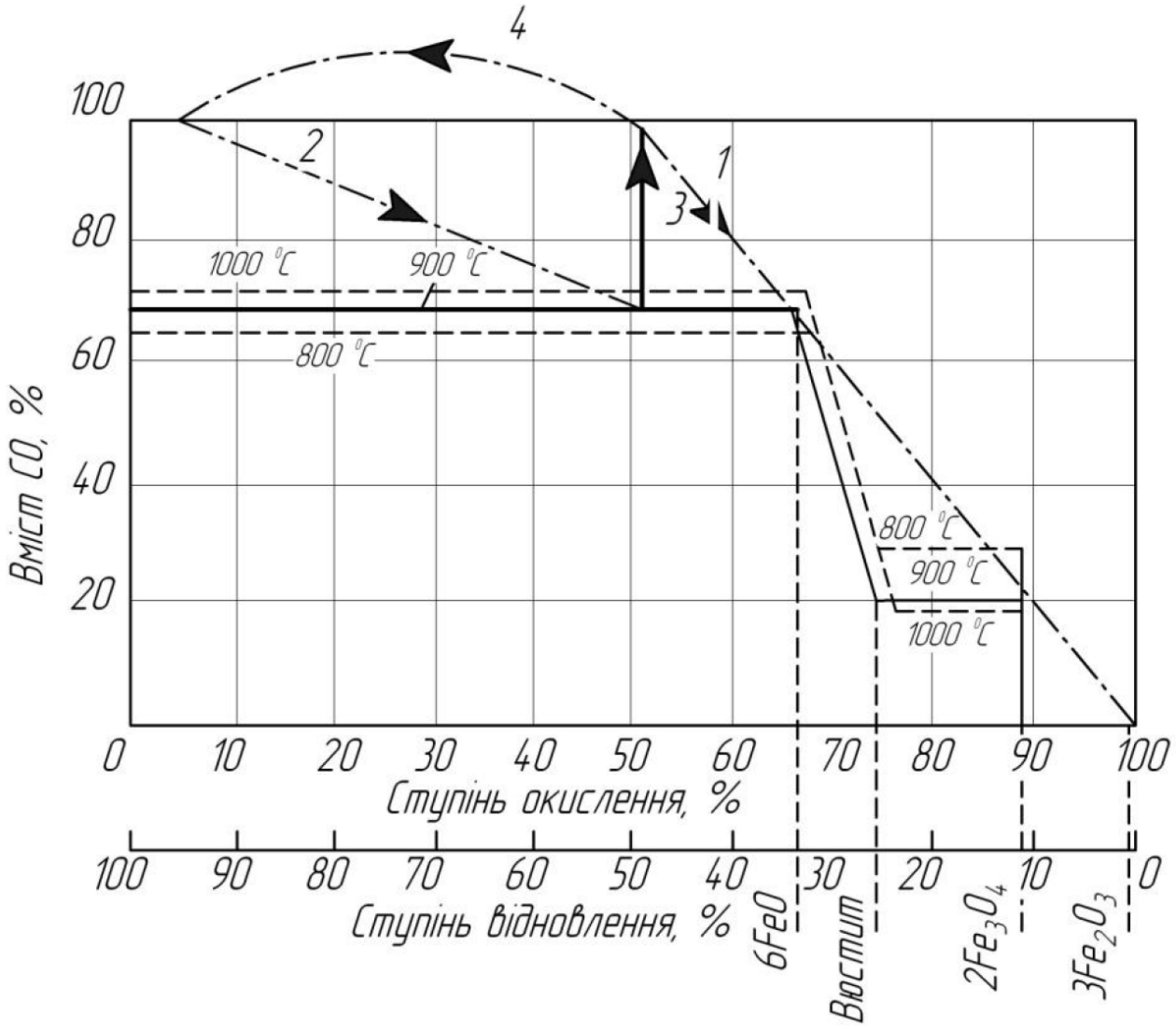


Рисунок 1.4 – Відновлення оксидом вуглецю при ідеальному процесі:
1 – попереднє відновлення (23,5 %); 2 – кінцеве відновлення;
3 – регенерація; 4 – циркуляційний газ (76,5 %) CO

Джерело: складено за матеріалами [2, с. 23]

Таким чином, у даному процесі відновлення проходить у протитечії та ступінчасто; на обох стадіях використовується чистий відновник; після остаточної стадії відновлення газ відбирається на регенерацію; газ, що скидається в атмосферу після попередньої стадії відновлення, являє собою CO_2.

Для процесу вуглець витрачається тільки в регенераторі, при цьому в результаті відновлення він перетворюється на діоксид вуглецю, тобто витрачається він у мінімальних кількостях. На газифікацію вуглецю у регенераторі та нагрів руди до температури процесу також витрачається тепло. Цей метод може набути практичного значення при безпосередньому використанні тепла високотемпературних ядерних реакторів.

Відновлення газовими сумішами. При дослідженні ступінчастого відновлення газовою сумішшю в протитечії були виконані розрахунки мінімально необхідної кількості газу-відновника. Ця кількість залежить від складу газової суміші та температури на окремих ступенях відновлення.

Розрахунки показують, що для сумішей $CO + H_2$, що містять більше ніж 50 % H_2 мінімально необхідна кількість газу для відновлення FeO з підвищенням температури зменшується; якщо в суміші знаходиться більше половини CO, то з підвищенням температури вона збільшується.

Мінімально необхідна для відновлення кількість газу при температурі вище 600-700 °C визначається рівновагою реакції відновлення закису заліза. Для нижчих температур ця кількість може також визначатися рівновагою відновлення Fe_3O_4 до FeO. Тому при змозі незалежного регулювання температури для кожної стадії відновлення слід враховувати обидві реакції.

Якщо відновлення на всіх стадіях здійснюється за однакової температури, то для газових сумішей, що містять менше 55 % H_2, можна визначити мінімальну кількість газу й оптимальну температуру. Для газових сумішей зі вмістом H_2 більше ніж 55 % найменша витрата газу відповідає максимально можливій температурі.

У табл. 1.3 наведені розраховані мінімально необхідні кількості газів при відновленні без розділення на стадії (при різних температурах для окремих стадій відновлення) для газової суміші, що складається із $CO + H_2$.

Якщо у вихідному газі є навіть невеликі кількості CO_2 і H_2O, то витрата газу різко збільшується. За наявності у вихідній суміші нейтральних газів (наприклад, N_2) необхідна кількість цієї суміші, природно, також збільшується.

Розрахунки проведені для умов, ступінчастого відновлення і досягнення рівноважних співвідношень на межах ступенів відновлення, тобто для ідеальних умов, тому одержані в результаті величини є мінімальними теоретично можливими.

Крім того, ці співвідношення виведені при допущеннях, що в системі не протікають побічні реакції (розпад CO, регенерація CO_2 і H_2O під впливом вуглецю), вихідний газ не містить кисню та вуглеводнів, в оксидах заліза не містяться CO_2 і H_2O, що виділяються у процесі. Найбільш сумнівним є припущення про відсутність реакції розпаду монооксиду вуглецю. За умов рівноваги цієї реакції взагалі неможливе відновлення закису заліза монооксидом вуглецю при температурі нижче 700 °C.

Таблиця 1.3

Ідеальне значення ефективності використання газової суміші CO + H_2 при відновленні оксидів заліза (ступінчате відновлення у протитоці в умовах досягнення рівноваги)

Склад газової суміші, %		Відновлення з роздільним регулюванням температури по стадіям				Відновлення без роздільного регулювання температури по стадіям		
H_2	CO	температура на стадії FeO-Fe, ^{0}C	температура на стадії Fe_3O_4-FeO, ^{0}C	мінімальна витрата газу		температура в печі, ^{0}C	мінімальна витрата газу	
				V, моль/г-атом Fe	м^3/кг Fe рівний ~0,4V		V, моль/г-атом Fe	м^3/кг Fe рівний ~0,4V
0,00	1,00	560	>750	1,96	0,78	635	2,26	0,90
0,10	0,90	560	>700	2,08	0,83	—	—	—
0,25	0,75	560	>680	2,28	0,91	630	2,51	1,00
0,40	0,60	560	>650	2,51	1,00	625	2,69	1,08
0,50	0,50	560	>635	2,70	1,08	620	2,84	1,14
0,55	0,45	560	>630	2,81	1,12	—	—	—
0,60	0,40	1300	>650	2,72	1,09	1300	2,72	1,09
0,65	0,35	1300	>665	2,65	1,06	—	—	—
0,75	0,25	1300	>680	2,50	1,00	1300	2,50	1,00
0,90	0,10	1300	>725	2,31	0,92	—	—	—
1,00	0,00	1300	>750	2,22	0,89	1300	2,22	0,89

Джерело: [2, с. 25]

Розглянуті співвідношення не враховують теплових ефектів і кінетики реакції і тому не можуть вважатися оптимальними.

З погляду термохімії більш доцільним є відновлення оксидів заліза монооксидом вуглецю, при якому тепло виділяється, і не потрібне підведення тепла для здійснення реакції, необхідний тільки нагрів реагентів до температури процесу. Проте, як вже відмічалось, водень в якості відновника є активнішим за монооксид вуглецю.

Відновлення метаном. Практичне використання природного газу як відновника було здійснене в колишньому СРСР на дослідній установці для прямого відновлення руд перед початком Великої Вітчизняної війни. Проведеними дослідженнями на досить крупній установці практично була доведена принципова можливість застосування природного газу без попередньої конверсії для відновлення оксидів заліза до металевого заліза. Проте як у цих, так і в інших дослідженнях завдяки недосконалості

застосованих апаратів тривалість процесу досягала декількох десятків годин.

Метан є основною складовою природного газу більшості родовищ. Він очолює гомологічний ряд граничних алімфатичних вуглеводнів з загальною формулою C_nH_{2n+2} і є хімічно найміцнішим і, отже, малоактивним у ряду.

При високих температурах, під впливом каталізаторів метан може швидко перетворюватися на водень і вуглець за реакцією $CH_4 = C + 2H_2$.

Термодинамічний аналіз відновлення заліза метаном свідчить про його безумовну термодинамічну можливість. Крім того, він свідчить про можливість такого управління процесом, яке дозволить одержати продукт з необхідним ступенем відновлення і зупинити процес на заданому ступені.

Існують два механізми відновлення оксидів заліза молекулою метану: коли процес протікає у дві стадії з попередньою дисоціацією CH_4 на С і H_2 і подальшим відновленням оксиду воднем і вуглецем, і механізм безпосереднього відновлення метаном.

У зв'язку з цим викликають інтерес дослідження, присвячені термічному розпаду метану, реакціям його конверсії, а також роботи, в яких вивчалася можливість безпосередньої взаємодії метану з твердими оксидами.

Для з'ясування впливу швидкості газового потоку на кінетику відновлення оксиду заліза проведені дослідження при 550, 700 і 850 °С з варіюванням витрати метану.

Найпростіша залежність спостерігається при 550 °С, тобто в умовах, коли термічна дисоціація метану ще практично не має місця, а реакції конверсії метану і газифікації вуглецю продуктами відновлення (H_2 і CO_2) не одержують розвитку.

Збільшення витрати метану помітно інтенсифікує процес відновлення. Існує деяке граничне значення витрати метану, вище за яке швидкість відновлення вже не збільшується.

Ця закономірність звичайно спостерігається при відновленні твердих оксидів простими газами (H_2 і CO_2) і у разі відновлення метаном породжується тими ж причинами (зняття зовнішнього дифузійного опору).

При вищих температурах (700 і особливо 850 °С) зв'язок між швидкістю відновлення і витратою метану ускладнюється.

У цих умовах реакції термічної дисоціації та конверсії метану і газифікації вуглецю продуктами відновлення набувають помітних швидкостей. Всі ці реакції значно інтенсифікуються з появою свіжовідновленого металевого заліза. Їх розвиток призводить до появи активніших за метан відновників (H_2 і CO_2), які прискорюють накопичення каталізатора.

Особливості появи перших порцій металевого заліза накладають значний відбиток на подальший хід процесу.

Дослідження відновлюваності Fe_2O_3 до Fe_3O_4 проводили на реальних криворізьких окислених кварцитах крупністю 5,0-15,0мм, що містять 41,2 % Fe.

Залежність ступеня відновлення кварцитової залізної руди сирим природним газом від часу при різних температурах наведена на рис. 1.5.

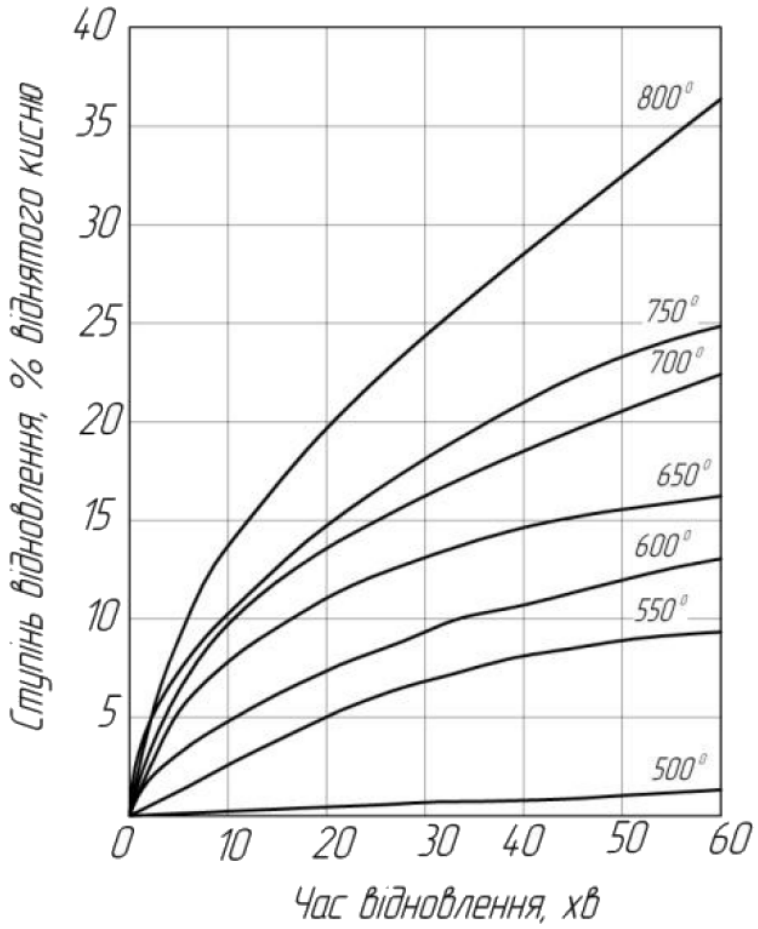


Рисунок 1.5 – Залежність ступеню відновлення окислених кварцитів природним газом від часу при різних температурах

Джерело: [2, с. 38]

Як випливає з цих даних, при температурі 500 °С природний газ дуже слабко реагував із оксидами заліза, так протягом 60 хвилин, ступінь відновлення склав 1 %. Криві відновлення, одержані при 550, 600, 650 °С, при досягненні ступеня відновлення, який відповідає отриманню магнетиту, виположуються, і подальше збільшення часу не призводить до підвищення ступеня відновлення.

Відновлення метаном залізорудних окатишів. Разом із оцінкою відновлювальності бідних окислених залізистих кварцитів проводилися дослідження кінетики відновлення природним газом залізорудних окатишів.

Випаленні окатиші діаметром 20 мм, одержані з магнетитового концентрату, містили 58,7 % заліза, 1,0 % монооксиду заліза, мали пористість 28-30 %. Швидкість газу в реакційному просторі складала більше 1,3 см/с, час відновлення 30 хвилин. Результати експериментів наведені на рис. 1.6.

Відновлювальність окатишів в струмені природного газу аж до 900 °С має порівняно малу величину і лише при 950 °С вона різко зростає. При 1000 °С відновлювальність досягає значної величини і вже є порівняною з відновлювальністю їх у струмені монооксиду вуглецю, хоча ще залишається нижчою, ніж у струмені водню.

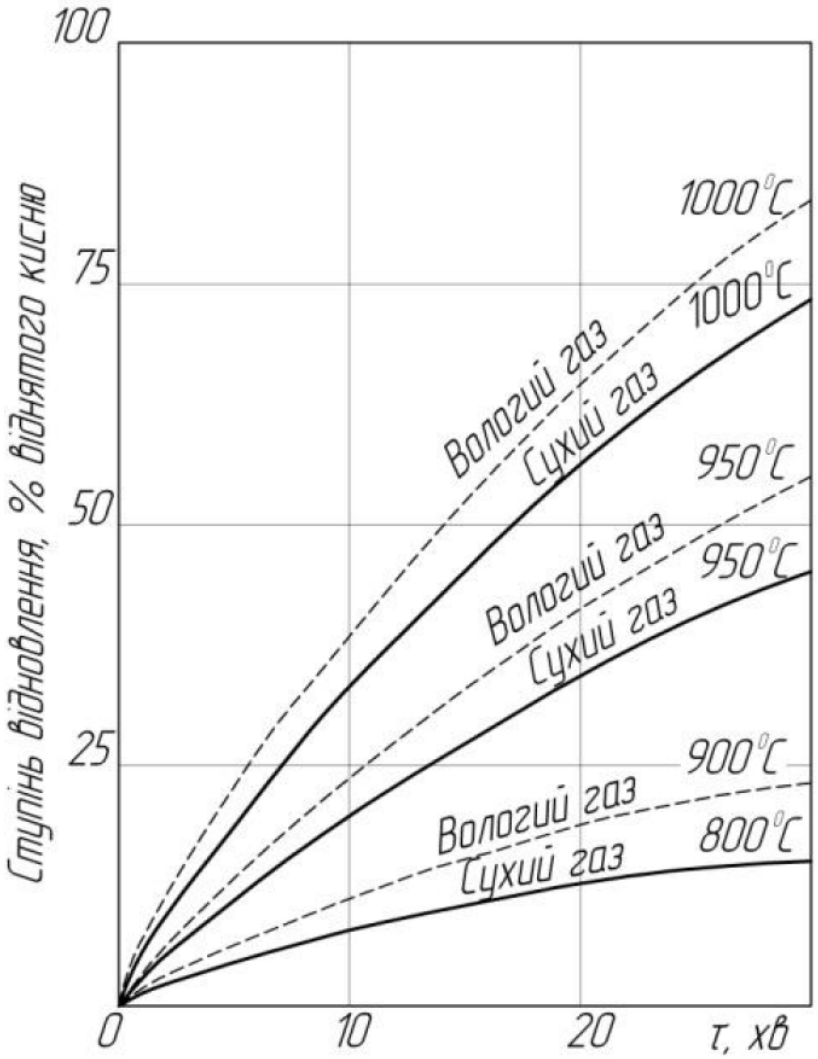


Рисунок 1.6 – Залежність ступеню відновлення окатишів від часу при різних температурах

Джерело: [2, с. 44]

Різке збільшення ступеня відновлення окатишів при температурі вище 900 °С пояснюється появою значної кількості водню за рахунок розкладання метану. Про інтенсивність термічного розкладання метану свідчить виділення сажистого вуглецю.

Якщо при відновленні монооксидом вуглецю і воднем швидкість відновлення весь час спадає, то в разі природного газу, наприклад, при 950-1000 °С швидкість відновлення спочатку спадає, а починаючи з 15-ої хвилини, тобто після досягнення ступеня відновлення 25-30 %, помітно зростає. Збільшення швидкості процесу пов'язане з каталітичною дією металевого заліза, що з'являється, на швидкість розкладання метану і утворенням таких відновників як водень і сажистий вуглець. Вологий природний газ має вищу відновлювальну здатність, ніж очищений від водяних парів (рис.1.6). В даному випадку має місце конверсія метану за реакцією

$$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2 - 205{,}31 \text{ Дж.}$$

1.1.2 Відновлення вуглецем

Відновлення вуглецем складається з двох реакцій: газифікації вуглецю і відновлення оксидів газом:

$$CO_2 + C = 2CO$$
$$MeO + CO = Me + CO_2$$
$$\text{———————————}$$
$$MeO + C = Me + CO$$

Під прямим відновленням розуміють відновлення вуглецем при температурі 900-1000 °С і вище, коли утворюється монооксид вуглецю:

$$3Fe_2O_3 + C = 2Fe_3O_4 + CO$$
$$Fe_3O_4 + C = 3FeO + CO$$
$$FeO + C = Fe + CO$$
$$\text{———————————}$$
$$Fe_2O_3 + 3C = 2Fe + 3CO$$

При нижчих температурах разом з монооксидом вуглецю в результаті реакції відновлення утворюється також діоксид вуглецю. У всіх випадках реакція відновлення вуглецем є ендотермічною і вимагає підведення тепла із зовні.

Перераховані вище реакції відновлення з участю твердого вуглецю є умовними тому, що не відображають частки реакції газифікації вуглецю і частки неминучого відновлення монооксидом вуглецю.

У доменній печі вищі оксиди заліза Fe_2O_3 і Fe_3O_4 відновлюються непрямим шляхом, тобто монооксидом вуглецю. Закис заліза відновлюється непрямим і прямим шляхом, тобто вуглецем, з утворенням монооксиду вуглецю.

У процесах безкоксової металургії при використанні твердого вуглецю як відновника частка прямого відновлення в сумарному процесі може коливатися в широких межах залежно від конкретних умов (рудно-вугільні окатиші або суміш руди і відновника, товщина шару шихти, тощо).

Реакція газифікації (або обернена до неї реакція розпаду монооксиду вуглецю) визначає як термодинамічну можливість відновлення оксидів заліза, так і результуючий (у результаті відновлення) склад газової фази. На рис. 1.2 зображені криві рівноваги реакцій відновлення оксидів заліза СО і газифікація вуглецю. Якщо виходити з термодинамічних співвідношень, то відновлення закису заліза до металевого заліза монооксидом вуглецю можливе тільки при температурі вище 700 °С, при якій перетинаються криві «3б» і «в» рівноваги відповідних реакцій:

$$FeO + CO \leftrightarrow Fe + CO_2,$$

$$CO_2 + C \leftrightarrow 2CO.$$

Вище за температуру 700 °С в результаті реакції газифікації утворюється газ, що складається з 60 % СО і 40 % CO_2, який є відновним у відношенні до

закису заліза. Нижче за цю температуру монооксид вуглецю розпадається з утворенням CO_2 і С і в умовах рівноваги утворюється окислювальний у відношенні до заліза, газ, який не забезпечує відновлення закису заліза. Проте це справедливо лише для умов рівноваги; практично реакція розпаду проходить поволі, і нижче 700 °С також відбувається відновлення оксидів заліза до металевого заліза разом із відкладенням сажистого вуглецю.

Реакція газифікації (в) супроводжується зміною об'єму: з одного молю CO_2 утворюються два молі СО. Тому зміна загального тиску змінює рівноважний склад газу цієї реакції – з підвищенням тиску вміст СО зменшується, тобто збільшується виділення сажистого вуглецю.

Вище 700 °С створюються можливості навуглецьовування металевого заліза. На ділянках діаграми рис. 1.2 між кривими «3б» і «в» розміщені криві рівноважної газової фази, відповідні певним рівноважним вмістам розчиненого в металевому залізі вуглецю (числа біля кривих). Як випливає з розташування і ходу цих кривих, при даній температурі при збільшенні в газі СО (і загального тиску) збільшується масова частка вуглецю.

Згідно із розрахунками, при 1000 °С на поверхні розділу аустеніт-газ рівноважний тиск газу P^0_{CO+CO2}, складає близько 4,053 МПа. Тому, при відновленні руд монооксидом вуглецю, шар відновленого металу прориває́ться і звичайно виникає пористіша і газопроникніша губка, ніж при відновленні воднем. В останньому випадку тиск газів усередині відновлюваного шару рівний всього 0,638 МПа, тому H_2O не виділяється і наступає гальмування.

Розрахунок показує, що при температурах вище 700 °С, тиску СО більше 1,013 МПа і при надлишку вуглецю процес прямого відновлення оксидів заліза незворотній. Тобто, з термодинамічних позицій цей процес слід здійснювати при необмежено високих температурах. При цьому створюються оптимальні умови для кінетики процесу. Отже, існує об'єктивна можливість інтенсифікації процесу відновлення залізорудних матеріалів твердим вуглецем.

Якщо ж процес відновлення оксидів заліза обмежується температурами 1100 °С (процес «SL-RN»), 1350 °С (кричний процес) через небезпеку злипання матеріалів і настилоутворення, а при цьому використовуються кускові руди і вугілля в шарі, що пересипається, оскільки застосування тонкоподрібнених матеріалів неможливе через їх велике винесення з газами, що відходять, то об'єктивна можливість форсування відновного процесу твердим вуглецем не може бути здійснена. В результаті в реальних процесах необхідний великий надлишок твердого вуглецю, який у 2-3 рази перевищує теоретичну витрату для реакцій відновлення. При меншому надлишку не гарантоване утворення відновної фази з достатньою швидкістю.

Швидкість газифікації вуглецю вуглекислим газом залежить від присутності в кусковому вугіллі мінеральних домішок, кількості і складу золи, величини і характеру пористості, швидкості газового потоку тощо. Основний вплив на швидкість газифікації кускового вугілля при високих температурах чинять дифузійні процеси, в основному внутрішня дифузія, оскільки зовнішня дифузія лімітує процес тільки при низьких швидкостях газового потоку.

Взаємодія CO_2 з твердим вуглецем здійснюється в декілька стадій. До

500 °С відбувається тільки адсорбція CO_2 на поверхні кристалів графіту. При 550-700 °С адсорбція CO_2 супроводжується розпадом неміцного кетонного комплексу $(Cn)_{реш}$ $(O)_{адс}$ $(CO)_{адс}$ з виділенням молекули СО. Тільки при 800-900 °С одна молекула CO_2 дає дві молекули СО.

Швидкість газифікації вуглецю, віднесена до одиниці поверхні вугілля, не залишається сталою внаслідок впливу внутрішньої структури і розміру частинок. Встановлений вплив розміру частинок на вихід монооксиду вуглецю при 970 °С для вугілля різних сортів. Для малих частинок (d = 0,5 - 2,0 мм) деревного й електродного вугілля, а також антрациту вихід СО практично однаковий і складає близько 100 %. При збільшенні діаметру частинок вихід СО знижується і виявляється залежність від сорту вугілля.

Так, для частинок діаметром 5,0 мм вихід СО при застосуванні деревного вугілля складає 50-55 %, електродного вугілля 25-30 % і антрациту близько 10-15 %. Інші дослідники дійшли до висновку, що чим нижчою є температура, тим меншим є розмір частинок і більшою є енергія активації реакції газифікації, тим в більшій мірі весь об'єм частинки вугілля бере участь в реакції. Відтак відмінність в реакційній здатності палив буде виявлятись тим сильніше, чим вищою є температура процесу і більшим є розмір кусків. Для частинок вугілля діаметром менше 1 мм вплив внутрішнього дифузійного опору не виявляється, що призводить до усунення відмінностей їх відновної здатності.

1.1.3 Відновлення рудно-вугільних окатишів і брикетів твердим вуглецем

Сумісне змішування і окускування тонко здрібнених залізорудних і вуглецевмісних твердих матеріалів дозволяють в процесі відновної термообробки усунути градієнт концентрацій реагентів і значно збільшити питомі реакційні поверхні МеО-С, СО, що в поєднанні з інтенсивним рухом газів порами грудок забезпечує високі швидкості відновлення. При тонкому подрібненні руди і вугілля та їх змішуванні поліпшуються не тільки кінетичні, але і термодинамічні умови реакцій прямого відновлення. У цих умовах поліпшується відновлюваність оксидів заліза в результаті підвищення рівноважного вмісту CO_2 і одночасно збільшується реакційна здатність вугілля в результаті зростання кількості СО в газовій фазі.

Швидкості реакцій прямого відновлення оксидів заліза за відсутності градієнта концентрації дисперсних реагентів у руднопаливних грудках не лімітуються дифузійними процесами, а визначаються інтенсивністю підведення тепла.

Експериментальні дані підтверджують, що тривалість відновлення окатишів є обернено пропорційною температурі та їх питомій поверхні, тобто розмірові. Іншими словами, кількість тепла що підводиться крізь одиницю поверхні до одиниці об'єму окатишів, визначає тривалість їх відновлення.

При відновленні рудно-вугільних окатишів дифузія газу в найдрібніших рудних частинках не лімітує процес. Встановлено, що швидкість реакцій відновлення руди газами знижується до тих пір, поки частинки руди не стануть

меншими за відстані мікродифузії.

Залежність часу відновлення від розміру окатиша наведено на рис. 1.7. Із цієї залежності виходить, що критичний діаметр окатишів d' = 5 мм, а товщина сферичного реакційного шару, де здійснюється реакція FeO + C = Fe + CO, складає близько 2-3 мм. Тривалість відновлення до ~90 % при високих температурах окатишів критичного розміру наведена у табл. 1.4.

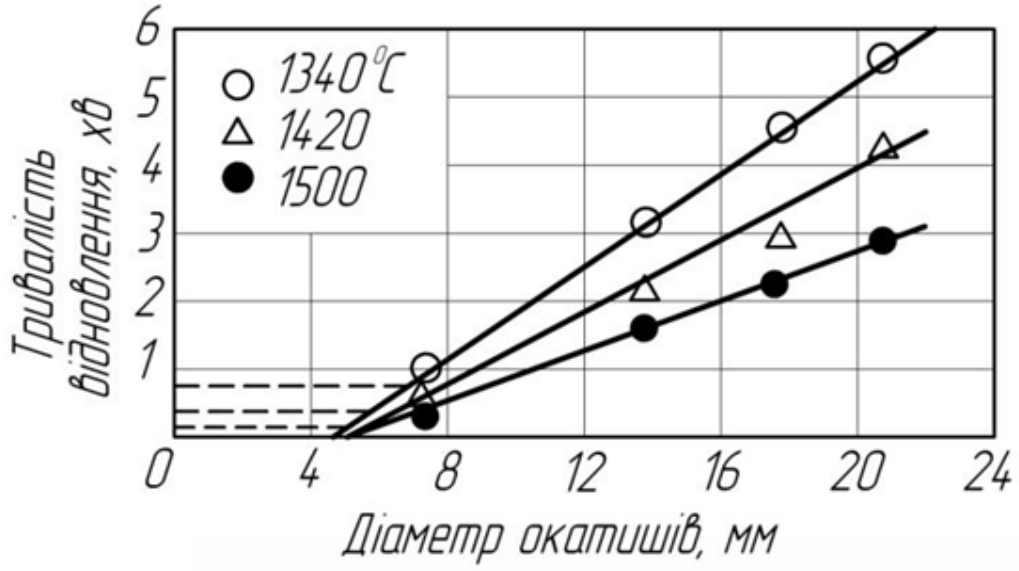


Рисунок 1.7 – Залежність тривалості відновлення окатишів (до ~ 90 %) від діаметру при різних температурах (штрихові лінії – тривалість відновлення окатишів, розмір яких менше критичного d' ≤ 5 мм)

Джерело: [2, с. 52]

Таблиця 1.4

Тривалість відновлення окатишів критичного розміру до ~90 % при високих температурах

Температура, °С	1400	1500	1600	1800
Тривалість відновлення, с	20	9	4,2	1,2

Джерело: складено за матеріалами [2, с. 53]

Згідно з практичними даними, окатиші діаметром 4-5 мм практично повністю металізуються при 1400 і 1480 °С за 22 і 13 секунд відповідно.

При тонкому подрібненні компонентів рудно-вугільних грудок, що містять 65-70 % фракції мінус 0,045 мм, різниці у відновленні руд і реакційної здатності палива практично не виявляється.

Для кускових руд і вугілля, в яких міститься більше летючих, ніж в коксі, процес відновлення зміщується в область нижчих температур. Так, у разі відновлення окатишів і брикетів з концентрату КМА газифікація летких напівкоксу забезпечує повніше відновлення при 1500 °С як на ранній, так і на завершальній стадії в порівнянні з коксом.

При добавках сполук лужних і лужноземельних металів значно збільшується швидкість відновлення руд газами і прискорюється процес газифікації вугілля.

Сода, наприклад, дезактивує відновлене залізо, одночасно сприяє укрупненню його в шлаку. В цих умовах ускладнюється вторинне окислення заліза з поверхні.

У разі добавки в шихту рудно-вугільних окатишів 5-10 % вапняку спостерігається деяке прискорення відновлення. При цьому відбувається інтенсивніша коагуляція частинок відновленого заліза.

На рис. 1.8 наведені результати відновлення окатишів у струмені чистого монооксиду вуглецю. При температурі відновлення 800-900 °С, діоксид вуглецю, що виділяється внаслідок дисоціації карбонату кальцію, слабко реагує і з вуглецем, внаслідок чого відношення CO/CO_2 всередині окатиша знижується, уповільнюючи відновні процеси. При температурах 1000-1100 °С діоксид вуглецю, що виділяється, інтенсивно розкладається вуглецем з утворенням молекул CO, які виконують певну відновну роботу всередині окатиша. При цьому швидкість відновлення є тим більшою, чим вищою є реакційна здатність вуглецю палива. В міру розкладання карбонату кальцію і газифікації вуглецю пористість гранули збільшується, що, у свою чергу, призводить до поліпшення дифузії молекул CO з навколишньої газової фази в окатиш.

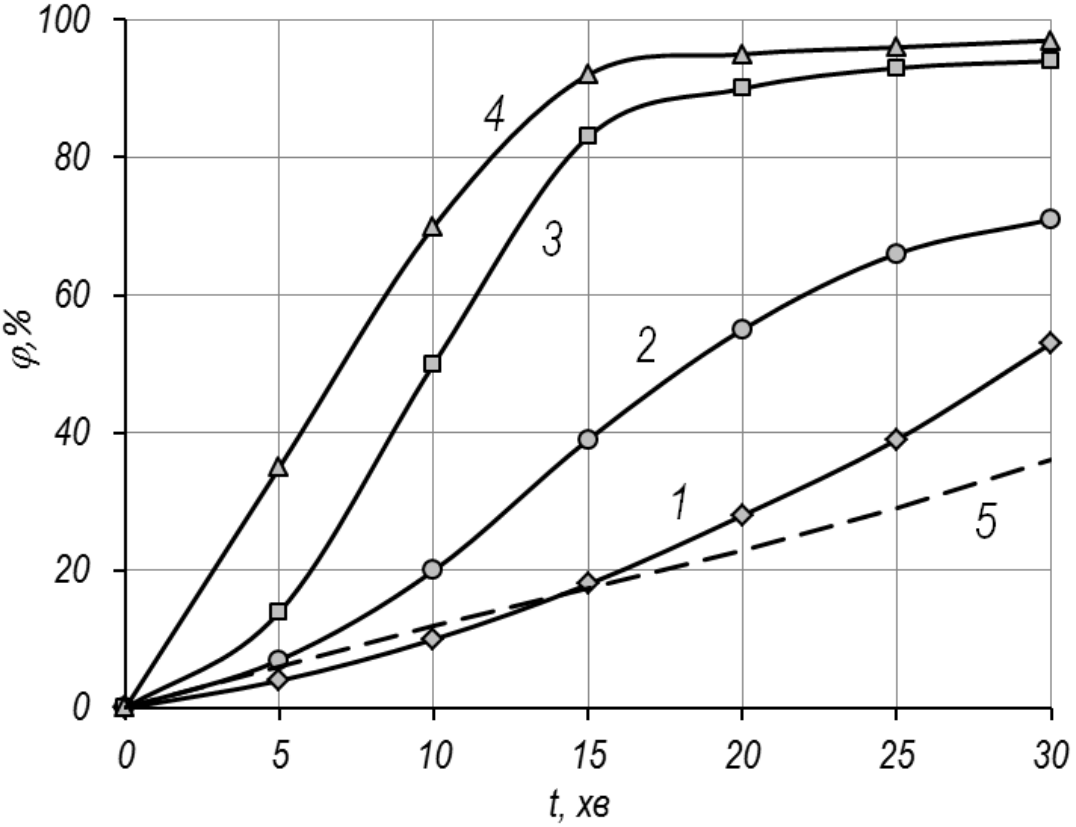


Рисунок 1.8 – Залежність ступеню відновлення рудно-вугільних гранул від часу і температури: 1 – 800 °С, 2 – 900 °С, 3 – 1000 °С, 4 – 1100 °С, 5 – 1000 °С (агломерат)

Джерело: складено за матеріалами [2, с. 54]

2.1.4 Відновлення заліза з розплаву

Відновлення заліза з розплаву газами. Відновлення залізорудних розплавів газами (CO, H_2 або їх сумішами) здійснюється шляхом продування їх через розплав або за рахунок введення оксидів заліза у високотемпературний струмінь газу. У всіх випадках протікають наступні реакції при температурах вище 1539 °С:

$$(FeO)_р + CO = [Fe]_{спл.} + CO_2,$$
$$(FeO)_р + H_2 = [Fe]_{спл.} + H_2O,$$

де $(FeO)_р$ – оксид заліза у розплаві, $[Fe]_{спл.}$ – відновлене залізо у сплаві.

Рівноважний склад газу при відновленні заліза з розплаву залежить від температури і співвідношення активностей FeO і Fe в ньому. Зі зростанням температури збільшується К, і відновлення оксидів полегшується.

При постійній температурі знижується концентрація FeO в розплавах, через його відновлення, і відповідну активність заліза зменшують рівноважну величину P_{CO2} / P_{CO}, тобто рівноважний склад газової фази зсувається у бік збільшення концентрації CO і зниження CO_2. Таким чином, чим меншою є масова частка FeO в розплаві, тим важче його довідновлювати і тим багатшою відновником повинна бути газова суміш. Навіть при відновленні чистого розплавленого FeO вихід CO_2 при 1600 °С не перевищує 16 % і знижується по мірі відновлення.

Наявність в розплаві інших складових ще більше знижують вихід CO_2, наприклад при 2 і 12 % SiO_2 вихід CO_2 в процесі відновлення знижується відповідно з 14 до 6 % і з 8 до 6 % відповідно. В залежності від масової частки SiO_2 ступінь відновлення заліза з розплаву може досягати 86-97 %.

Використовуючи при відновленні водень, який має термодинамічні переваги перед монооксидом вуглецю, вихід H_2O, у разі відновлення чистого монооксиду заліза сягає 51 %, але також різко знижується в ході процесу.

Отже, виходить, що для забезпечення досить повного відновлення монооксиду заліза з розплаву потрібна велика витрата газу-відновника, величина якої збільшується в міру зменшення концентрації FeO. Наприклад, для відновлення 1 т заліза зі залізосилікатного розплаву при 1600 °С необхідно витратити 3000-6000 $м^3$ монооксиду вуглецю або 835-1525 $м^3$ водню. Слід враховувати, що при 1600 °С фактичний об'єм газу збільшиться в 6-7 разів.

Швидкість процесу відновлення монооксиду заліза з розплаву лімітується дифузією FeO до поверхні розділу газ-розплав. Швидкість же дифузії залежить від в'язкості розплаву, яка, у свою чергу, визначається масовою часткою в ньому FeO і температурою.

Швидкість відновлення розплаву монооксиду заліза в залежності від температури наведено на рис.1.9.

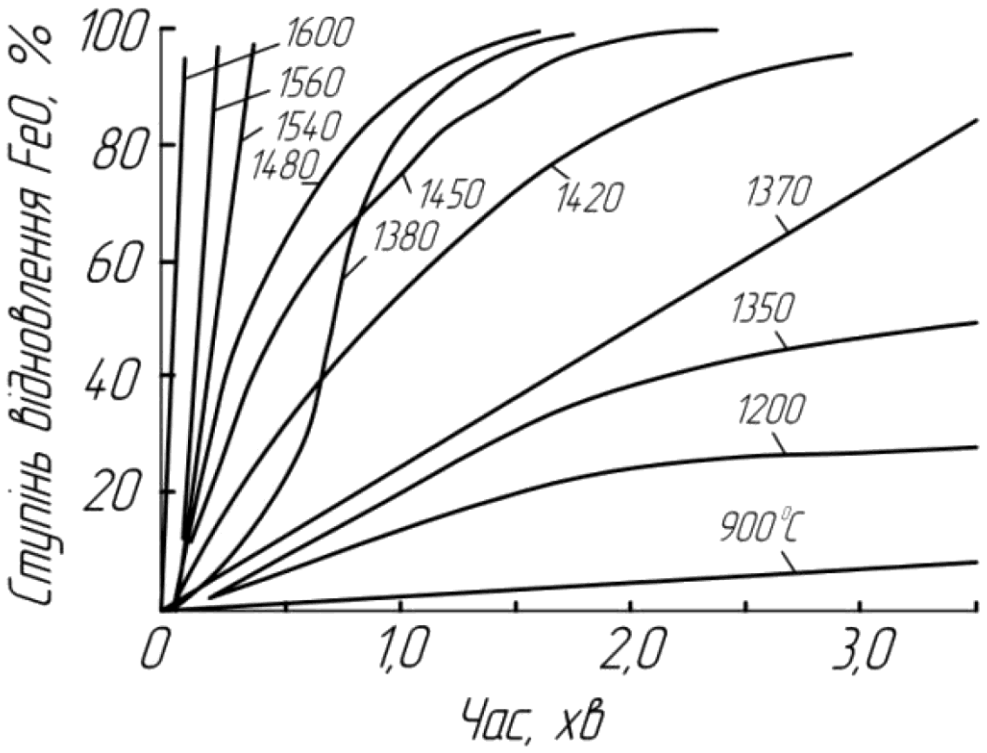


Рисунок 1.9 – Зміна ступеню відновлення FeO в часі при різних температурах

Джерело: [2, с. 82]

До початку плавлення FeO підвищення температури призводило до збільшення швидкості відновлення твердої частинки. Під час переходу через точку плавлення оксиду в інтервалі 1420-1480 °С швидкість відновлення спочатку падала, а потім різко зростала. При 1540 °С і вище досягався ступінь відновлення 97-98 % протягом 0,1-0,4 хвилини.

Дослідження показали, що для забезпечення високої швидкості процесу відновлення монооксиду заліза газами з розплаву необхідні низька в'язкість розплаву, розвинена реакційна поверхня газ-розплав, висока температура і видалення з реакційної поверхні відновленого заліза.

Відновлення заліза з розплаву вуглецем. Цей процес описується наступною реакцією:

$$(FeO)_р + C_{тв} = [Fe]_{спл.} + CO,$$

або при взаємодії FeO з вуглецевмісним металом:

$$(FeO)_р + [C] = [Fe]_{спл.} + CO.$$

Монооксид вуглецю, що виділяється, також може відновлювати FeO з розплаву за реакцією:

$$(FeO)_р + CO = [Fe]_{спл.} + CO_2,$$

В результаті в газову суміш переходить не тільки CO, але й CO_2, який при високих температурах може взаємодіяти з вуглецем за реакцією:

$$CO_2 + C_{тв} = 2CO.$$

Таким чином, відновлення монооксиду заліза з розплаву твердим або розчиненим в металі вуглецем частково здійснюється через газову фазу.

Збільшити ступінь відновлення FeO з розплаву можна шляхом підвищення температури процесу при незмінному тискові газу в системі або шляхом зниження загального тиску газів у реакційному просторі (при сталій температурі процесу), оскільки при безперервному зниженні величини a_{FeO} зменшується і величина $P_{Озаг}$. Зниження тиску газів у робочому просторі при відновленні FeO з розплаву не тільки підвищує повноту витягання заліза, але і дозволяє знизити температуру початку відновлення.

На рис. 1.10 показані залежності зміни масової частки CO (CO_2) від температури при деяких загальних тисках цих газів ($P_1 < P < P_2$) і активностях FeO ($a_{FeO} < a'_{FeO} < a''_{FeO}$) в розплаві. З рис. 1.10 виходить, що криві масової частки CO і активностей FeO перетинаються в певних точках, які відповідають температурам початку реакції прямого відновлення. Чим меншою є величина активності FeO, тим вищим є значення температури.

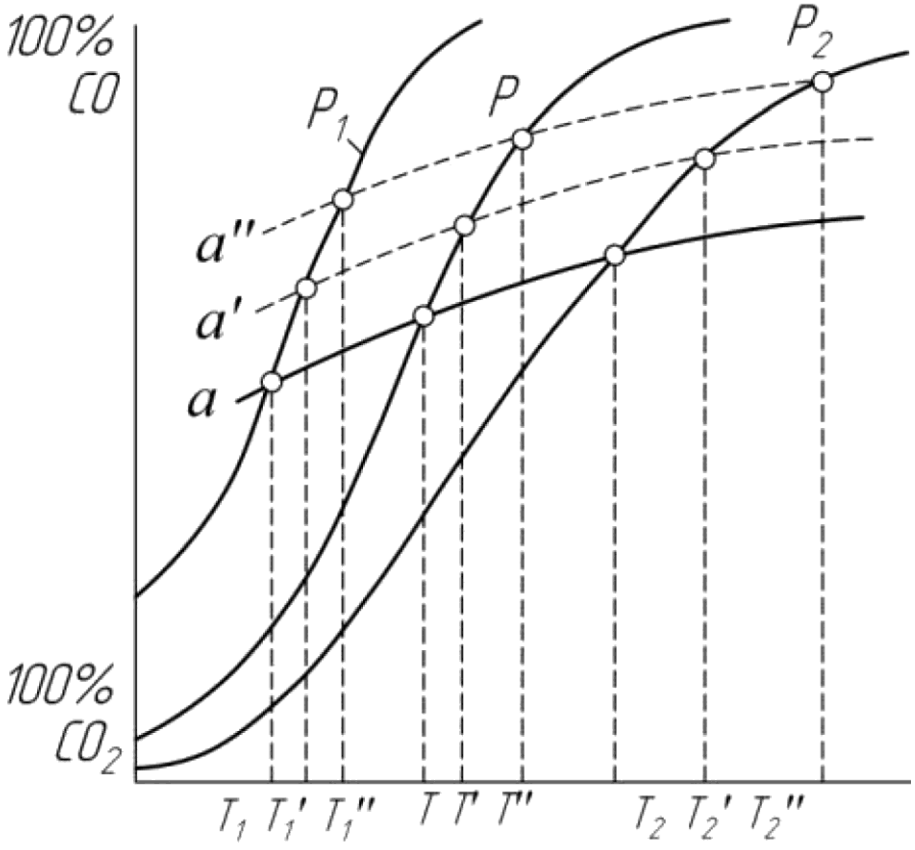


Рисунок 1.10 – Залежність вмісту CO (CO_2) від температури при деяких сумарних тисках цих газів ($P_1 < P < P_2$) і активностях FeO ($a_{FeO} < a'_{FeO} < a''_{FeO}$; $a_{FeO} = 1$) в розплаві

Джерело: [2, с. 84]

Зниження тиску газів у реакційному просторі зміщує криву залежності масової частки CO (CO_2) в результаті протікання реакції $CO_2 + C_{тв} = 2CO$ вліво (рис. 1.10), і з кривими різних значень a_{FeO} вона перетинається при нижчих

температурах. Навпаки, зростання тиску газів призводить до підвищення значення температури при всіх значення a_{FeO} і тим більшою мірою, чим нижчий a_{FeO}. Таким чином, зменшення концентрації FeO в розплаві ускладнює його відновлення не тільки газами, але і твердим вуглецем, що виявляється в збільшенні температури початку реакції відновлення. Щоб збільшити ступінь відновлення, необхідно підвищувати температуру або понизити сумарний тиск CO і CO_2 в реакційному просторі. Останнє на практиці є технічно важко здійсненним.

При відновленні твердим вуглецем сумарна швидкість процесу в конкретних умовах може лімітуватися однією з можливих реакцій. Момент контакту розплаву з вуглецем супроводжується утворенням на активних центрах поверхні вуглецю нової фази металу і газового прошарку між вуглецем і розплавом. Отже, виникають дві поверхні розділу: газ-розплав і газ-вуглець. На поверхні розділу газ-розплав здійснюється хімічний акт відновлення, а на поверхні розділу газ-вуглець поновлюється газоподібний відновник. При високій концентрації FeO в'язкість розплаву є низькою. Це полегшує дифузію FeO до реакційної поверхні. В таких умовах реакція газифікації вуглецю може виявитися лімітуючою ланкою процесу.

При зниженні концентрації FeO в розплаві в'язкість його підвищується і дифузія монооксиду заліза до поверхні розділу фаз ускладнюється, процес лімітуватиметься реакцією $(FeO)_p + CO = [Fe]_{спл.} + CO_2$. У такому разі збільшення поверхні контакту реагуючих фаз супроводжуватиметься підвищенням швидкості відновлення і повноти витягання заліза з розплаву.

2 ІНСТРУКЦІЯ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

2.1 Загальні положення

2.1.1. Дія інструкції поширюється на всі підрозділи підприємства, де виконують роботи з персональним комп'ютером (ПК).

2.1.2. Інструкція розроблена відповідно до Положення про розробку інструкцій з охорони праці, затвердженого наказом Держнаглядохоронпраці від 29.01.1998 № 9, Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці, затвердженого наказом Держнаглядохоронпраці від 26.01.2005 № 15, Правил охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин, затверджених наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 26.03.2010 № 65, Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ДСанПіН 3.3.2.007-98, затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України від 10.12.1998 № 7, Загальних вимог стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників, затверджених наказом Міністерства надзвичайних ситуацій України від 25.01.2012 № 67 (НПАОП 0.00-7.11-12).

2.1.3. За цією інструкцією студента, який використовує персональний комп'ютер (далі – користувач), інструктують перед початком роботи (первинний інструктаж), а потім через кожні 6 місяців (повторний інструктаж). Результати інструктажу заносять до Журналу реєстрації інструктажів з питань охорони праці на робочому місці (у журналі має бути підпис особи, яка інструктує, та користувача).

2.1.4. Користувач зобов'язаний дбати про особисту безпеку і здоров`я, а також про безпеку і здоров'я довколишніх при виконанні будь-яких робіт, а також під час перебування на території підприємства.

2.1.5. До роботи на персональному комп'ютері допускають осіб, які пройшли інструктажі з питань охорони праці та пожежної безпеки.

2.1.6. Користувач зобов'язаний:

- виконувати правила внутрішнього трудового розпорядку;
- не допускати за своє робоче місце сторонніх осіб;
- не виконувати вказівок, які суперечать правилам охорони праці та пожежної безпеки;
- знати правила надання домедичної допомоги;
- знати розташування та вміти користуватись первинними засобами пожежогасіння;
- вміти працювати з ПК.

2.1.7. Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що можуть впливати на користувача:

- підвищений рівень статичної електрики;

- нерівномірність розподілу яскравості в полі зору;
- підвищена яскравість світлового зображення;
- ураження електричним струмом;
- напруга зору та уваги;
- тривалі статичні навантаження.

2.1.8. У приміщеннях із ПК має бути природне і штучне освітлення.

2.1.9. При розміщенні робочих місць необхідно унеможливити пряме засвічування екрана природним освітленням.

2.1.10. При природному освітленні слід передбачити наявність сонцезахисних засобів (плівка, жалюзі, штори тощо).

2.1.11. Світлові відблиски із клавіатури, екрана та інших частин ПК у напрямку очей користувача неприпустимі.

2.1.12. Основним обладнанням робочого місця є ПК або ноутбук, монітор, клавіатура, маніпулятор, робочий стіл, стілець (крісло).

2.1.13. При розміщенні елементів робочого місця слід враховувати:

- робочу позу користувача;
- простір для розміщення користувача;
- можливість огляду елементів робочого місця;
- можливість огляду простору поза межами робочого місця;
- можливість робити записи, розміщувати на робочому столі документацію та матеріали, які використовує користувач.

2.1.14. Розміщення елементів робочого місця не має заважати рухам та переміщенню для експлуатування ПК.

2.1.15. Монітор встановлюють так, щоб відстань від поверхні екрана до очей користувача була 600-700 мм залежно від розміру екрана.

2.1.16. Клавіатуру розміщують на робочому або окремому столі на відстані 100-300 мм від краю з боку користувача. Положення клавіатури та кут її нахилу залежить від побажання користувача (як правило, в межах 5-15°). Не допускати хитання клавіатури.

2.1.17. Конструкція робочого столу має бути такою, щоб оптимально розмістити на робочій поверхні обладнання, що використовують, з урахуванням кількості, розмірів, конструктивних особливостей і характеру його роботи.

2.1.18. Крісло має забезпечувати підтримування раціональної робочої пози під час виконання основних виробничих операцій та можливість зміни пози. Тип робочого крісла обирають залежно від характеру та тривалості роботи.

2.1.19. Раціональна поза користувача:

- ступні розташовані на підлозі або на підставці для ніг;
- стегна зорієнтовані у горизонтальній площині;
- верхні ділянки рук вертикальні;
- кут ліктьового суглоба у межах 70-90°;
- зап’ястя зігнуті під кутом не більше ніж 20°;
- нахил голови у межах 15-20°, а часті її повороти виключені.

2.1.20. Для забезпечення оптимальної робочої пози користувача необхідно:

- засоби праці, з якими користувач має тривалий або найбільш частий зоровий контакт, розмістити у центрі зони зорового спостереження та моніторного поля;
- забезпечити відстань близько 500 мм між найважливішими засобами праці, з якими користувач працює найчастіше.

2.1.21. ПК встановлювати на рівній твердій поверхні (столі). Не дозволено встановлювати ПК та оргтехніку на хитких підставках чи на похилій поверхні.

2.1.22. ПК не встановлювати впритул до стіни, перегородки тощо. Не допускати загородження вентиляційних отворів ПК сторонніми предметами.

2.1.23. Розетка біля ПК має бути в доступному місці, щоб в аварійних випадках можна було своєчасно його відімкнути. Не рекомендовано використовувати подовжувачі.

2.1.26. Під час переміщення ПК, периферійних пристроїв витягти вилку живлення з розетки.

2.1.27. Не допускати ушкодження чи модифікування шнура живлення. Заборонено ставити важкі речі на шнур живлення, тягнути чи надмірно перегинати його, скручувати та перев’язувати шнур живлення вузлом.

2.1.28. ПК під’єднувати до електромережі лише за допомогою справних штепсельних з’єднань та електророзеток заводського виробництва.

2.1.29. Штепсельні з’єднання та електророзетки мають бути зі спеціальними контактами для під’єднання нульового захисного провідника. Їхня конструкція має забезпечувати з’єднання нульового захисного провідника раніше, ніж з’єднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз’єднань при вимкненні має бути зворотнім.

2.1.30. Заборонено під’єднувати електрообладнання до звичайної двошнурової електромережі.

2.1.31. За невиконання цієї інструкції користувачі несуть відповідальність згідно з чинним законодавством.

2.2 Вимоги безпеки перед початком роботи

2.2.1. Оглянути робоче місце і навести на ньому лад; впевнитись, що на ньому немає сторонніх предмети, все обладнання і блоки ПК з’єднані з системним блоком з’єднувальними шнурами.

2.2.2. Перевірити надійність встановлення апаратури на робочому столі. Монітор не має стояти на краю стола. Повернути монітор так, щоб було зручно дивитися на екран — під прямим кутом (а не збоку) і трохи зверху вниз; при цьому екран має бути трохи нахиленим — нижній край ближче до користувача.

2.2.3. Перевірити загальний стан апаратури, справність електропроводки, з’єднувальних шнурів, штепсельних вилок, розеток, заземлення захисного екрана.

2.2.4. Вставити вилку в розетку і впевнитися, що вона міцно тримається.

Заборонено вставляти і виймати вилку мокрими руками.

2.2.5. Відрегулювати та зафіксувати висоту крісла та зручний для користувача нахил спинки.

2.2.6. За потреби приєднати до комп'ютера необхідну апаратуру (принтер, сканер тощо). Усі кабелі, що з'єднують системний блок із іншими пристроями, вмикати та вимикати лише при вимкненому комп'ютері.

2.2.7. Відрегулювати яскравість свічення, контрастність монітора.

2.2.8. Про всі виявлені несправності інформувати керівника робіт і не братися до роботи, доки їх не буде усунено.

2.3 Вимоги безпеки під час виконання роботи

2.3.1. Під час роботи на ПК:

- стійко встановити клавіатуру на робочому столі, не допускаючи її хитання, водночас передбачити можливість її поворотів та переміщень;
- якщо в конструкції клавіатури не передбачено простору для упору долонь, клавіатуру розміщують на відстані не менше 100 мм від краю столу в оптимальній зоні моніторного поля;
- під час роботи на клавіатурі сидіти рівно, не напружуватися;
- щоб зменшити несприятливе навантаження на користувача при роботі з комп'ютерною мишею (вимушена поза, необхідність постійно контролювати якість дій), забезпечити велику вільну поверхню столу для переміщення комп'ютерної миші та зручного упору ліктьового суглоба;
- періодично при вимкненому комп'ютері прибирати пил із поверхонь апаратури спеціальними серветками.

2.3.2. При роботі з ПК заборонено:

- самостійно розбирати та ремонтувати системний блок (корпус ноутбука), монітор, клавіатуру, комп'ютерну мишу тощо;
- встромляти сторонні предмети до вентиляційних отворів ПК, ноутбука або монітора;
- ставити на системний блок ПК та периферійні пристрої металеві предмети, ємкості з водою (вази, горщики для квітів, склянки), оскільки через потрапляння води у середину апарата може виникнути пожежа або ураження електрострумом.

2.3.3. Тривалість безперервної роботи за ПК не має перевищувати 2 год. Після цього необхідно зробити 15-хвилинну перерву.

2.3.4. Якщо виник зоровий дискомфорт або інші неприємні відчуття, необхідно зробити коротку перерву.

2.3.5. Для зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втомі доцільно під час декількох перерв виконувати комплекс вправ.

2.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи

2.4.1. Зберегти інформацію.

2.4.2. Вимкнути ПК, монітор чи ноутбук.

2.4.3. Вимкнути стабілізатор (або джерело безперебійного живлення), якщо комп'ютер під'єднаний до мережі через нього.

2.4.4. Прибрати робоче місце.

2.5 Вимоги безпеки в аварійній ситуації

2.5.1. Аварійні та небезпечні ситуації під час виконання роботи на ПК можуть виникнути у разі: короткого замикання, перевантаження блоку живлення системного блоку, перегрівання, пожежі, поломки крісла тощо.

2.5.2. У разі виникнення аварії або ситуації, що може привести до аварії, нещасного випадку, негайно від'єднати ПК від електромережі, повідомити інцидент керівникові.

2.5.3. Не допускати в небезпечну зону сторонніх осіб.

2.5.4. Якщо стався нещасний випадок, зберегти обстановку в робочій зоні та устаткування у такому стані, в якому вони були на момент події (якщо це не загрожує життю і здоров'ю інших працівників і не призведе до більш тяжких наслідків). Поінформувати про подію керівника робіт (іншу відповідальну особу підприємства) та в подальшому керуватися його вказівками. Вжити заходів, щоб запобігти подібним випадкам у подальшому.

2.5.5. У разі виникнення пожежі (ознак горіння), повідомити керівнику та, за потреби, викликати оперативно-рятувальну службу за телефоном 101 або 112 (назвати адресу та місце виникнення пожежі, наявність людей, повідомити своє прізвище) та вжити можливих заходів для евакуювання людей, гасіння (локалізації) пожежі наявними засобами пожежогасіння. Пам'ятати, що гасіння електротехнічних пристроїв, які перебувають під напругою, виконувати лише після їх попереднього від'єднання від електромережі. Гасити за допомогою вуглекислотних або порошкових вогнегасників, а в окремих випадках — сухим піском.

2.5.6. За потреби надати потерпілому домедичну допомогу згідно з інструкцією, що діє на підприємстві. У разі подальшого погіршення самопочуття потерпілого, не припиняючи надання домедичної допомоги, викликати за телефоном 103 швидку медичну допомогу.

2.5.7. Виконувати вказівки керівника робіт для ліквідування небезпеки.

3 ЗМІСТ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

3.1 Лабораторна робота №1. Ознайомлення з інтерфейсом користувача програмного комплексу «Excalibur». Відновлення рідкого оксиду заліза воднем

3.1.1 Порядок виконання роботи

Ознайомитись з інтерфейсом користувача програмного комплексу «Excalibur» згідно з матеріалами, завантаженими на сторінку дисципліни у СЕЗН Moodle.

1. Вихідні дані:

Склад оксиду заліза $Fe_{0,947}O$, мас.%:

Показник	Fe	O
Оксид заліза $Fe_{0,947}O$*	76,77	23,23

* рівноважний оксид заліза за t = 1600°C

2. За допомогою програми «**Excalibur**» провести термодинамічне моделювання відновлення 10 т рідкого оксиду заліза $Fe_{0,947}O$ воднем у кількості 0..0,6 т.

- середній тиск 100 кПа (1,0 атм);
- температура процесу 1600 + номер варіанта, °С.

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси матеріалів, металу, шлаку і газу, т;
б) склад металу в мас. %;
в) склад шлаку в мас. % оксидів, основність шлаку;
г) парціальний тиск основних компонентів газової фази, атм;
д) загальна вартість матеріалів в умовних одиницях;
е) відношення маси металу до загальної маси шихтових матеріалів (М/ШМ), %;
ж) умовна розрахункова ціна 1 т металу (вартість ШМ/М);
з) кінцева температура процесу.

4. Побудувати графіки залежності параметрів процесу відновлення за п. 3 від маси водню. Зробити висновки щодо впливу маси водню на процес відновлення заліза.

5. На початку виконання роботи завантажити проект БКТ.fwp, завдання «Л.р.1 FeO+H2» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – Так;
Автоматично оцінювати [O] на випуску – Ні;
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – Так;
Елементний склад шлаку – Ні;

6. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

3.1.2 Звіт з лабораторної роботи №1

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

	Маса матеріалів (т) за варіантами						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
$Fe_{0,947}O$	10	10	10	10	10	10	10
Водень	**0**	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**
Загальна маса ш.м.,т							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу, мас. %							
[O]							
[H]							
Маса металу, т							
Відношення М/ШМ, %							
У/ціна 1т металу, у.о.							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
Маса шлаку, т							
Парціальний тиск основних компонентів газової фази, атм							
$\{H_2\}$							
$\{H_2O\}$							
Маса газу, т							
Кінцева температура, °С							

3.2 Лабораторна робота №2. Відновлення рідкого оксиду заліза монооксидом вуглецю

3.2.1 Порядок виконання роботи

1. Вихідні дані:

Склад оксиду заліза $Fe_{0,947}O$, мас.%:

Показник	Fe	O
Оксид заліза $Fe_{0,947}O$*	76,77	23,23

* рівноважний оксид заліза за t = 1600°C

2. За допомогою програми «**Excalibur**» провести термодинамічне моделювання відновлення 10 т рідкого оксиду заліза $Fe_{0,947}O$ монооксидом вуглецю у кількості 0..20 т.

- середній тиск 100 кПа (1,0 атм);
- температура процесу 1600 + номер варіанта, °С.

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси матеріалів, металу, шлаку і газу, т;
б) склад металу в мас. %;
в) склад шлаку в мас. % оксидів, основність шлаку;
г) парціальний тиск основних компонентів газової фази, атм;
д) загальна вартість матеріалів в умовних одиницях;
е) відношення маси металу до загальної маси шихтових матеріалів (М/ШМ), %;
ж) умовна розрахункова ціна 1 т металу (вартість ШМ/М);
з) кінцева температура процесу.

4. Побудувати графіки залежності параметрів процесу відновлення за п. 3 від маси монооксиду вуглецю. Зробити висновки щодо впливу маси монооксиду вуглецю на процес відновлення заліза.

5. На початку виконання роботи завантажити проект БКТ.fwp, завдання «Л.р.2 FeO+CO» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – Так;
Автоматично оцінювати [O] на випуску – Ні;
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – Так;
Елементний склад шлаку – Ні;

6. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

3.2.2 Звіт з лабораторної роботи №2

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

	Маса матеріалів (т) за варіантами						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
$Fe_{0,947}O$	10	10	10	10	10	10	10
Монооксид вуглецю	**0**	**2**	**4**	**8**	**12**	**16**	**20**
Загальна маса ш.м.,т							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[O]							
Маса металу, т							
Відношення М/ШМ, %							
У/ціна 1т металу, у.о.							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
Маса шлаку, т							
Парціальний тиск основних компонентів газової фази, атм							
{CO}							
$\{CO_2\}$							
Маса газу, т							
Кінцева температура, °С							

3.3 Лабораторна робота №3. Відновлення рідкого оксиду заліза сумішшю водню і монооксиду вуглецю

3.3.1 Порядок виконання роботи

1. Вихідні дані:

Склад оксиду заліза $Fe_{0,947}O$, мас.%:

Показник	Fe	O
Оксид заліза $Fe_{0,947}O$*	76,77	23,23

* рівноважний оксид заліза за t = 1600°C

2. За допомогою програми «**Excalibur**» провести термодинамічне моделювання відновлення 10 т рідкого оксиду заліза $Fe_{0,}947O$ сумішшю водню і монооксиду вуглецю у кількості H_2 0..0,2 т, CO 0..10 т.

- середній тиск 100 кПа (1,0 атм);
- температура процесу 1600 + номер варіанта, °C.

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси матеріалів, металу, шлаку і газу, т;
б) склад металу в мас. %;
в) склад шлаку в мас. % оксидів, основність шлаку;
г) парціальний тиск основних компонентів газової фази, атм;
д) загальна вартість матеріалів в умовних одиницях;
е) відношення маси металу до загальної маси шихтових матеріалів (М/ШМ), %;
ж) умовна розрахункова ціна 1 т металу (вартість ШМ/М);
з) кінцева температура процесу.

4. Побудувати графіки залежності параметрів процесу відновлення за п. 3 від маси суміші водню і монооксиду вуглецю. Зробити висновки щодо впливу маси суміші водню і монооксиду вуглецю на процес відновлення заліза.

5. На початку виконання роботи завантажити проект БКТ.fwp, завдання «Л.р.3 FeO+H2+CO» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – Так;
Автоматично оцінювати [O] на випуску – Ні;
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – Так;
Елементний склад шлаку – Ні;

6. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

3.3.2 Звіт з лабораторної роботи №3

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

	Маса матеріалів (т) за варіантами						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
$Fe_{0,947}O$	10	10	10	10	10	10	10
Водень	**0**	**0,02**	**0,04**	**0,06**	**0,08**	**0,10**	**0,2**
Монооксид вуглецю	**0**	**1**	**2**	**4**	**6**	**8**	**10**
Загальна маса ш.м.,т							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[O]							
[H]							
Маса металу, т							
Відношення М/ШМ, %							
У/ціна 1т металу, у.о.							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
Маса шлаку, т							
Парціальний тиск основних компонентів газової фази, атм							
$\{H_2\}$							
$\{H_2O\}$							
{CO}							
$\{CO_2\}$							
Маса газу, т							
Кінцева температура, °С							

3.4 Лабораторна робота №4. Відновлення рідкого оксиду заліза метаном природного газу

3.4.1 Порядок виконання роботи

1. Вихідні дані:

Склад оксиду заліза $Fe_{0,947}O$, мас.%:

Показник	Fe	O
Оксид заліза $Fe_{0,947}O$*	76,77	23,23

* рівноважний оксид заліза за t = 1600°C

2. За допомогою програми «**Excalibur**» провести термодинамічне моделювання відновлення 10 т рідкого оксиду заліза $Fe_{0,947}O$ метаном природного газу (CH_4) з у кількості 0..1,2 т з інтервалом 0,2 т, з додаванням 0,01 т водню у якості каталітичної затравки.

- середній тиск 100 кПа (1,0 атм);
- температура навколишнього середовища 20 °С;
- температура процесу 1600 + номер варіанту, °С.

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси матеріалів, металу, шлаку і газу, т;
б) склад металу в мас. %;
в) склад шлаку в мас. % оксидів, основність шлаку;
г) парціальний тиск основних компонентів газової фази, атм;
д) загальна вартість матеріалів в умовних одиницях;
е) відношення маси металу до загальної маси шихтових матеріалів (М/ШМ), %;
ж) умовна розрахункова ціна 1 т металу (вартість ШМ/М);
з) кінцева температура процесу.

4. Побудувати графіки залежності параметрів процесу відновлення за п. 3 від маси природного газу. Зробити висновки щодо впливу маси природного газу на процес відновлення заліза.

5. На початку виконання роботи завантажити проект БКТ.fwp, завдання «Л.р.4 FeO+CH4» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – Так;
Автоматично оцінювати [O] на випуску – Ні;
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – Так;
Елементний склад шлаку – Ні;

6. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

3.4.2 Звіт з лабораторної роботи №4

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

	Маса матеріалів (т) за варіантами						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
$Fe_{0,947}O$	10	10	10	10	10	10	10
Водень	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Природний газ	**0**	**0,2**	**0,4**	**0,6**	**0,8**	**1,0**	**1,2**
Загальна маса ш.м.,т							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[O]							
[H]							
Маса металу, т							
Відношення М/ШМ, %							
У/ціна 1т металу, у.о.							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
Маса шлаку, т							
Парціальний тиск основних компонентів газової фази, атм							
$\{H_2\}$							
$\{H_2O\}$							
{CO}							
$\{CO_2\}$							
Маса газу, т							
Кінцева температура, °С							

3.5 Лабораторна робота №5. Відновлення шихти при виробництві напівпродукту із застосуванням залізорудних окатишів, вапна і метану природного газу в якості відновника

3.5.1 Порядок виконання роботи

1. Вихідні дані:

Склад залізнорудних окатишів і вапна, мас.%:

Матеріали	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P
Окатиші	3,01	81,1	13,02	0,83	1,22	0,3	0,06	0,01	0,01
Вапно	-	-	3	89	4,6	2,2	-	0,05	0,05

2. За допомогою програми «**Excalibur**» провести термодинамічне моделювання відновлення шихти, що складається з 10 т залізорудних окатишів, 2 т вапна, метаном природного газу (CH_4) у кількості 0,36..4 т, з додаванням 0,01 т водню у якості каталітичної затравки.

- середній тиск 100 кПа (1,0 атм);
- температура навколишнього середовища 20 °С;
- температура процесу 1600 + номер варіанту, °С.

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси матеріалів, металу, шлаку і газу, т;
б) склад металу в мас. %;
в) склад шлаку в мас. % оксидів, основність шлаку;
г) парціальний тиск основних компонентів газової фази, атм;
д) загальна вартість матеріалів в умовних одиницях;
е) відношення маси металу до загальної маси шихтових матеріалів (М/ШМ), %;
ж) умовна розрахункова ціна 1 т металу (вартість ШМ/М);
з) кінцева температура процесу.

4. Побудувати графіки залежності параметрів процесу відновлення за п. 3 від маси природного газу. Зробити висновки щодо впливу маси природного газу на процес відновлення заліза.

5. На початку виконання роботи завантажити проект БКТ.fwp, завдання «Л.р.5 Окатиші+CH4» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – Так;
Автоматично оцінювати [O] на випуску – Ні;
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – Так;
Елементний склад шлаку – Ні;

6. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

3.5.2 Звіт з лабораторної роботи №5

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

	Маса матеріалів (т) за варіантами						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Окатиші	10	10	10	10	10	10	10
Вапно	2	2	2	2	2	2	2
Водень	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Природний газ	**0,36**	**0,5**	**1**	**1,5**	**2,5**	**3,5**	**4**
Загальна маса ш.м.,т							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу (напівпродукту), мас. %							
[O]							
[Si]							
[Mn]							
[Al]							
[S]							
[P]							
[H]							
Маса металу, т							
Відношення М/ШМ, %							
У/ціна 1т металу, у.о.							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P_2O_5)							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Парціальний тиск основних компонентів газової фази, атм							
{CO}							
{CO_2}							
{H_2}							
{H_2O}							
Маса газу, т							
Кінцева т-ра, °С							

3.6 Лабораторна робота №6. Твердофазне пряме відновлення шихти при виробництві напівпродукту із застосуванням офлюсованого агломерату, окатишів, залізної руди, вапна і твердого вуглецю в якості відновника

3.6.1 Порядок виконання роботи

1. Вихідні дані:

Склад агломерату, залізної руди, окатишів, вапна і твердого вуглецю, мас.%:

Матеріали	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	H_2O	S	C	P
Агломерат	14	58,76	11,39	11,13	0,93	1,83	0,67	-	0,05	0,5	0,03
Окатиші	3,01	81,1	13,02	0,83	1,22	0,3	0,06	-	0,01	-	0,01
Fe руда	5,78	67,9	26,9	1,45	0,52	1,82	0,18	2	0,027	-	0,05
Вапно	-	-	3	89	4,6	2,2	-	-	0,05	-	0,05
Тв.вуглець	-	-	-	-	-	-	-	5	0,5	80	0,01

2. За допомогою програми «**Excalibur**» провести моделювання твердофазного прямого відновлення шихти, що складається з офлюсованого агломерату (5 т), окатишів (15 т), залізної руди (15 т), вапна (5 т). Маса відновника – твердого вуглецю – варіюється в межах 2,5..10 т. Прийняти наступні умови:

- середній тиск 100 кПа (1,0 атм);
- температура навколишнього середовища 20 + номер варіанта, °С.

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси шихти, металу, шлаку і газу, т;
б) склад металу в мас. %;
в) склад шлаку в мас. % оксидів, основність шлаку;
г) парціальний тиск основних компонентів газової фази, атм;
д) загальна вартість шихтових матеріалів в умовних одиницях;
е) відношення маси металу до загальної маси шихтових матеріалів (М/ШМ), %;
ж) умовна розрахункова ціна 1 т металу (вартість ШМ/М);
з) кінцева температура процесу.

4. Побудувати графіки залежності параметрів процесу відновлення за п. 3 від маси водню. Зробити висновки щодо впливу маси водню на процес прямого відновлення.

5. На початку виконання роботи завантажити проект БКТ.fwp, завдання «Л.р.6 Шихта+Тв.вуглець» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – Так;
Автоматично оцінювати [О] на випуску – Ні;
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – Так;
Елементний склад шлаку – Ні;

6. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

3.6.2 Звіт з лабораторної роботи №6

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

	Маса матеріалів (т) за варіантами						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Агломерат	5	5	5	5	5	5	5
Fe руда	15	15	15	15	15	15	15
Окатиші	15	15	15	15	15	15	15
Вапно	5	5	5	5	5	5	5
Твердий вуглець	**2,5**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**10**
Загальна маса ш.м.,т							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу (напівпродукту), мас. %							
[O]							
[Si]							
[Mn]							
[Al]							
[S]							
[P]							
[H]							
Маса металу, т							
Відношення М/ШМ, %							
У/ціна 1т металу, у.о.							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P_2O_5)							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Парціальний тиск основних компонентів газової фази, атм							
{CO}							
{CO_2}							
{H_2}							
{H_2O}							
Маса газу, т							
Кінцева т-ра, °С							

3.7 Лабораторна робота №7. Рідкофазне пряме відновлення при виробництві напівпродукту із застосуванням рідкої шихти: офлюсованого агломерату, окатишів, залізної руди, вапна і водню в якості відновника

3.7.1 Порядок виконання роботи

1. Вихідні дані:

Склад агломерату, залізної руди, окатишів і вапна, мас.%:

	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P
Агломерат	14	58,76	11,39	11,13	0,93	1,83	0,67	0,05	0,03
Окатиші	3,01	81,1	13,02	0,83	1,22	0,3	0,06	0,01	0,01
Fe руда	5,78	67,9	26,9	1,45	0,52	1,82	0,18	0,027	0,05
Вапно	-	-	3	89	4,6	2,2	-	0,05	0,05

2. За допомогою програми «**Excalibur**» провести моделювання рідкофазного прямого відновлення рідкої шихти, що складається з офлюсованого агломерату (20 т), окатишів (60 т), залізної руди (60 т), вапна (10 т). Маса відновника водня варіюється в межах 2,5..30 т з інтервалом 5 т. Прийняти наступні умови:

- середній тиск 100 кПа (1,0 атм);
- температура рідких шихтових матеріалів 1600 + номер варіанта, °С.

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси шихти, металу, шлаку і газу, т;
б) склад металу в мас. %;
в) склад шлаку в мас. % оксидів, основність шлаку;
г) парціальний тиск основних компонентів газової фази, атм;
д) загальна вартість шихтових матеріалів в умовних одиницях;
е) відношення маси металу до загальної маси шихтових матеріалів (М/ШМ), %;
ж) умовна розрахункова ціна 1 т металу (вартість ШМ/М);
з) кінцева температура процесу.

4. Побудувати графіки залежності параметрів процесу відновлення за п. 3 від маси водню. Зробити висновки щодо впливу маси водню на процес прямого відновлення. Запропонувати варіанти можливого використання залишку тепла, що утворюється в процесі відновлення заліза із рідкої шихти.

5. На початку виконання роботи завантажити проект БКТ.fwp, завдання «Л.р.7 Рідка шихта+Н2» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – Так;
Автоматично оцінювати [О] на випуску – Ні;
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – Так;
Елементний склад шлаку – Ні;

6. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

3.7.2 Звіт з лабораторної роботи №7

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

	Маса матеріалів (т) за варіантами						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Агломерат	20	20	20	20	20	20	20
Fe руда	60	60	60	60	60	60	60
Окатиші	60	60	60	60	60	60	60
Вапно	10	10	10	10	10	10	10
Водень	**2,5**	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**	**30**
Загальна маса ш.м.,т							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу (напівпродукту), мас. %							
[O]							
[Si]							
[Mn]							
[Al]							
[S]							
[P]							
[H]							
Маса металу, т							
Відношення М/ШМ, %							
У/ціна 1т металу, у.о.							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P_2O_5)							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Парціальний тиск основних компонентів газової фази, атм							
{H_2}							
{H_2O}							
Маса газу, т							
Кінцева т-ра, °С							

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

4.1 Контрольні питання до лабораторного заняття №1

1. Загальна характеристика відновлення заліза з оксидів воднем.
2. Тепловий ефект реакцій відновлення заліза з оксидів воднем.
3. Вплив температури на відновну здатність водню у реакціях відновлення заліза з оксидів.
4. Вплив тиску на відновну здатність водню у реакціях відновлення заліза з оксидів.
5. Рівновага реакцій відновлення заліза з оксидів воднем.
6. Витрата водню на відновлення оксидів заліза.
7. Ступінь відновлення заліза з оксидів воднем.
8. Мінімальна кількість водню для відновлення оксидів заліза.
9. Склад рівноважних газових сумішей H_2 / H_2O для відновлення оксидів заліза.
10. Парціальний тиск основних компонентів газової фази при відновленні заліза з оксидів воднем.
11. Вплив кількості відновника водню на відношення маси відновленого металу до загальної маси шихтових матеріалів.
12. Вплив кількості відновника водню на умовну розрахункову ціну 1 т відновленого металу.
13. Ступінь засвоювання водню у реакціях відновлення заліза з оксидів воднем.
14. Вплив кількості відновника водню на хімічний склад відновленого металу.
15. Вплив кількості відновника водню на хімічний склад газової фази.

4.2 Контрольні питання до лабораторного заняття №2

1. Загальна характеристика відновлення заліза з оксидів монооксидом вуглецю.
2. Тепловий ефект реакцій відновлення заліза з оксидів монооксидом вуглецю.
3. Вплив температури на відновну здатність монооксиду вуглецю у реакціях відновлення заліза з оксидів.
4. Вплив тиску на відновну здатність монооксиду вуглецю у реакціях відновлення заліза з оксидів.
5. Рівновага реакцій відновлення оксидів заліза оксидом вуглецю, газифікації вуглецю та цементації.
6. Витрата монооксиду вуглецю на відновлення заліза з оксидів.
7. Ступінь відновлення заліза з оксидів монооксидом вуглецю.
8. Схема ідеального процесу відновлення заліза оксидом вуглецю.
9. Мінімальна кількість монооксиду вуглецю для відновлення оксидів заліза.

10. Склад рівноважних газових сумішей CO / CO_2 для відновлення оксидів заліза.
11. Парціальний тиск основних компонентів газової фази при відновленні заліза з оксидів монооксидом вуглецю.
12. Вплив кількості відновника монооксиду вуглецю на відношення маси відновленого металу до загальної маси шихтових матеріалів.
13. Вплив кількості відновника монооксиду вуглецю на умовну розрахункову ціну 1 т відновленого металу.
14. Ступінь засвоювання водню у реакціях відновлення заліза з оксидів монооксидом вуглецю.
15. Вплив кількості відновника монооксиду вуглецю на хімічний склад відновленого металу.
16. Вплив кількості відновника монооксиду вуглецю на хімічний склад газової фази.

4.3 Контрольні питання до лабораторного заняття №3

1. Загальна характеристика відновлення заліза з оксидів сумішшю водню і монооксиду вуглецю.
2. Тепловий ефект реакцій відновлення заліза з оксидів сумішшю водню і монооксиду вуглецю.
3. Вплив температури на відновну здатність суміші водню і монооксиду вуглецю у реакціях відновлення заліза з оксидів.
4. Вплив тиску на відновну здатність суміші водню і монооксиду вуглецю у реакціях відновлення заліза з оксидів.
5. Рівновага реакцій відновлення заліза з оксидів сумішшю водню і монооксиду вуглецю.
6. Витрата суміші водню і монооксиду вуглецю на відновлення оксидів заліза.
7. Ступінь відновлення заліза з оксидів сумішшю водню і монооксиду вуглецю.
8. Мінімальна кількість суміші водню і монооксиду вуглецю для відновлення оксидів заліза.
9. Склад рівноважних газових фаз на основі суміші H_2 та CO для відновлення оксидів заліза.
10. Парціальний тиск основних компонентів газової фази при відновленні заліза з оксидів сумішшю водню і монооксиду вуглецю.
11. Вплив кількості відновника суміші водню і монооксиду вуглецю на відношення маси відновленого металу до загальної маси шихтових матеріалів.
12. Вплив кількості відновника суміші водню і монооксиду вуглецю на умовну розрахункову ціну 1 т відновленого металу.
13. Ступінь засвоювання суміші водню і монооксиду вуглецю у реакціях відновлення заліза з оксидів воднем.
14. Вплив кількості відновника суміші водню і монооксиду вуглецю на

хімічний склад відновленого металу.
15. Вплив кількості відновника суміші водню і монооксиду вуглецю на хімічний склад газової фази.

4.4 Контрольні питання до лабораторного заняття №4

1. Загальна характеристика відновлення заліза з оксидів метаном природного газу.
2. Тепловий ефект реакцій відновлення заліза з оксидів метаном природного газу.
3. Вплив температури на відновну здатність метану природного газу у реакціях відновлення заліза з оксидів.
4. Вплив тиску на відновну здатність метану природного газу у реакціях відновлення заліза з оксидів.
5. Рівновага реакцій відновлення заліза з оксидів метаном природного газу.
6. Витрата метану природного газу на відновлення оксидів заліза.
7. Ступінь відновлення заліза з оксидів метаном природного газу.
8. Мінімальна кількість метану природного газу для відновлення оксидів заліза.
9. Склад рівноважних газових фаз на основі метану природного газу для відновлення оксидів заліза.
10. Парціальний тиск основних компонентів газової фази при відновленні заліза з оксидів метаном природного газу.
11. Вплив кількості відновника – метану природного газу – на відношення маси відновленого металу до загальної маси шихтових матеріалів.
12. Вплив кількості відновника – метану природного газу – на умовну розрахункову ціну 1 т відновленого металу.
13. Ступінь засвоювання водню у реакціях відновлення заліза з оксидів метаном природного газу.
14. Вплив кількості відновника – метану природного газу – на хімічний склад відновленого металу.
15. Вплив кількості відновника – метану природного газу – на хімічний склад газової фази.

4.5 Контрольні питання до лабораторного заняття №5

1. Загальна характеристика відновлення залізорудних окатишів метаном природного газу.
2. Тепловий ефект реакцій відновлення залізорудних окатишів метаном природного газу.
3. Вплив температури на відновну здатність метану природного газу у реакціях відновлення залізорудних окатишів.
4. Вплив тиску на відновну здатність метану природного газу у реакціях відновлення залізорудних окатишів.
5. Рівновага реакцій відновлення залізорудних окатишів метаном

природного газу.
6. Витрата метану природного газу на відновлення залізорудних окатишів.
7. Ступінь відновлення залізорудних окатишів метаном природного газу.
8. Мінімальна кількість метану природного газу для відновлення залізорудних окатишів.
9. Склад рівноважних газових фаз на основі метану природного газу для відновлення залізорудних окатишів.
10. Парціальний тиск основних компонентів газової фази при відновленні залізорудних окатишів метаном природного газу.
11. Вплив кількості відновника метану природного газу на відношення маси відновленого металу до загальної маси шихтових матеріалів.
12. Вплив кількості відновника метану природного газу на умовну розрахункову ціну 1 т відновленого металу.
13. Ступінь засвоювання водню у реакціях відновлення залізорудних окатишів метаном природного газу.
14. Вплив кількості відновника метану природного газу на хімічний склад відновленого металу.
15. Вплив кількості відновника метану природного газу на хімічний склад газової фази.
16. Можливості інтенсифікації процесу відновлення залізорудних окатишів метаном природного газу.

4.6 Контрольні питання до лабораторного заняття №6

1. Загальна характеристика відновлення залізорудних матеріалів твердим вуглецем.
2. Тепловий ефект реакцій відновлення залізорудних матеріалів твердим вуглецем.
3. Вплив температури на відновну здатність твердого вуглецю у реакціях відновлення залізорудних матеріалів.
4. Вплив тиску на відновну здатність твердого вуглецю у реакціях відновлення залізорудних матеріалів.
5. Рівновага реакцій відновлення залізорудних матеріалів твердим вуглецем.
6. Витрата твердого вуглецю на відновлення залізорудних матеріалів.
7. Ступінь відновлення залізорудних матеріалів твердим вуглецем.
8. Мінімальна кількість твердого вуглецю для відновлення залізорудних матеріалів.
9. Парціальний тиск основних компонентів газової фази при відновленні залізорудних матеріалів твердим вуглецем.
10. Вплив кількості відновника твердого вуглецю на відношення маси відновленого металу до загальної маси шихтових матеріалів.
11. Вплив кількості відновника твердого вуглецю на умовну розрахункову ціну 1 т відновленого металу.
12. Ступінь засвоювання вуглецю у реакціях відновлення залізорудних

матеріалів твердим вуглецем.
13. Вплив кількості відновника твердого вуглецю на хімічний склад відновленого металу.
14. Вплив кількості відновника твердого вуглецю на хімічний склад газової фази.
15. Особливості процесу «SL-RN».
16. Можливості інтенсифікації процесу відновлення залізорудних матеріалів твердим вуглецем.

4.7 Контрольні питання до лабораторного заняття №7

1. Загальна характеристика відновлення рідкої залізорудної шихти воднем.
2. Тепловий ефект реакцій відновлення рідкої залізорудної шихти воднем.
3. Вплив температури на відновну здатність водню у реакціях відновлення рідкої залізорудної шихти.
4. Вплив тиску на відновну здатність водню у реакціях відновлення рідкої залізорудної шихти.
5. Рівновага реакцій відновлення рідкої залізорудної шихти воднем.
6. Витрата водню на відновлення рідкої залізорудної шихти.
7. Ступінь відновлення рідкої залізорудної шихти воднем.
8. Мінімальна кількість водню для відновлення рідкої залізорудної шихти.
9. Парціальний тиск основних компонентів газової фази при відновленні рідкої залізорудної шихти воднем.
10. Вплив кількості відновника водню на відношення маси відновленого металу до загальної маси шихтових матеріалів.
11. Вплив кількості відновника водню на умовну розрахункову ціну 1 т відновленого металу.
12. Ступінь засвоювання водню у реакціях відновлення рідкої залізорудної шихти воднем.
13. Вплив кількості відновника водню на хімічний склад відновленого металу.
14. Вплив кількості відновника водню на хімічний склад газової фази.
15. Можливості інтенсифікації процесу відновлення рідкої залізорудної шихти воднем.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Безкоксова металургія заліза : підручник для вищих навчальних закладів / В. П. Іващенко, О. Г. Величко, В. С. Терещенко та ін. Дніпропетровськ : Дніпро-ВАЛ, 2003. 336 с.
2. Губін Г. В., Півень В. О. Сучасні промислові способи безкоксової металургії заліза : монографія. Кривий Ріг : Криворіз. техн. ун-т, 2010. 332 с.
3. Бондаренко Б. І., Шаповалов В. О., Гармаш М. І. Теорія і технологія безкоксової металургії. Київ : Наукова думка, 2003. 535с.
4. Коксозамінні технології в доменній плавці : монографія / Лялюк В. П., Товаровський Й. Г., Демчук Д. О. та ін. Дніпропетровськ : Пороги, 2006. 276 с.
5. ДСанПіН 5.5.6.009-98. Влаштування і обладнання кабінетів комп'ютерної техніки в навчальних закладах та режим праці на персональних комп'ютерах. Державні санітарні правила та норми. Київ, 1998.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Основна:

1. Воденніков С. А., Тарасов В. К., Воденнікова О. С. Конструкції агрегатів чорної металургії : навч. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 192 с.
2. Новак С. Б, Гармаш Н. І., Мартиненко В. А. та ін. Теорія та практика управлінням агломераційним процесом. Кривий Ріг, 2006. 340с.
3. Тищенко О. П. Динаміка відновлення рудно-вугільних окатишів при моделюванні умов інтегрального процесу. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2003. №6. С.8-10.
4. Gordon Y., Els J. Application of ITmk3 technology in the mining and metallurgical industry of Ukraine. *International Conference on Metallurgical Technologies*. Kyiv, Ukraine. 21.03.2007.
5. Грицина А. Є., Трушін П. С., Губін Г. В., Ткач В. В. Про міні-металургійні комплекси на гірничо-збагачувальних комбінатах. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2003. №7. С.41-43.
6. Таратута К. В., Гроздєв А. В. Аналіз конструкцій валкових млинів для підготовки пиловугільного палива та шляхи їх подальшого розвитку. Збірник наукових праць «Металургія». 2016. № 1(35). С. 58-60.
7. Жук А. Я., Желябина Н. К. Механічне устаткування цехів по виробництву металів та сплавів : навч. посіб. Запоріжжя : Видавництво ЗДІА, 1998. 216с.
8. Харченко О. В., Лічконенко Н. В. Комп’ютерна програма «Excalibur». Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір №111007 від 12.01.2022р.

Додаткова:

1. Masoloch P. E., Zittard J., Walden K. Steel production using direct reduced iron and hot briquetted iron. *Metalurgical Plant and Technology*, June 2003, PP. 1-9.
2. Готліб А. Д. Доменний процес. Київ : ДВТЛ УРСР, 1958. 510с.
3. Ковтун В. Ф. Заболоцька Н. П. Дезарсенізація та відновлення керченських руд метаном. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 1964. №4. С. 68-71.
9. Watanabe S. Yoshinaga. Swelling of iron ore pellets during reduction. *Sumitomo Kinzoku*. 1965. No. 14. PP. 323-330.
10. Ishimitsu A., Sugawara K. Phenomenon of pellet swelling during reduction. *Tetsu To Hagane*. 1964. V.50. No.11. PP. 1888-1889.
11. Taylor I. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1956. Vol.184. Part 1. PP.1-6.
12. Ez C. Investigation of iron ore reduction in fluid bed. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1960. 218, №4. PP. 709-715.
13. Bhat G., Witenhead D. Iron ore reduction in fluidized bed. *Austr. Itt. Proc*. 1962. V.201. PP. 97-115.
14. Бондаренко Б. І. Відновлення залізорудних матеріалів у киплячому шарі продуктами конверсії газу. *Автореф. дис. на здобуття вч. ступеня канд. тех. наук*. Київ, 1968. 26с.
15. McKewan W. M. Reduction Kinetics of Hematite in Hydrogen – Water Vapor – Nitrogen Mixtures. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1962. V. 224, №2. P.2.
16. Товаровський Й. Г. Доменна плавка. Еволюція, хід процесів, проблеми та перспективи : підр. для вишів. Дніпропетровськ : Пороги, 2003. 560 с.
17. Красавцев М. І. Про підвищення ефективності доменної плавки. Київ, 1960. 99с.

Інформаційні джерела:

1. Платформа дистанційного навчання Moodle ЗНУ. Безкоксова технологія. URL: https://moodle.znu.edu.ua/course/view.php?id=8120 (дата звернення: 01.12.2024).
2. Машини і агрегати аглодоменних цехів. Електронне видання. URL: https://sites.google.com/view/kravchenko—anna/%D0%B4%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%BD%D1%8F–%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%BD%D0%BA%D0%B0 (дата звернення: 01.12.2024).
3. Метал України та світу – новини та аналітика металургійного комплексу; досьє (колекція матеріалів преси) на підприємствах України. Електронне видання. URL: https://ukrmet.dp.ua (дата звернення: 01.12.2024).
4. Наукова бібліотека Запорізького національного університету. Електронне видання. URL: https://library.znu.edu.ua/ (дата звернення: 01.12.2024).

5. Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського. Електронне видання. URL: http://www.nbuv.gov.ua/ (дата звернення: 01.12.2024).

Навчально-методичне видання
(українською мовою)

Харченко Олександр Вікторович

БЕЗКОКСОВА ТЕХНОЛОГІЯ

Методичні рекомендації
до лабораторних робіт
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальності G10 «Металургія» освітньо-професійних програм
«Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів»,
«Обробка металів тиском»

Рецензент *Д. В. Прутцьков*
Відповідальний за випуск *Ю. О. Бєлоконь*
Коректор О. С. *Воденнікова*