

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

**РЕСУРСОЗАОЩАДЖУВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА
РЕЦИКЛІНГ В АГЛОДОМЕННОМУ ВИРОБНИЦТВІ:**

**методичні вказівки
до виконання практичних робіт**

Запоріжжя 2024



УДК 669.162 (072)
Р43

Рекомендовано Науково-методичною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 1 від 27.09.2024 р.)

Укладачі:

Бойко М.М., канд. техн. наук, доцент,
Синегін Є.В., канд. техн. наук, доцент,
Стоянов О.М., канд. техн. наук, доцент,
Семірягін С.В., канд. техн. наук, доцент

Р43 **Ресурсозаощаджувальні** технології та рециклінг в аглодоменному виробництві : методичні рекомендації до виконання практичних робіт / уклад.: М. М. Бойко, Є. В. Синегін, О. М. Стоянов, С. В. Семірягін. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024. 22 с.

У методичних рекомендаціях наведено поради і методичні підходи до виконання практичних робіт, які виконуються в процесі вивчення дисципліни. Матеріал містить короткі теоретичні викладки за тематикою робіт, завдання для їх виконання, порядок оформлення звіту та питання для підготовки до її захисту.

УДК 669.162 (072)



ЗМІСТ

ВСТУП	4
Правила виконання практичних робіт	4
Загальні вказівки щодо оформлення звіту та критерії оцінювання	4
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1. Методи й розрахунки охолодження газових потоків	6
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2. Розрахунок пилоосаджувальних камер і колекторів	8
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3. Розрахунки порожнього скрубера і скрубера з насадкою	9
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4. Розрахунок пінного апарату	11
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5. Розрахунки пиловловлювачів із трубами вентури	13
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6. Технологічний розрахунок рукавного фільтра	14
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 7. Розрахунок електрофільтра	16
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 8. Розрахунок кількості реакційних зон при відновленні воднем у шахтному агрегаті	17
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	21



ВСТУП

Ресурсозаощаджувальні технології та рециклінг в аглодоменному виробництві – обов'язковий курс металургійної підготовки та вибіркового для інших спрямувань, який дозволить Вам зрозуміти схеми ресурсозбереження у аглодоменному виробництві, основні напрямки використання енергетичних ресурсів при виробництві окускованої сировини та чавуну, вплив нових тенденцій регенерації джерел вторинної енергії аглодоменного виробництва.

Дисципліна орієнтована на вивчення технології доменної плавки з рециркуляцією продуктів металургійного виробництва з застосуванням перспективних розробок нових екологічно чистих енерго- та ресурсозберігаючих технологій у доменному виробництві. Розглянуті технології поєднуються з питаннями економіки та права екологічного забезпечення виробництва чавуну.

Отримані знання можуть бути корисними при розробці та захисті випускної кваліфікаційної роботи.

Правила виконання практичних робіт

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

Загальні вказівки щодо оформлення звіту та критерії оцінювання

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

Практичні роботи здобувачами виконуються за допомогою обчислювальної техніки, опціонально в середовищі Microsoft Excel. Результатом виконання практичної роботи є оформлений за вимогами та зданий звіт. Максимальна кількість балів, яку здобувач може отримати за виконання кожної практичної роботи – 5.

Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звітів

Кількість балів	Критерій оцінювання
5	Здобувач(ка) працював(ла) на практичних заняттях, приймав(ла) активну участь у виконанні завдання, виконав(ла) роботу в повному обсязі за своїм варіантом та завантажив(ла) оформлений відповідно до вимог звіт в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття)
4	Здобувач(ка) працював(ла) на практичних заняттях, виконав(ла) роботу в повному обсязі за своїм варіантом та завантажив(ла) оформлений відповідно до вимог звіт в Moodle згідно з семестровим графіком (до наступного заняття), але припустив(ла)ся незначних помилок в програмі
3	Здобувач(ка) не працював(ла) на практичних заняттях, повністю виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали відповідно до методичних рекомендацій в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
2-1	Здобувач(ка) не працював(ла) на практичних заняттях, частково або з суттєвими помилками виконав(ла) завдання та завантажив(ла) звітні матеріали в Moodle пізніше терміну вказаного у семестровому графіку
0	Здобувач(ка) був(ла) відсутня на практичних заняттях та не завантажив(ла) звіт (сертифікат) в Moodle



ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1 МЕТОДИ Й РОЗРАХУНКИ ОХОЛОДЖЕННЯ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ

Мета роботи – ознайомлення з методами розрахунку охолодження газових потоків та їх застосування для аглодоменного виробництва.

Завдання до розрахунку

1. Визначити необхідну кількість повітря для розведення V м³/год продуктів згоряння, що відходять, для зниження температури з t_d до $t_{\text{сум}}$ °С. Температура навколишнього повітря t_n °С. Склад продуктів згоряння наведений у таблиці.

Таблиця 1 – Склад продуктів згоряння, що відходять, %


Варіант	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	Σ
I	13.26	0.02	11.52	72.68	2.52	100
II	11.3	—	17.6	69.6	1.5	100
III	12.4	0.1	17.3	68.0	2.2	100
IV	22.5	—	4.1	72.1	1.3	100
V	14.2	0.05	12.15	72.5	1.1	100
VI	12,2	0,02	9,67	74,8	3,31	100

Таблиця 2 – Вихідні дані для розрахунку

Параметри	Варіанти розрахунку				
	I	II	III	IV	V
1. Кількість продуктів згоряння, що відходять V , м ³ /год	2000	3000	4000	5000	6000
2. Температура продуктів згоряння, що відходять t_d , °С	1200	950	900	1000	1100
3. Температура навколишнього повітря t_n , °С	18	15	20	25	10
4. Температура суміші $t_{\text{сум}}$, °С	350	300	400	450	500

2. Визначити кількість і склад суміші газів, що утвориться, при охолодженні продуктів згоряння, що відходять, шляхом їхнього розведення навколишнім повітрям за вихідними даними, наведеним у задачі 1.

3. Визначити похибку обчислень при розрахунку кількості повітря необхідного для розведення продуктів згоряння, що відходять, з метою зниження температури газів перед газоочисткою при використанні методу



послідовних наближень і спрощеної методики. Склад газів, що відходять, прийняти таким самим, як у пункті 1.

Таблиця 3 – Вихідні дані для розрахунку

Параметри	Варіанти розрахунку				
	I	II	III	IV	V
1. Кількість продуктів згоряння, що відходять V , м ³ /год	25000	30000	35000	40000	45000
2. Температура продуктів згоряння, що відходять t_d , °C	700	750	800	850	900
3. Температура навколишнього повітря t_n , °C	10	15	20	25	0
4. Температура суміші $t_{\text{сум}}$, °C	250	300	350	450	400



ПРАКТИЧНА РОБОТА №2 РОЗРАХУНОК ПИЛООСАДЖУВАЛЬНИХ КАМЕР І КОЛЕКТОРІВ

Мета роботи – ознайомлення з методами розрахунку пилоосаджувальних камер і колекторів та їх застосування для аглодоменного виробництва.

Завдання до розрахунку

1. Необхідно визначити розміри горизонтального колектора прямокутної форми (рисунок 2.1) системи аспіраційної вентиляції за наступними даними: кількість повітря V_0 , м³/год.; температура повітря t , °С; розрідження перед колектором p , Па; барометричний тиск $p_{бар}$, Па; густина пилу, що втримується в повітрі ρ_p , г/см³; розміри часток пилу d_p , мкм. Вихідні дані для розрахунку приведені нижче в таблиці 4.

Таблиця 4 – Вихідні дані для розрахунку

Параметри	Варіанти розрахунку				
	I	II	III	IV	V
1. Кількість повітря P_0 , м ³ /год.	6000	8000	10000	12000	14000
2. Температура повітря t , °С	40	50	60	70	80
3. Розрідження перед колектором p , Па	350	400	490	550	600
4. Барометричний тиск $P_{бар}$, Па	101325	101325	101325	101325	101325
5. Густина пилу, що втримується в повітрі ρ_p , г/см ³	3,0	3,2	3,5	3,8	4,0
6. Розміри часток пилу d_p , мкм	30	35	40	45	50

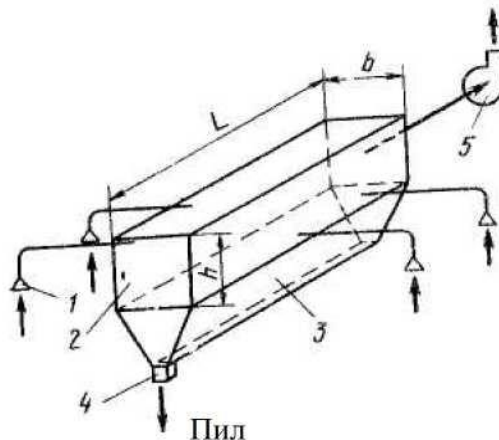


Рисунок 1 – Схема горизонтального колектора: 1 - відсмоктування; 2 - колектор; 3 - бункер колектора; 4 - патрубок для видалення пилу; 5 – вентилятор

ПРАКТИЧНА РОБОТА №3 РОЗРАХУНКИ ПОРОЖНЬОГО СКРУБЕРА І СКРУБЕРА З НАСАДКОЮ

Мета роботи – ознайомлення з методами розрахунку порожнього скрубера і скрубера з насадкою та їх застосування для аглодомного виробництва.

Завдання до розрахунку

1. Розрахувати порожній скрубера для охолодження вологого газу обсягом V тис. м³/год із початкової температури t_1 до кінцевої температури t_2 .

Таблиця 5 – Хімічний склад газу %

Варіант	CO ₂	SO ₂	CO	N ₂	Σ
I	22,0	—	57,0	21,0	100
II	21,0	1,0	30,0	48,0	100
III	20,5	—	32,2	47,3	100
IV	23,0	2,0	34,2	40,8	100
V	24,8	2,5	36,4	36,3	100
VI	25,3	1,5	32,8	40,4	100

Початковий вологовміст f г/м³; тиск газу перед скруберам P Па; барометричний тиск 745 мм.рт.ст; температура води, що надходить у скрубера t_n °С.

Таблиця 6 – Вихідні дані для розрахунку

Параметри	Варіанти розрахунку				
	I	II	III	IV	V
1. Кількість газу, що очищується, V , тис. м ³ /год	50	40	30	60	70
2. Початкова температура газу t_1 , °С.	350	300	250	200	400
3. Кінцева температура газу t_2 , °С.	95	85	9	8	92
4. Вологовміст газу, що очищується, f , г/м ³ .	10	15	20	25	30
5. Температура води, що надходить у скрубера t_n , °С.	30	25	20	15	10
6. Тиск газу перед скруберам P , Па.	49000	30000	40000	350000	450000

2. Потрібно охолодити в скрубєрі з насадкою V м³/год газу шахтних печей свинцевого виробництва від t_1 до t_2 °С. Газу по своєму складу близькі до атмосферного повітря й містять водяних парів близько f г/м³. Початкова запиленість газів, які охолоджуються близько q г/м³. Об'ємна питома теплоємність газів дорівнює 1,26 кДж/(м³·°С). Тиск газів у скрубєрі близький до атмосферного (760 мм.рт.ст.). Для охолодження газів обрана схема із циркуляцією рідини без проміжного її охолодження. При розрахунку прийнято, що в скрубєрі вловлюється 60 % пилу, що надходить із газами; у циклі зрошення варто підтримувати й виводити у відстійник пульпу, що містить 60 г/дм³ твердої речовини. Втратами тепла скрубєром у навколишнє середовище зневажаємо. Температуру рідини, що зрошує, приймаємо рівній температурі мокрого термометра.

Таблиця 7 – Вихідні дані для розрахунку

Параметри	Варіанти розрахунку				
	I	II	III	IV	V
1. Кількість газу, що очищується, V , тис. м ³ /год	40000	45000	35000	30000	50000
2. Початкова температура газу t_1 , °С.	250	150	100	200	300
3. Кінцева температура газу t_2 , °С.	60	70	55	65	80
4. Вологовміст газу, що очищується, f , г/м ³ .	50	45	30	35	25
5. Початкова запиленість газу q , г/м ³ .	30	25	20	15	10

ПРАКТИЧНА РОБОТА №4 РОЗРАХУНОК ПІННОГО АПАРАТУ

Мета роботи – ознайомлення з методами розрахунку пінного апарату та його застосування для аглодоменного виробництва.

Завдання до розрахунку

1. Розрахувати основні розміри пінного апарату, який призначений для очищення вентиляційного повітря від пилу. Вихідні дані для розрахунку представлені нижче в таблиці.

Таблиця 8 – Вихідні дані для розрахунку

Параметри	Варіанти розрахунку				
	I	II	III	IV	V
1. Кількість повітря, V_0 , м ³ /год.	6000	6500	7000	7500	8000
2. Початкова температура газу t_1 , °С.	55	60	65	70	75
3. Вологовміст повітря, f_1 г/м ³	95	100	85	80	90
4. Запиленість повітря, q_1 , г/м ³ .	10	12	14	16	18
5. Густина пилу, ρ_n , г/см ³	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
6. Розрідження повітря на вході до апарату, p , Па	-450	-460	-470	-480	-490
7. Барометричний тиск, $p_{бар}$, Па	101325	101325	101325	101325	101325
8. Густина повітря, ρ_0 , кг/м ³	1,293	1,293	1,293	1,293	1,293
9. Ступінь очищення повітря, Π	0,8	0,82	0,84	0,86	0,9

Дисперсний склад пилу, у відповідності до варіантів, має наступні значення.

Таблиця 9 – Дисперсний склад пилу

Варіант	Найменування	Величина				
		<4	4 - 8	8 - 25	25 - 50	>50
1	Розмір часток, мкм	<4	4 - 8	8 - 25	25 - 50	>50
	Середній розмір частки, мкм	2,0	6,0	11,0	31,0	50,0
	% по масі	5,0	20,0	10,0	15,0	50,0
2	Розмір часток, мкм	<4	4 - 10	10 - 24	24 - 50	>50
	Середній розмір частки, мкм	2,5	6,5	12,0	32,0	52,0
	% по масі	10,0	15,0	20,0	10,0	45,0
3	Розмір часток, мкм	<6	6 - 14	14 - 24	24 - 50	>50
	Середній розмір частки, мкм	3,0	7,0	13,0	33,0	54,0
	% по масі	15,0	10,0	30,0	5,0	40,0
4	Розмір часток, мкм	<7	7 - 10	10 - 26	26 - 50	>50
	Середній розмір частки, мкм	3,5	7,5	12,5	34,0	55,0
	% по масі	20,0	5,0	40,0	10,0	25,0
5	Розмір часток, мкм	<6	6 - 16	16 - 20	20 - 50	>50
	Середній розмір частки, мкм	4,0	8,0	15,0	35,0	56,0
	% по масі	20,0	5,0	15,0	25,0	35,0

ПРИМІТКА: Розміри пінного апарата визначають по швидкості, що рекомендується, у його поперечному перерізі. При розрахунку кількості води, яку варто подати на ґрати, ураховують витрату води на виведення уловленого пилу й на конденсацію води, що випарувалася, у процесі охолодження газу. Потім визначають гідравлічний опір ґрат і ступінь очищення газу в пінному апараті.



ПРАКТИЧНА РОБОТА №5 РОЗРАХУНКИ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ ІЗ ТРУБАМИ ВЕНТУРІ

Мета роботи – ознайомлення з методами розрахунку пиловловлювачів із трубами Вентурі та його застосування для аглодоменного виробництва.

Завдання до розрахунку

1. Потрібно розрахувати для очищення мартенівського газу швидкісний пиловловлювач у складі труби Вентурі, інерційного апарата й відцентрового скрубера за наступним даними:

Таблиця 10 – Вихідні дані для розрахунку

Параметри	Варіанти розрахунку				
	I	II	III	IV	V
1. Кількість газу, що очищується, V , тис.м ³ /год	80	90	100	120	130
2. Початкова температура газу t_1 , °С.	250	300	350	200	300
3. Початкова запиленість газу q_1 , г/м ³ .	4,0	7,0	5,5	6,5	8,0
4. Кінцева запиленість газу q_2 , мг/м ³ .	90	85	95	100	105
5. Вологовміст газу, що очищується f , г/м ³ .	50	45	30	35	25
5. Розрідження перед трубами Вентурі P , Па.	3000	2500	2000	3500	4000

Температура води, яка подається до апарату дорівнює 30°С.

Таблиця 11 – Хімічний склад газу %

Варіант	CO ₂	SO ₂	O ₂	N ₂	Σ
I	20,0	—	10,0	70,0	100
II	21,0	1,0	5,0	73,0	100
III	22,5	—	12,2	65,3	100
IV	23,0	2,0	8,2	66,8	100
V	24,8	2,5	6,4	66,3	100
VI	25,3	1,5	9,8	63,4	100

ПРАКТИЧНА РОБОТА №6 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗРАХУНОК РУКАВНОГО ФІЛЬТРА

Мета роботи – ознайомлення з методом технологічного розрахунку та його застосування для аглодоменного виробництва.

Завдання до розрахунку

1. Розрахувати рукавний фільтр, призначений для очищення газу від пилу, по наступним вихідним даним: кількість газу, що очищується, при робочих умовах V м³/год; температура газу t °С. Перед фільтром газ охолоджують атмосферним повітрям і температура суміші газів становить $t_{\text{сум}}$. Розрідження газу в газопроводі до фільтра $\Delta P_{\text{вх}}$ Па; барометричний тиск 98600 Па; температура навколишнього повітря $t_{\text{п}}$ °С. Початкова запиленість газу q_1 г/м³, середній розмір часток пилу d мкм; густина пилу $\rho_{\text{п}}$, пористість пилу $m_{\text{п}}$; в'язкість газоповітряної суміші $\mu=30 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Таблиця 12 – Вихідні дані для розрахунку

Параметри	Варіанти розрахунку				
	I	II	III	IV	V
1. Кількість газу, що очищується, V , м ³ /год	7500	7000	8000	8500	9000
2. Початкова температура газу t_1 , °С.	130	100	120	140	150
3. Початкова запиленість газу q_1 , г/м ³ .	5,0	6,0	7,0	5,5	6,5
4. Температура суміші газів $t_{\text{сум}}$ °С	70	65	75	80	85
5. Температура навколишнього повітря $t_{\text{п}}$, °С.	30	25	20	18	19
5. Розрідження перед фільтром $\Delta P_{\text{вх}}$, Па.	272	250	300	350	400
6. Середній розмір часток d , мкм.	0,8	0,9	1,0	1,1	0,85
7. Густина пилу $\rho_{\text{п}}$, кг/м ³	2800	3000	3500	4000	4500
8. Пористість пилу $m_{\text{п}}$	0,9	0,95	0,85	0,8	0,92

2. З яким газовим навантаженням можна працювати при фільтрації газу запиленістю q_1 г/м³, якщо відомо, що густина пилу $\rho_{\text{п}}$ кг/м³, а дисперсність d_0 м; пористість шарупилу $m_{\text{п}}$; температура газу t °С; час між регенераціями 15 хв.; у фільтрі застосовуються рукави НЦМ? Пористість

тканини $m_T = 0,83$; $h_0 = 1,8 \cdot 10^5$. Бажано, щоб опір фільтра становив близько 900 Па. При $90 \text{ }^\circ\text{C}$ $m = 22 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Таблиця 13 – Вихідні дані для розрахунку

Параметри	Варіанти розрахунку				
	I	II	III	IV	V
1. Запиленість газу $q_1, \text{ г/м}^3$.	1,4	2,0	2,5	3,0	3,5
2. Густина пилу $\rho_p, \text{ кг/м}^3$.	6400	6500	5500	7000	4500
3. Дисперсність пилу $b_0, \text{ м}$.	0,35- 106	0,3- 10^6	0,45- 106	0,4-106	0,5- 10^6
4. Пористість пилу τ_p .	0,94	0,9	0,92	0,85	0,95
5. Температура газу $t, \text{ }^\circ\text{C}$.	90	90	90	90	90

ПРАКТИЧНА РОБОТА №7 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОФІЛЬТРА

Мета роботи – ознайомлення з методом розрахунку електрофільтра та його застосування для аглодоменного виробництва.

Завдання до розрахунку

1. Потрібно підібрати тип електрофільтра, розрахувати його електричні параметри й ступінь очищення газу в ньому, виходячи з наступних даних

Таблиця 14 – Вихідні дані для розрахунку

Параметри	Варіанти розрахунку				
	I	II	III	IV	V
1. Кількість газу, що очищується, V , тис.м ³ /год	27	32	34	36	40
2. Початкова температура газу t_1 , °С.	150	100	200	250	220
3. Запиленість газу q_1 , г/м ³ .	10	8	6	5	4
4. Розрідження перед	1960	2000	2200	2350	3000
5. Барометричний тиск $P_{бар}$, Па.	101325	98600	99000	102000	99500

Склад газу близький до атмосферного. Фракційний склад пилу характеризується наступними даними:

Таблиця 15 – Фракційний склад пилу

Середній радіус часток, мкм.	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
% (по масі)	5	10	10	15	20	20	20



ПРАКТИЧНА РОБОТА №8 РОЗРАХУНОК КІЛЬКОСТІ РЕАКЦІЙНИХ ЗОН ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ВОДНЕМ У ШАХТНОМУ АГРЕГАТІ

Мета роботи – на прикладі теоретичних відомостей по рівноважному складу реакцій відновлення оксидів заліза воднем розрахувати кількість реакційних зон при відновленні залізородного матеріалу в умовах шару.

Теоретичні положення

Використовуючи методику А. Риста и Б. Бониварда, зробимо розрахунок параметрів процесу для випадку відновлення оксидів заліза воднем або СО. Вихідні дані для розрахунків наведені в табл. 15, 16, і на рис. 2.

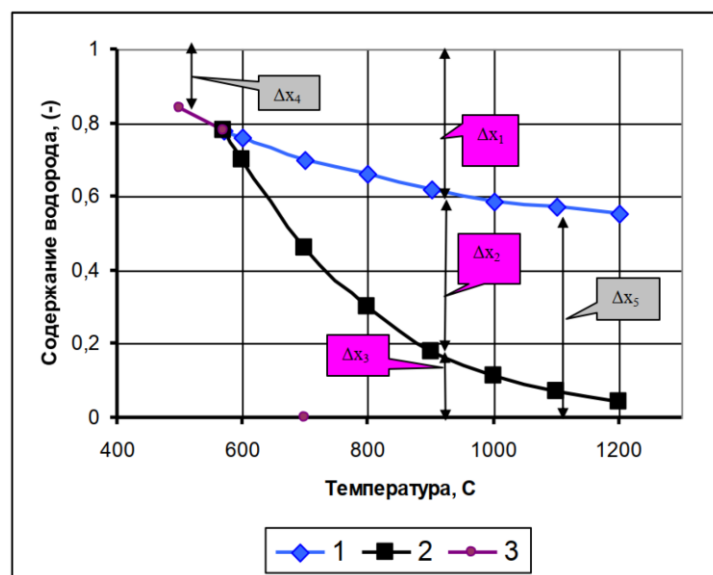
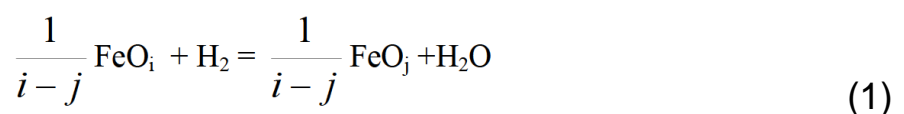


Рисунок 2 – Рівноважний вміст водню в реакціях відновлення оксидів заліза: 1 – рівновага реакції 1; 2 – рівновага реакції 2; 3 – рівновага реакції 4 (відповідно табл. 16)

У загальному вигляді рівняння відновлення оксиду заліза записується наступним чином:



де i, j – доля кисню відповідно у вихідному оксиду і продукті;

$$i = 1,05; 1,33; 1,5.$$

$$j = 0,0; 1,05; 1,33.$$

Доля кисню в вюститі прийнята постійною і відповідає мінімальному його вмісту. Що стосується реакцій відновлення магнетиту і вюститу, то експериментальні дані задовільно описуються виразами типа:

Таблиця 16 – Вихідні дані для розрахунку стехіометричні відношень реакцій відновлення при відновленні воднем (CO) оксидів в умовах шару (розрахунок ведеться на 1 моль кисню, що віднімається)

№ п/п	Реакция	x_i^p	Δx_i	y_i	y_j	Δy_i
1	$\frac{1}{1,05} \text{FeO}_{1,05} + \text{H}_2 = \frac{1}{1,05} \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$	x_1^p	$x_1^p - x_0$	1,05	0	1,05
2	$\frac{1}{0,28} \text{FeO}_{1,33} + \text{H}_2 = \frac{1}{0,28} \text{FeO}_{1,05} + \text{H}_2\text{O}$	x_2^p	$x_2^p - x_1^p$	1,33	1,05	0,28
3	$\frac{1}{0,17} \text{FeO}_{1,5} + \text{H}_2 = \frac{1}{0,17} \text{FeO}_{1,33} + \text{H}_2\text{O}$	x_3^p	$x_3^p - x_2^p$	1,5	1,33	0,17
4	$\frac{1}{1,33} \text{FeO}_{1,33} + \text{H}_2 = \frac{1}{1,33} \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$	x_4^p	$x_4^p - x_0$	1,33	0	1,33
5	$\frac{1}{0,45} \text{FeO}_{1,5} + \text{H}_2 = \frac{1}{0,45} \text{FeO}_{1,05} + \text{H}_2\text{O}$	x_5^p	$x_5^p - x_0$	1,5	1,05	0,45

де: x – ступінь окислюваності газу; x_0 – ступінь окислюваності вихідного газу ($x_0 = 0$ для 100% H_2 , $x_0 = 1$ для 100% $\text{H}_2\text{O}_{\text{пара}}$ у вхідному газовому потоці); x_i^p – рівноважна концентрація $\text{H}_2\text{O}_{\text{пар}}$ для i – тої реакції (x_3^p і x_5^p дорівнюють 1); Δx_i – різниця рівноважних концентрацій газу для двох послідовних реакцій або відновлювальна здатність газу (див. рис. 2); $y_i = \text{O}_i/\text{Fe}_i$ – ступінь окислюваності вихідного оксиду, (-); $y_j = \text{O}_j/\text{Fe}_j$ – ступінь окислюваності оксиду продукту, (-); $\Delta y_i = i-j$ – кількість одиниць кисню, що віднімається у FeO_i ; $V_i = \Delta x_i/\Delta y_i$ – максимально можлива питома продуктивність реакції або доля відновника на одиницю кисню, що віднімається.

У табл. 16 наведені реакції відновлення оксидів заліза воднем, такі ж реакції можна навести для реакцій відновлення оксидів заліза CO, тільки будуть змінюватись рівноважні характеристики цих реакцій.

Таблиця 17 – Склад рівноважної газової фази для реакцій 1 і 2 з табл. 16.

Температура, °С	600	700	800	900	1000	1100
H ₂ O(x ^p ₂)	0,301	0,542	0,713	0,823	0,89	0,927
H ₂ O(x ^p ₁)	0,239	0,299	0,34	0,381	0,411	0,426
CO ₂ (x ^p ₂)	0,552	0,648	0,719	0,776	0,822	0,859
CO ₂ (x ^p ₁)	0,472	0,4	0,347	0,315	0,284	0,262

При потоколімітуючому режимі, в умовах шару, реакції в системі Fe-O-N досягають рівноваги. Кількість відновника, що іде на реакцію, визначається відновлювальною здібністю газу (див рис. 2). З рис. 2 бачимо, що з ростом температури кількість відновника (Δx_i), що витрачається для конкретної реакції, змінюється, при цьому кількість кисню, що віднімається (Δy_i) для кожної ступені незмінно. Так кількість відновника для реакцій 1, 2 з ростом температури зростає, а для реакції 3, 4, 5, зменшується. Таким чином, відношення кількості відновника до кількості кисню, що віднімається ($V_i = \Delta x_i / \Delta y_i$) може бути мірою відновної швидкості переміщення різних ступенів в системі Fe-O-N. Якщо швидкість для кожної послідовної реакції у відповідності з принципом послідовності перетворень Байкова менше попередньої ($V_1 < V_2 < V_3$), то в шарі будуть спостерігатись усі три зони реагування. В протилежному випадку можливо злиття пари зон в загальну зону реагування, тобто з'являться зони відповідно до реакцій 4 и 5 (згідно табл. 15).

Завдання до розрахунку

1. Розрахувати відносну швидкість реакції в системі Fe-O-N при температурі 1000°С.

С початку визначаємо значення x_1^p . Воно у відповідності до табл. 16. дорівнює 0,411.

Далі визначаємо x_2^p , котре також знаходимо з табл. 16. Воно дорівнює 0,89. Також визначаємо x_4^p , котре знаходимо з рівняння

$$\lg K_p = - \frac{1500}{T} + 1,29 \quad (1)$$

З цього рівняння знаходимо K_p яке дорівнює 1,29. Прирівнюємо %H₂O – x, тоді вміст водню складатиме 1-x, отримуємо рівняння

$$1,29 = \frac{\delta}{1 - \delta} \quad (2)$$

Вирішуючи це рівняння відносно x знаходимо x_4^p , воно дорівнює 0,563.

Далі розраховуємо відносні швидкості реакцій в системі Fe-O-H. Для цього потрібно визначити кількість кисню, що віднімається на кожній ступені.

У відповідності з реакціями табл. 15 визначаємо, що в реакції 1 віднімається 1,05 кисню, в реакції 2 віднімається 0,28 кисню, в реакції 3 віднімається 0,17 кисню, в реакції 4 віднімається 1,33 кисню і в реакції 5 віднімається 0,45 кисню.

У відповідності з отриманими значеннями Δx_i і Δy_i отримуємо значення відносних швидкостей для цих реакцій

$$V_1 = \Delta x_1 / \Delta y_1 = (x^{p_1} - x_0) / (y_i - y_j) = (0,411 - 0) / (1,05 - 0) = 0,391$$

$$V_2 = \Delta x_2 / \Delta y_2 = (x^{p_2} - x^{p_1}) / (y_{i2} - y_{j2}) = (0,89 - 0,411) / (1,3 - 1,05) = 1,71$$

$$V_3 = \Delta x_3 / \Delta y_3 = (x^{p_3} - x^{p_2}) / (y_{i3} - y_{j3}) = (1 - 0,89) / (1,5 - 1,33) = 0,647$$

Оскільки швидкості реакцій не збільшуються від мінімуму до максимуму то тоді треба розраховувати швидкості реакцій 4 та 5.

$$V_4 = \Delta x_4 / \Delta y_4 = (x^{p_4} - x_0) / (y_{i4} - y_{j4}) = (0,563 - 0) / (1,33 - 1,05) = 0,423$$

$$V_5 = \Delta x_5 / \Delta y_5 = (x^{p_5} - x^{p_1}) / (y_{i5} - y_{j5}) = (1 - 0,411) / (1,5 - 1,05) = 1,309$$

Таким чином у шарі формуються наступні реакції: Реакція 1, а замість реакції 2 та 3 формується реакція 5. оскільки реакція 4 при даній температурі не відбувається.

2. Визначити які реакції формуються у шарі при його відновленні воднем або CO при наступних температурах.

Таблиця 18 – Вихідні дані для розрахунку

№ варіанту	Температура, °C	Газ-відновлювач
1	600	H ₂
2	700	H ₂
3	800	H ₂
4	900	H ₂
5	1000	H ₂
6	1100	H ₂



ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могилатенко В. Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва : навч. посібник / за ред. В. Л. Найдека. Київ : Видавничий дім "Вініченко", 2016. 224 с.
2. Технологія основних виробництв : навчальний посібник для студентів денної та заочної форм навчання / В. М. Кропівний та ін. Кропивницький : Видавництво ТОВ «КОД», 2021. 196 с.
3. Шатоха В. І. Екологічне забезпечення виробництва чавуну : підручник. Дніпропетровськ : Пороги, 2001. 181 с.
4. Ndlovu S., Simate G. S., Matinde E. Waste Production and Utilization in the Metal Extraction Industry. Boca Raton : CRC Press, 2020. 532 p..
5. Ghosh A., Chatterjee A. Ironmaking and Steelmaking. Theory and Practice. Prentice-Hall of India Pvt. Ltd, 2008. 472 p.
6. Bhagat R. P. Agglomeration of Iron Ores. 1st Edition. Boca Raton : CRC Press, 2019. 438 p.



Навчально-методичне видання

**Максим Миколайович Бойко
Євген Володимирович Синегін
Олександр Миколайович Стоянов
Сергій Володимирович Семірягін**

**РЕСУРСОЗАОЩАДЖУВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА
РЕЦИКЛІНГ В АГЛОДОМЕННОМУ ВИРОБНИЦТВІ:**

**методичні вказівки
до виконання практичних робіт**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції