

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ДИСПЕРГУВАННЯ В СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання для
студентів спеціальності 136 – Металургія
(магістерський рівень)

*Друкується за Планом видань навчально-методичної літератури,
затвердженим Вченою радою ІПБТ УДУНТ
Протокол № 1 від 24.01.2022*

Дніпро 2022

УДК 544.77: 669.18

Диспергування в сталеплавильних системах : робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання для студентів спеціальності 136 – Металургія (магістерській рівень) / уклад.: В. С. Мамешин, Є. В. Синегін, С. В. Журавльова, Л. С. Молчанов. – Дніпро : Україн. держ. ун-т науки і технол., 2022. – 28 с.

Викладено робочу програму дисципліни «Диспергування в сталеплавильних системах», наведені рекомендації до вивчення дисципліни, як при аудиторній, так і при самостійній роботі студентів, надані методичні вказівки до вивчення кожного з розділів і література, що рекомендується, питання для самоконтролю, а також варіанти індивідуальних завдань, що виконують студенти в процесі вивчення дисципліни.

Призначена для студентів спеціальності 136 – Металургія.

Укладачі: В. С. Мамешин, канд. техн. наук, доц.
Є. В. Синегін, канд. техн. наук, доц.
С. В. Журавльова, канд. техн. наук, доц.
Л. С. Молчанов, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск К. Г. Нізяєв, д-р. техн. наук, проф.

Рецензент І. В. Деревянко, канд. техн. наук, доц. (УДУНТ)

Підписано до друку 30.09.2022. Формат 60×84 1/16. Папір друк. Друк плоский.
Облік.-вид. арк. 1,70. Умов. друк. арк. 1,68. Замовлення № 102.

Український державний університет науки і технологій
49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2
Редакційно-видавничий відділ УДУНТ

З М І С Т

1. Мета і завдання вивчення дисципліни	4
2. Робоча програма дисципліни, теми та їх зміст.....	6
2.1. Робоча програма дисципліни	6
2.2. Назви тем та їх зміст	7
3. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ.....	7
3.1. Загальні вказівки	7
3.2. Перелік питань для індивідуального завдання.....	9
4. Практичні роботи	9
Практична робота №1	9
Практична робота № 2	17
Практична робота № 3	23

1. МЕТА І ЗАВДАННЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Навчальна дисципліна «Диспергування в сталеплавильних системах» входить до циклу вибіркових дисциплін фахової підготовки магістрів спеціальності «Металургія» професійного спрямування (Металургія сталі (МЕ02)).

1.1. Компетентності, формування яких забезпечує навчальна дисципліна «Диспергування в сталеплавильних системах»:

- прагнення до збереження навколишнього середовища;
- здатність демонструвати широке розуміння проблем якості в металургії;
- усвідомлення основних характеристик фізико-хімічних та тепло-масообмінних процесів, що відбуваються у металургійних процесах;
- здатність класифікувати та вміти визначити основні характеристики промислового обладнання та устаткування таке, що є оптимальним для технологічного процесу;
- здатність прогнозувати поведінку об'єкту досліджень при зміні параметрів його стану, обґрунтовувати та визначати основні структурно-технологічні зв'язки в умовах сучасного металургійного виробництва.

1.2. Мета вивчення дисципліни

Формування у здобувача вищої освіти компетентностей у питаннях утворення дисперсних систем та їх вплив на перебіг сталеплавильних процесів, вміння застосувати здобуті компетентності при вивченні фахових дисциплін, написанні випускної кваліфікаційної роботи та у подальшій професійній діяльності.

1.3. Завдання вивчення дисципліни

Внаслідок вивчення дисципліни студенти повинні:

знати:

- загальні положення формування дисперсних систем та методику їх класифікації;
- диспергування за відносного руху фаз;
- диспергування у киснево-конверторному процесі;
- диспергування у мартенівському процесі;
- диспергування у ковшевих процесах і при розливанні сталі;
- диспергування при струменевому рафінуванні;
- тепло- і масоперенесення у дисперсних системах.

вміти:

- провести аналіз моно- та полідисперсних систем;
- визначити умови подрібнення та розмір дисперсної фази, що утворюється при формуванні дисперсних систем;
- розрахувати масо- та теплоперенесення у дисперсних системах.

Дисципліна забезпечує досягнення таких програмних результатів навчання:

вміти:

- проводити розрахунки термодинаміки та кінетики процесів відновлення заліза з залізородних матеріалів;
- визначати умови проведення процесу відновлення зі заздалегідь підготовлених матеріалів, що забезпечить отримання заліза або вуглецевого напівпродукту, який відповідає зазначеним вимогам;
- порівнювати продуктивності агрегатів періодичної і безперервної дії;
- розраховувати продуктивність сталеплавильного агрегату на заздалегідь підготовлених матеріалах.

Дисципліна забезпечує досягнення таких програмних результатів навчання:

- розробляти технологію виробництва з урахуванням його особливостей та визначати оптимальний режим роботи обладнання за спеціалізацією;

- співвідносити хімічний склад, структуру і властивості матеріалів металургійного виробництва;
- аналізувати і вирішувати складні інженерні проблеми в металургії;
- аналізувати енергетичну ефективність технологічних процесів та обладнання, відповідно до спеціалізації, та розробляти заходи з енергозбереження;
- обрати і обґрунтувати вихідну сировину, матеріали та напівпродукти відповідно до умов металургійного виробництва за спеціалізацією з урахуванням технологічних та інших невизначеностей;
- розрахувати витратні показники сировини, матеріалів та енергії, оцінити вплив на продуктивність агрегату та на якість кінцевого продукту за спеціалізацією вихідних параметрів з урахуванням технологічних та інших невизначеностей;
- забезпечувати потрібні техніко-економічні показники при керуванні складними металургійними процесами.

2. РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ, ТЕМИ ТА ЇХ ЗМІСТ

2.1. Робоча програма дисципліни

Загальний обсяг дисципліни «Диспергування в сталеплавильних системах» для студентів заочної форми навчання – 120 академічних годин. Розподіл годин за семестрами, видами занять і видами контролю представлено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Розподіл навчальних годин за семестрами, видами занять і видами контролю

Семестр	Усього, годин	Види занять				Види контролю
		Аудиторні, годин	Лекції, годин	Практичні заняття, годин	Самостійна робота, годин	Індивідуальне завдання
2	120	16	12	4	104	Д. залік

2.2. Назви тем та їх зміст

2.2.1. Вступ. Поняття про дисперсну та безперервну фазу.

Причини утворення та розповсюдження дисперсних систем у природі та техніці. Класифікація дисперсних систем.

2.2.2. Диспергування у конверторному та мартенівському процесах

Утворення шлако-металевої емульсії у конверторній системі. Кількість крапель металу у шлаковій фазі, їх розмір, хімічний склад, фізико-хімічні процеси за участю крапель. Окислення вуглецю, спінювання шлаку, викиди з конвертеру. Переніс у системі краплі металу-шлак сірки, фосфору, азоту, водню. Утворення крапель у зоні взаємодії кисневого струменя з ванною, їх параметри. Емульгування шлакових крапель у метал.

2.2.3. Диспергування поза сталеплавильним агрегатом

Диспергування шлаку і атмосферного повітря в металі при випуску зі сталеплавильного агрегату. Використання диспергованих матеріалів при випуску в ківш. Емульгування шлаку в метал при продувці сталі в ковші інертним газом.

2.2.4. Диспергування при розливці сталі

Ежекція повітря та шлакової фази у метал струменя сталі у проміжному ковші, кристалізаторі, виливниці. Використання диспергованих металевих часток при розливці сталі.

2.2.5. Струминне рафінування рідкого чавуну

Схема процесу, параметри його здійснення. Модель рафінування. Розмір крапель, їх хімічний склад. Випарювання.

3. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

3.1. Загальні вказівки

Дисципліна «Диспергування в сталеплавильних системах» дає уявлення про загальні положення класифікації дисперсних систем, механізми їх утворення та умови існування у металургійному виробництві.

Відомості і знання, отримані при вивченні дисципліни, спрямовані на формування інженерного уявлення про ці процеси і необхідні для розвитку науково спрямованого підходу до вирішення задач пов'язаних з тепло-

масообміном у металургійних системах. Набуті компетентності використовуються при виконанні випускної кваліфікаційної роботи магістра.

Відповідно до програми студенти заочної форми навчання в період екзаменаційної сесії слухають оглядові лекції, виконують практичні роботи. Цьому періоду передує самостійне вивчення дисципліни відповідно до наведеної програми та виконання індивідуального завдання.

Варіанти завдань наведені в таблиці 3.1. Номер завдання, що виконується, повинен збігатися з останніми двома цифрами – шифром студента-заочника (номер залікової книжки).

Номери варіантів та теми рефератів наведені в таблиці. Варіант завдання відповідає двом останнім цифрам номера залікової книжки студента-заочника.

Обсяг реферату роботи має складати не менше 5 сторінок рукописного або комп'ютерного тексту. Якщо індивідуальна робота виконується за допомогою ПК, текст має бути надруковано шрифтом Times New Roman 14 розміру з інтервалом 1,5, нумерація рисунків, наведених у роботі, має бути наскрізною.

Виконане індивідуальне завдання містить титульну сторінку, зміст, саме завдання та перелік використаних літературних джерел із посиланням на них по тексту реферату.

Самостійно виконане завдання оформлюється в зошиті або на листах формату А4, направляється в академію для перевірки, а в період сесії захищається студентом на кафедрі.

Таблиця 3.1– Варіанти індивідуальних завдань та номери питань

№ теми реферату	№ варіанта	№ теми реферату	№ варіанта	№ теми реферату	№ варіанта
1	00, 20, 40, 60,80	8	07, 27, 47, 67, 87	15	14, 34, 54, 74, 94
2	01, 21, 41, 61, 81	9	08, 28, 48, 68, 88	16	15, 35, 55, 75, 95
3	02, 22, 42, 62, 82	10	09, 29, 49, 69, 89	17	16, 36, 56, 76, 96
4	03, 23, 43, 63, 83	11	10, 30, 50, 70, 90	18	17, 37, 57, 77, 97
5	04, 24, 44, 64, 84	12	11, 31, 51, 71, 91	19	18, 38, 58, 78, 98
6	05, 25, 45, 65, 85	13	12, 32, 52, 72, 92	20	19, 39, 59, 79, 99
7	06, 26, 46, 66, 86	14	13, 33, 53, 73, 93	-	-

3.2. Перелік питань для індивідуального завдання

1. Розпад Релея при нерухомій фазі та механізм утворення капілярних хвиль.
2. Розпад струменя рідини за її витікання з отвору.
3. Диспергування за обтікання газівим потоком поверхні крапель.
4. Умови тепло- і масоперенесення у дисперсних системах, основні числа подоби, що описують цей процес.
5. Тепло- і масоперенесення у дисперсній системі рідина-газ.
6. Тепло- і масоперенесення у дисперсній системі тверде-газ.
7. Тепло- і масоперенесення у дисперсній системі тверде-рідина.
8. Тепло- і масоперенесення у дисперсній системі газ-рідина.
9. Завдання внутрішнього та зовнішнього масо- і теплоперенесення.
10. Класифікація дисперсних систем.
11. Механізм осесиметричного розпаду струменя рідини.
12. Диспергування у кисневому конвертері при продувці металу.
13. Механізм хвилеподібного розпаду струменя рідини.
14. Диспергування при струминному рафінуванні чавуну.
15. Механізм дроблення струменя рідини під впливом зовнішніх сил.
16. Диспергування при розливі стали
17. Механізм турбулентного розпаду струменя рідини.
18. Диспергування у мартенівській системі краплі металу у шлаку.
19. Причини та механізм спінювання шлакової фази у мартенівському процесі.
20. Механізм диспергування за відносного руху фаз.

4. ПРАКТИЧНІ РОБОТИ

Практична робота №1

Визначення середнього розміру часток порошку змішаного гранулометричного складу

Мета роботи: ознайомитися з методикою визначення середнього розміру часточок порошку необхідного для розрахунку процесів тепло- і масообміну.

Теоретичні положення

Реальні металургійні системи зазвичай є полідисперсними, при цьому розміри дисперсної фази можуть розрізнятися на один, два і навіть більше порядків, а часточки мають неправильну геометричну форму. Тому при аналізі

полідисперсної системи використовують методи статистичної обробки, які дозволяють оперувати усередненим розміром з урахуванням функції розподілу цих часточок за розмірами. Найбільш розповсюдженими є розподіли часточок за масою та за розмірами.

Для побудови гістограм розподілу вся дисперсна фаза ділиться на фракції (групи часточок з певним діапазоном розмірів), після чого в залежності від необхідного типу розподілу здійснюють або зважування кожної фракції з отриманням масового розподілу часточок за розмірами, або здійснюють підрахунок кількості часточок, що входять до кожної фракції з отриманням кількісного розподілу часточок за розмірами. Тобто для визначення усереднених розмірів реальну полідисперсну систему умовно замінюють ідеальною монодисперсною системою з часточками правильної форми і однакового розміру.

Способи усереднення можуть бути різними, в залежності від того, які параметри полідисперсної і монодисперсної системи, що її замінює, приймають однаковими (кількість часточок, поверхня, вага чи об'єм). Типи усереднення, які використовують найчастіше наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Способи усереднення розмірів часточок полідисперсних систем

Назва усереднення	Умова усереднення	Формула	Застосування
Середньоарифметичний (середньокількісний) діаметр	Однакові суми діаметрів полі- і монодисперсних систем	$\bar{d}_{10} = \frac{\sum n_i \cdot d_i}{\sum n_i} = \sum X_i \cdot d_i = \frac{\sum g_i / d_i^2}{\sum g_i / d_i^3}$	При проведенні мікроскопічних аналізів і досліджень
Середньоповерхневий (середньоквадратичний) діаметр	Однакові сумарна поверхня полі- і монодисперсних систем	$\bar{d}_{20} = \sqrt{\frac{\sum n_i \cdot d_i^2}{\sum n_i}} = \sqrt{\frac{\sum g_i / d_i}{\sum g_i / d_i^3}}$	Процеси адсорбції на часточках дисперсної фази
Середньомасовий або середньооб'ємний (середній кубічний) діаметр	Однакові сумарна маса або об'єм полі- і монодисперсних систем	$\bar{d}_{30} = \sqrt[3]{\frac{\sum n_i \cdot d_i^3}{\sum n_i}} = \sqrt[3]{\frac{100}{\sum g_i / d_i^3}}$	Седиментаційний або ситовий аналіз
Середній діаметр Заутера (середній поверхнево-об'ємний або зважений за питомою поверхнею)	Відношення об'єму частки діаметром \bar{d}_{32} до її поверхні дорівнює сумарному об'єму часточок полідисперсної системи до їх загальної поверхні	$\bar{d}_{32} = \frac{\sum n_i \cdot d_i^3}{\sum n_i \cdot d_i^2} = \frac{\sum g_i}{\sum \frac{g_i}{d_i}}$	Для дослідження процесів тепло- і масопередачі
Середній діаметр Проберта (зважений по загальній довжині крапель)	Відношення об'єму частки діаметром \bar{d}_{31} до її діаметру дорівнює сумарному об'єму часточок полідисперсної системи до суми їх діаметрів	$\bar{d}_{31} = \sqrt{\frac{\sum n_i \cdot d_i^3}{\sum n_i \cdot d_i}}$	Для дослідження процесів тепло- і масопередачі
Середній діаметр Де Брукера або Хардіна (зважений за загальній об'ємом крапель)	-	$\bar{d}_{32} = \frac{\sum n_i \cdot d_i^4}{\sum n_i \cdot d_i^3} = \frac{\sum g_i \cdot d_i}{\sum g_i}$	Розрахунки згоряння палива
Середньологарифмічний діаметр	-	$\lg \bar{d} = \frac{\sum n_i \cdot \lg d_i}{\sum n_i} = \frac{\sum g_i \cdot \lg d_i}{\sum g_i}$	Для дослідження процесів тепло- і масопередачі
Медіанний діаметр	Ділить полідисперсну систему на дві рівні частини, з діаметром більшим і меншим d_m .	$\sum_{i=1}^m n_i \cdot d_i^3 = \sum_{i=m+1}^n n_i \cdot d_i^3 = \sum_{i=1}^m g_i = \sum_{i=m+1}^n g_i$	Для дослідження процесів тепло- і масопередачі

Усереднені розміри часточок \bar{d}_{10} , \bar{d}_{20} і \bar{d}_{30} однакові лише для монодисперсних систем. При цьому завжди виконується умова $\bar{d}_{10} > \bar{d}_{20} > \bar{d}_{30}$ і чим більше полідисперсна система, тим більше відрізняються їх величини. Тому ступінь полідисперсності часто характеризується параметром

$$P = \frac{\bar{d}_{10}}{\bar{d}_{30}}. \quad (4.1)$$

Для полідисперсних систем $P < 1$, а для монодисперсних $P = 1$.

Також для характеристики полідисперсних систем можуть використовувати коефіцієнт варіації

$$K = \frac{\sigma}{\bar{d}_{10}} \cdot 100\%. \quad (4.2)$$

де σ – стандартне відхилення*, що визначається за формулою

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum n_i (d_i - \bar{d}_{10})^2}{\sum n_i}}, \text{ м.} \quad (4.3)$$

Методика розрахунку

- 1) З таблиці 4.2 студенти виписують свої вихідні дані відповідно до свого номеру в журналі академічної групи.
- 2) Розраховуємо середній діаметр часточки порошку у кожному інтервалі

$$d_i = \frac{d_i^{\min} + d_i^{\max}}{2}, \text{ мм,} \quad (4.4)$$

де d_i^{\min} і d_i^{\max} – відповідно мінімальний і максимальний діаметр i -ої часточки, мм.

- 3) Приймаючи, що часточки мають форму кулі, знаходимо кількість часточок у кожній фракції

$$n_i = \frac{6m_i}{\pi \cdot d_i^3 \cdot \rho_q}, \text{ шт.,} \quad (4.5)$$

* Величини стандартного відхилення і коефіцієнта варіації можуть бути розраховані за будь-яким з наведених у таблиці 4.1 усередненим діаметром.

де m_i – маса i -ої фракції, кг; ρ_c – істинна густина часточки, кг/м³.

4) Знаходимо загальну масу дисперсної фази

$$\sum m_i = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n, \text{ кг.} \quad (4.6)$$

5) Розраховуємо масові частки фракцій (розподіл маси часточок за розмірами)

$$g_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \cdot 100\%, \text{ \%}. \quad (4.7)$$

6) Визначаємо числові частки кожної фракції (розподіл кількості часток за розмірами)

$$X_i = \frac{n_i}{\sum n_i} \cdot 100\%, \text{ \%}. \quad (4.8)$$

7) За формулами з таблиці 4.1 знаходимо середньомасовий, середньоповерхневий і середньокількісний розміри часточок:

8) Розраховуємо загальну площу поверхні контакту дисперсної фази

$$S_\Sigma = \pi \cdot \bar{d}_{20}^2 \cdot \sum n_i = \frac{6m_\Sigma \cdot \bar{d}_{20}^2}{\bar{d}_{30}^2 \cdot \rho_c}, \text{ м}^2. \quad (4.9)$$

9) Визначаємо загальний об'єм дисперсної фази

$$V_\Sigma \equiv \frac{m_\Sigma}{\rho_c} = \frac{\pi}{6} \cdot \bar{d}_{30}^3 \cdot \sum n_i, \text{ м}^3. \quad (4.10)$$

10) Знаходимо поверхневі частки фракцій (розподіл поверхні часточок за розмірами)

$$S'_i \equiv \frac{S_i}{\sum S_i} = \frac{\pi \cdot d_i^2 \cdot n_i}{\sum S_i}, \text{ м}^2. \quad (4.11)$$

11) Розраховуємо питому поверхню контакту

$$\bar{S}_i = \frac{\sum S_i}{\sum V_i}, \text{ м}^{-1}. \quad (4.12)$$

$$\bar{S}_i = \frac{\sum S_i}{\sum m_i}, \text{ м}^2/\text{кг}. \quad (4.13)$$

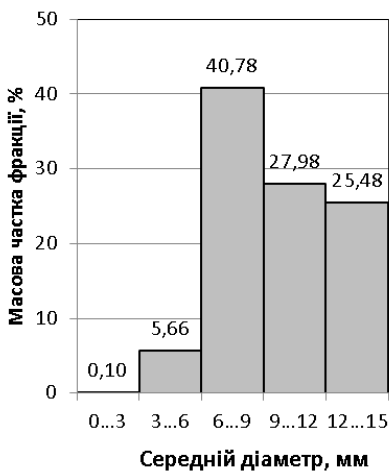
12) За формулою (4.1) знаходимо величину параметру Π . Якщо $\Pi < 1$, то система є полідисперсною.

13) За формулою (4.3) визначаємо стандартне відхилення.

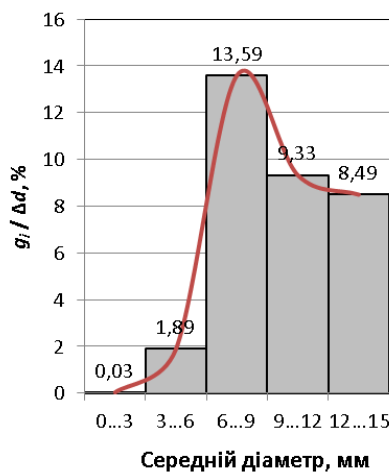
14) Розраховуємо коефіцієнт варіації

$$K = \frac{\sigma}{d_{10}} \cdot 100\%. \quad (4.14)$$

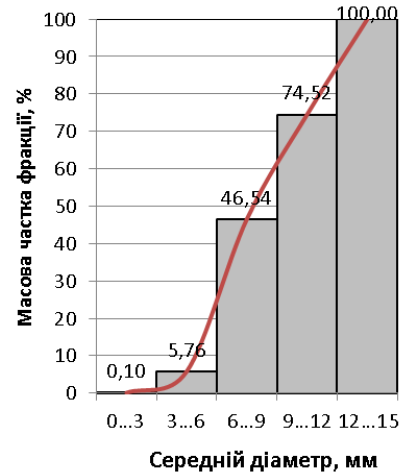
15) Будуємо гістограми розподілу, диференційну та інтегральну криві для масового, кількісного та поверхневого розподілів (рис. 4.1).



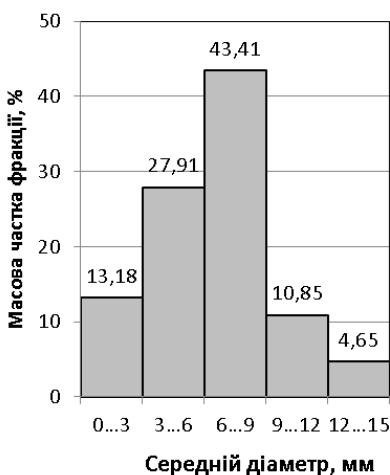
а)



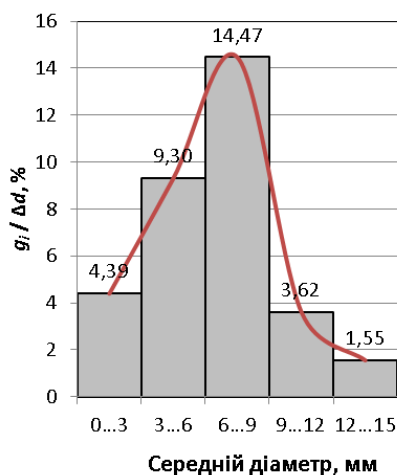
б)



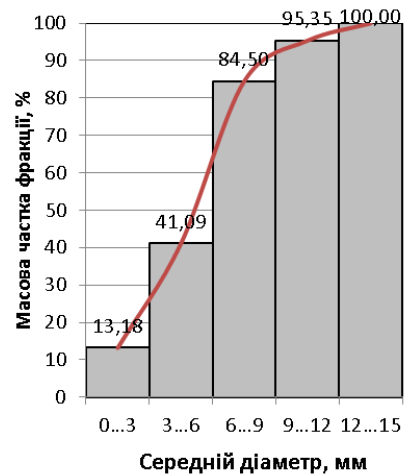
в)



г)



д)



е)

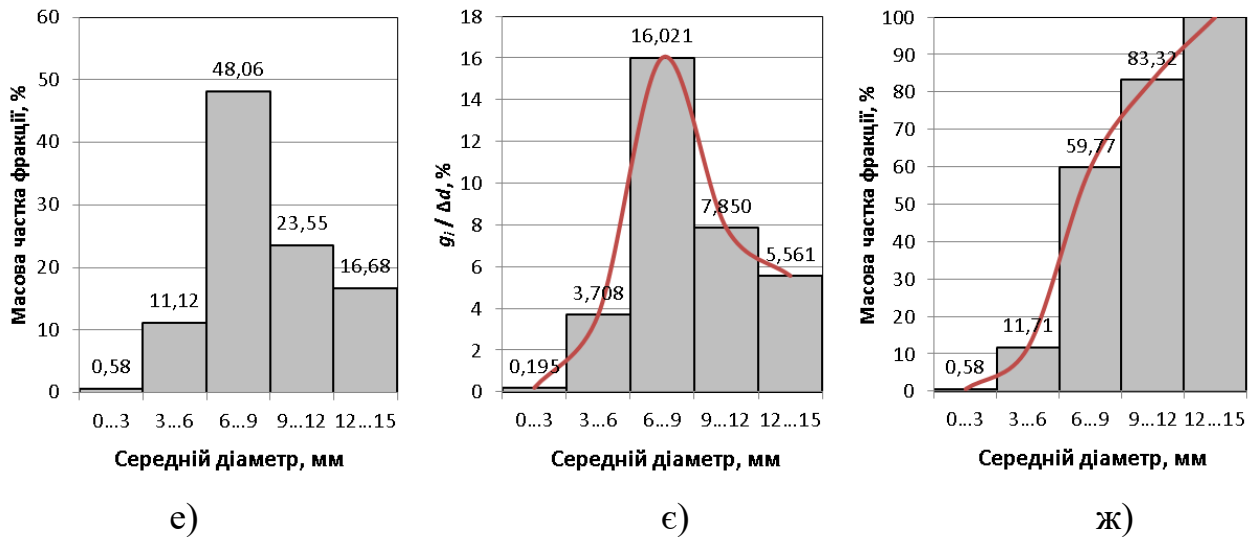


Рисунок 4.1 – Приклад гістограми розподілу, диференційної та інтегральної кривих, побудованих для масового (а, б, в), кількісного (г, г, д) та поверхневого (е, е, ж) розподілів

Таблиця 4.2 – Вихідні данні для розрахунку

№ з/п	Матеріал	Істина густина $\rho_c, \text{кг/м}^3$	Фракція, мм				
			Вага, г				
1	Кокс	1908	до 25	25-40	40-60	60-80	понад 80
			11	56	83	40	10
2	ПЗВ1*	7800	до 45	45-100	100-160	160-250	250-450
			8	14	42	93	44
3	Кокс	1811	до 25	25-40	40-60	60-80	понад 80
			5	61	102	29	4
4	ПЗВ2	7800	до 45	45-100	100-160	160-250	250-450
			3	12	22	137	26
5	Кокс	1875	до 25	25-40	40-60	60-80	понад 80
			8	47	104	30	11
6	ПЗВ3	7800	до 45	45-100	100-160	160-250	250-450
			3	16	30	114	37
7	Кокс	1882	до 25	25-40	40-60	60-80	понад 80
			11	14	120	45	10

* ПЗВ – порошок залізний відновлений, ПЖР – порошок залізний розпиленний.

8	ПЗВ4	7800	до 45	45-100	100-160	160-250	250-450
			5	26	40	91	38
9	Кокс	1862	до 25	25-40	40-60	60-80	понад 80
			4	30	99	57	9
10	ПЗВ5	7800	до 45	45-100	100-160	160-250	250-450
			6	10	36	124	25
11	Кокс	1905	до 25	25-40	40-60	60-80	понад 80
			5	53	87	45	10
12	ПЗР2	7800	до 45	45-160	160-250	250-450	450-630
			16	25	95	53	10
13	Кокс	1810	до 25	25-40	40-60	60-80	понад 80
			6	45	101	36	11
14	ПЗР2	7800	до 45	45-160	160-250	250-315	315-450
			5	124	38	30	3
15	Кокс	1907	до 25	25-40	40-60	60-80	понад 80
			11	62	97	21	8
16	ПЗР3	7800	до 45	45-160	160-250	250-450	450-630
			8	39	78	74	1
17	Кокс	1817	до 25	25-40	40-60	60-80	понад 80
			5	37	131	15	12
18	ПЗР5	7800	до 45	45-160	160-250	250-450	450-630
			15	34	77	69	4
19	Кокс	1848	до 25	25-40	40-60	60-80	понад 80
			8	49	95	40	8
20	ПЗР5	7800	до 45	45-160	160-250	250-315	315-450
			12	112	30	40	7

Практична робота № 2

Розрахунок осадження та спливання дисперсної фази в металургійних розплавах

Мета роботи: ознайомитися з методикою розрахунку процесів осадження та спливання дисперсних фаз в металургійних розплавах.

Теоретичні положення

В залежності від дисперсності твердої фази суспензії поділяють на грубі (фракція більше 100 мкм), тонкі (від 0,5 до 100 мкм) та мути (від 100 нм до 0,5 мкм).

Через різницю густини дисперсної та дисперсійної фаз, а також здатності першої до розчинення та росту металеві суспензії є нестійкими і здатними до седиментації і коагуляції.

Седиментація (від лат. *sedimentum* – осідання) – це осідання або спливання (зворотна седиментація) часток дисперсної фази (твердих крупинок, крапельок рідини, бульбашок газу) в рідкому або газоподібному дисперсійному середовищі в гравітаційному полі або полі відцентрових сил.

Коагуляція (від лат. згортання, тверднення) – це злипання частинок колоїдів при їхньому зіткненні в процесі теплового (броунівського) руху, перемішування або напрямленого переміщення в зовнішньому силовому полі.

Коалесценція – процес злиття часток рідкої чи газоподібної дисперсної фази.

За припущенням Н. П. Пескова стійкість дисперсних систем підрозділяють на два типи: стійкість до осадження дисперсної фази та стійкість до агрегації її часточок.

Рівнодіюча сили тяжіння та Архімедової сили визначається за рівнянням

$$F_{\text{сед}} = F_g - F_A = v(\rho - \rho_o)g, \text{ Н}, \quad (4.15)$$

де F_g – сила тяжіння, Н; F_A – Архімедова сила, Н; v – об'єм часточки, м³; ρ , ρ_o – густина відповідно часточки дисперсної фази та дисперсійного середовища, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м²/с.

Вираз для сили тертя, що виникає при русі сферичної часточки у в'язкій рідині, описує закон Стокса

$$w = \frac{2g(\rho - \rho_o)r^2}{9\eta}, \text{ м/с.} \quad (4.16)$$

де w – швидкість осідання часточки, м/с; r – радіус часточки, м; η – динамічна в'язкість, Па·с.

Закон Стокса виконується лише за умов, коли часточки дисперсної фази осаджуються незалежно одна від одної, що спостерігається у розбавлених системах, зокрема, і в металевих суспензіях з концентрацією дисперсної фази 0,2÷0,6 %. При осадженні в концентрованих системах внаслідок зіткнень відбувається обмін кінетичною енергією між часточками різних розмірів, що осідають з різною швидкістю. Це призводить до більш повільного колективного осадження часточок. Зменшенню швидкості осадження сприяє також неправильна форма часточок, що збільшує їх коефіцієнт лобового опору.

Закон Стокса також може порушуватися при турбулентному режимі осадження часточок. Зі збільшенням швидкості осадження розривається шар дисперсійного середовища, за частинкою, що рухається, утворюються завихрення, які обумовлюють різницю тиску по обидва боки часточки та її гальмування. Порушення ламінарного руху часточки спостерігається при $Re > 2$. При розвиненій турбулентності, яка спостерігається при $Re > 500$, сила тертя пропорційна квадрату швидкості руху часточок.

Порядок виконання роботи

Вихідні дані для розрахунку виписуємо з таблиці 4.3. Порівнюючи густини дисперсної фази і розплав, в якому вона знаходиться, студент з'ясовує характер її руху в розплаві: осадження чи спливання.

Подальший розрахунок складається з двох ітерацій. У першій приймаючи величину числа Рейнольдса $Re' \equiv \frac{wd}{\nu_p} = 5$ визначають коефіцієнт гідравлічного опору окремої сферичної часточки.

1) Коефіцієнт гідравлічного опору визначають в залежності від агрегатного стану часточки у розплаві за однією з наступних формул

- для твердої часточки

$$C_{x,\infty} = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}. \quad (4.17)$$

- для газової бульбашки

$$C_{x,0} = \frac{48}{\text{Re}} \left(1 + \frac{2,2}{\sqrt{\text{Re}}} \right), \quad (4.18)$$

- для краплі

$$C_{x,\eta} = \frac{C_{x,0} + \bar{\eta} \cdot C_{x,\infty}}{1 + \bar{\eta}}, \quad (4.19)$$

де $\bar{\eta} = \frac{\eta_c}{\eta_p}$ – відносна в'язкість* (для рідкої сталі $\eta_p = 0,004 \div 0,005$ Па·с; для

рідкого шлаку і рідких неметалевих включень – $\eta_p = 0,01 \div 0,4$ Па·с);

$\nu_p = \frac{\mu_p}{\rho_p}$ – кінематична в'язкість розплаву, м²/с.

2) Розраховують число Архімеда

$$\text{Ar} = \frac{gd^3 |\rho_c - \rho_p|}{\nu_p^2 \cdot \rho_p}, \quad (4.20)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с².

3) Знаходимо уточнене число Рейнольдса

$$\text{Re}'' = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\text{Ar}}{C_x}}. \quad (4.21)$$

4) Використовуючи отриману величину числа Рейнольдса знаходять коефіцієнт гідравлічного опору за другою ітерацією. За величиною уточненого числа Рейнольдса роблять висновок щодо режиму руху дисперсної часточки в розплаві. Виходячи з режиму руху часточки знаходимо її швидкість:

- при ламінарному режимі $\text{Re} \ll 1$:

* для газової бульбашки дорівнює 0, для твердої часточки наближується до нескінченності.

Таблиця 4.3 – Вихідні данні для розрахунку практичної роботи № 1

№ з/п	Середовище	Часточка	Густина часточки $\rho_{нв}$, кг/м ³	Діаметр часточки $d_{ч}$, мкм	Об'ємна концентрація часточок κ , %	Рівень розплаву у ємності h_p , м
1	2	3	4	5	6	7
1	сталь	Ti N	5430	50	0,01	2,30
2	ШМЕ	Fe	7800	5000	0,1	4,80
3	сталь	CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ (анортит)	2750	20	0,001	4,45
4	шлак	Fe	7000	8000	0,5	1,20
5	сталь	2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ (геленит)	3040	35	0,003	4,63
6	сталь	SiO ₂ (кварц)	5650	70	0,008	2,80
7	сталь	SiO ₂ (крістобаліт)	2320	30	0,001	3,28
8	сталь	β-CaO·SiO ₂ (воластоніт)	2915	42	0,007	3,53
9	сталь	3Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ (муліт)	3090	65	0,004	3,80
10	сталь	MgO·Al ₂ O ₃ (магнезіальна шпінель)	3550	10	0,005	3,64
11	сталь	MgO·Cr ₂ O ₃ (магнезітохроміт)	4390	20	0,01	2,35
12	сталь	Al ₂ O ₃ (корунд)	3990	10	0,02	4,04
13	сталь	MgO (периклаз)	3560	200	0,003	4,25

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6	7
14	сталь	$\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ (хромова шпінель)	5090	15	0,009	3,53
15	сталь	$(\text{Fe}, \text{Mg})\text{O} \cdot (\text{Cr}, \text{Al})_2\text{O}_3$ (хромшпінелід)	4260	25	0,012	3,64
16	сталь	MnS (алабандін або сульфід марганцю)	4000	10	0,015	4,45
17	сталь	Mn_4N (нітрид марганцю)	6760	20	0,020	2,80
18	сталь	AlN (нітрид алюмінію)	3250	35	0,018	3,53
19	сталь	SiN (нітрид кремнію)	3200	40	0,017	2,35
20	сталь	$2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ (тефроїт або ортосилікат марганцю)	3940	75	0,016	3,28

$$w = \frac{2gr^2 |\rho_c - \rho_p|}{3\mu_p} \cdot \frac{1 + \bar{\mu}}{2 + 3\bar{\mu}}; \quad (4.22)$$

- при перехідному режимі $2 < Re < 500$ для визначення швидкості руху часточки слід з формули (4.22) визначити число Рейнольдса, а з нього визначити швидкість;
- при турбулентному режимі $Re \geq 500$ за формулою (4.22) розраховують величину коефіцієнту гідравлічного опору $C_x^{Re=500}$ для умови $Re = 500$, а з нього, аналогічно попередньому пункту визначити швидкість.

5) Виходячи з рівня розплаву в ємності та розрахованої вище швидкості руху визначають тривалість спливання або осадження часточки в об'ємі розплаву.

В реальних металургійних розплавах часточки дисперсної фази рухаються ансамблем, що призводить до збільшення або зменшення швидкості їх руху.

6) Знаходимо необхідні для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору ансамблю часточок:

$$n = 4,1 \frac{1 + 0,15 Re_{\kappa}^{0,687}}{1 + 0,253 Re_{\kappa}^{0,687}}, \quad (4.23)$$

$$C_{x,\kappa} = C_x (1 - \kappa)^n, \quad (4.24)$$

де Re_{κ} – число Рейнольдса (тут розраховане у п. 3);

C_x – коефіцієнт гідравлічного опору за другою ітерацією (тут розраховане у п. 4);

κ – об'ємна концентрація часточок, %;

7) За формулою (4.25) розраховують модифіковане число Архімеда і далі за формулою (4.22) число Рейнольдса, з якого аналогічно до п. 4 розраховують швидкість спливання ансамблю часточок.

$$\text{Ar}_\kappa = \frac{gd_u^3 |\rho_u - \rho_p|}{v_p^2 \cdot \rho_p} \cdot \frac{1 - \kappa}{1 + \kappa^3}. \quad (4.25)$$

8) Аналогічно до п. 4 і 5 розраховують швидкість та тривалість повного спливання ансамблю часточок в розплаві.

Практична робота № 3

Розрахунок спливання бульбашки за донної продувки металевого розплаву

Мета роботи: ознайомиться з методикою розрахунку режимів спливання газової бульбашки.

Порядок виконання роботи

Вихідні дані для розрахунку виписуємо з таблиці 4.6. Роботу умовно поділено на 2 частини: 1) розрахунок зростання і відриву бульбашки та 2) її спливання. Перед проведенням основного розрахунку слід визначити основні параметри газу, що використовується для продувки.

Динамічна в'язкість заданого газу при початковій температурі розраховується за законом Сазерленда:

$$\eta_2 = \eta_0 \cdot \frac{C_\eta + 273}{C_\eta + T_2} \cdot \left(\frac{T_2}{273} \right)^{3/2}, \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad (4.26)$$

де η_0 – в'язкість газу за н.у., Па·с (табл. 4.4);

C_η – стала Сазерленда для в'язкості, К (табл. 4.4);

T_2 – абсолютна температура газу, К.

Густина газу за даної температури розраховуємо за виразом

$$\rho_2 = \frac{M}{V_m} \cdot \frac{273}{T_2}, \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad (4.27)$$

де M – молярна маса газу, г/моль;

V_m – молярний об'єм, л/моль.

Таблиця 4.4 – Коефіцієнти для визначення в'язкості газу

№ з/п	Газ-носії	В'язкість за н.у. $\eta_o \cdot 10^8$, Па·с	Стала Сазерленда C_η , К
1	Азот	1652	104
2	Аргон	2114	503
3	Кисень	1911	125
4	Метан	1022	164
5	Повітря	1708	112
6	Чадний газ	1659	101,2

1) Розрахунок зростання і відриву бульбашки

Виходячи з практичного досвіду приймаємо, що зростання бульбашки відбувається за квадратичним законом. Тоді орієнтовна величину радіусу відриву бульбашки складає

$$r'_o = \sqrt[3]{\frac{3\varphi_o\sigma r_1}{2g(\rho_{cm} - \rho_2)}}, \text{ м}, \quad (4.28)$$

де $\varphi_o = \frac{2}{3}$ – емпіричний коефіцієнт звуження шийки бульбашки;

$\sigma = 1,87$ – поверхневий натяг рідкої сталі, Н/м;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Середня швидкість росту бульбашки

$$\bar{w}_1 = \varphi_o \sqrt{\frac{2}{9} \cdot \frac{(9 \cdot m + 7)\sigma}{9(m+1)^3 \rho_2 r'_o}}, \text{ м/с}, \quad (4.29)$$

де m – емпірична константа, що залежить від режиму зростання бульбашки (табл. 4.5).

Розраховуємо число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\bar{w}_1 \cdot \rho_{cm} \cdot 2r'_o}{\mu_{cm}}, \quad (4.30)$$

Таблиця 4.5 – Емпіричні константи для розрахунку зростання газової бульбашки у різних режимах

Закон витікання	Re	m	C_x	$w = \frac{dr}{dt}$
Повзуча (Стоксова) течія	$\ll 1$	0	11,6	const
Область ламінарного прикордонного шару	≈ 1	-3/5	3,5	$\sim r^{-3/2}$
Витікання за квадратичним законом опору	$\gg 1$	-2/5	2,28	$\sim r^{-2}$

Виходячи з розрахованої величини числа Рейнольдса робимо висновок про вірність вибору квадратичного режиму для розрахунку швидкості зростання бульбашки. Якщо гіпотезу про квадратичний закон спливання бульбашки за даних умов було спростовано, то формулу (4.29) перераховують з використанням величини коефіцієнту m для істинного режиму, який визначається за числом Рейнольдса з таблиці 4.5.

Приймаючи, що бульбашки зростають і відриваються одна за одною, тобто тривалість t_1 формування бульбашки дорівнює часу t_2 між відривом бульбашки і початком зростання нової, визначаємо середню швидкість газу на виході з каналу

$$\bar{w} = \frac{\bar{w}_1 \cdot t_1}{t_1 + t_2}. \quad (4.31)$$

Знаючи цю швидкість можна розрахувати необхідний динамічний тиск

$$\Delta p = \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{\rho_g \cdot \bar{w}^2}{2}, \text{ Па}, \quad (4.32)$$

де $\varphi = 0,66$ – емпіричний коефіцієнт швидкості.

З урахуванням феростатичного тиску сталі та навколишньої атмосфери надлишковий тиск складає

$$p_2 = p_o + \rho_{cm}gH + \Delta p, \text{ Па}, \quad (4.33)$$

де $p_o = 101325$ – атмосферний тиск на н.у., Па.

Уточнений радіус бульбашки

$$r_o = \sqrt[3]{\frac{3\varphi_o\sigma r_1}{2g(\rho_{cm} - \rho_2)} + \frac{9}{64} \cdot \frac{C_x \rho_{cm}}{\rho_2} \cdot \frac{r_1^4}{r_o^2} \cdot \frac{\Delta p}{g(\rho_{cm} - \rho_2)}}, \text{ м}. \quad (4.34)$$

2) Спливання бульбашки

Орієнтовну швидкість спливання бульбашки знаходимо за формулою І. Г. Маленкова

$$w' = \sqrt{\frac{\sigma}{r_o} \cdot (\rho_{cm} + \rho_2) + gr_o \cdot \frac{(\rho_{cm} - \rho_2)}{(\rho_{cm} + \rho_2)}}, \text{ м/с}. \quad (4.35)$$

Приймаючи, що на момент відриву температура газу в бульбашці вже дорівнює температурі навколишнього металу, перераховуємо густину і динамічну в'язкість газу, після чого за формулою (4.30) визначаємо число Рейнольдса і модифіковане число Архімеда

$$\text{Ar}_m = \frac{g}{v_{cm}^2} \left[\frac{\sigma}{g(\rho_{cm} - \rho_2)} \right]^{3/2} \times \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_{cm}} \right), \quad (4.36)$$

$v_{cm} = \mu_{cm} / \rho_{cm}$ – кінематична в'язкість сталі, м²/с.

Виходячи з розрахованих числа Рейнольдса і модифікованого числа Архімеда, визначаємо режим руху бульбашки відповідно до наступних умов:

1) $\text{Re} \ll 1$ – Стоксів рух бульбашки, форма бульбашки – сфера:

$$w = \frac{2gr_o \cdot (\rho_{cm} - \rho_2)}{9\mu_{cm}}, \text{ м/с}. \quad (4.37)$$

2) $2 < \text{Re} < 4\text{Ar}_m^{0,42}$ – область ламінарного прикордонного шару, форма бульбашки – пульсуючий сфероїд

$$w = 0,33 \frac{g^{0,76}}{v_{cm}^{0,52}} r_o^{1,28}, \text{ м/с.} \quad (4.38)$$

Таблиця 4.6 – Вихідні дані для розрахунку

№ з/П	Рівень металу H , м	Радіус отвору r_1 , мм	Газ
1	2,3	0,8	Азот
2	1,8	1,7	Аргон
3	1,7	1,6	Чадний газ
4	0,6	1,7	Азот
5	2,7	0,7	Чадний газ
6	0,9	1,3	Аргон
7	1	1,8	Аргон
8	0,7	1,4	Азот
9	3,5	1,5	Чадний газ
10	3,5	0,6	Аргон
11	2,2	1,2	Чадний газ
12	2,4	1,2	Азот
13	3,1	0,6	Чадний газ
14	0,8	0,7	Аргон
15	2,3	1,3	Азот
16	1,6	1,7	Азот
17	0,5	1,6	Аргон
18	3,6	1,3	Азот
19	2,5	0,6	Аргон
20	2,2	1,0	Аргон

3) $Re > 3\sqrt{Ar}$ – область квадратичного закону опору, форма бульбашки – грибоподібна

$$w = \sqrt[4]{4g\sigma \frac{\rho_{cm} - \rho_g}{C_x^2 \cdot \rho_{cm}^2}}, \text{ м/с.} \quad (4.39)$$

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. М. : Физматгиз, 1959. 699 с.
2. Гельперин Н. И. Основные процессы и параметры химической технологии. Книга 1 / Н. И. Гельперин. М. : Химия, 1991. 812 с.
3. Распыливание жидкостей / Ю. Ф. Дитякин [и др.]. М. : Машиностроение, 1977. 208 с.
4. Металлические порошки из расплавов / Ю. А. Грацианов [и др.]. М. : Metallurgia, 1970. 248 с.
5. Броунштейн Б. И. Гидродинамика, массо- и теплообмен в колонных аппаратах / Б. И. Броунштейн, В. В. Щеголев. М. : Химия, 1988. 336 с.
6. Броунштейн Б. И. Физико-химические основы жидкостной экстракции / Б. И. Броунштейн, А. С. Железняк. Л. : Химия, 1966. 320 с.
7. Охотский В. Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов / В. Б. Охотский. М. : Metallurgia, 1993. 151 с.
8. Теорія металургійних процесів // під ред. В. І. Баптизманського і В. Б. Охотського. К. : ВІПОЛ, 1997. 512 с.
9. Охотський В. Б. Диспергування в сталеплавильних системах : конспект лекцій / В. Б. Охотський. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2006. 29 с.