

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



**РОБОЧА ПРОГРАМА,
методичні вказівки та індивідуальні завдання
до вивчення дисципліни
«Моделювання технологічних процесів кольорової металургії»
для студентів заочної форми навчання
за освітньо-професійною програмою
«Металургія кольорових металів»
підготовки здобувачів вищої освіти
за другим (магістерським) рівнем
зі спеціальності 136 «Металургія»**

Дніпро НМетАУ 2016

УДК 669:53.072

Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Моделювання технологічних процесів кольорової металургії» для студентів заочної форми навчання за освітньо-професійною програмою «Металургія кольорових металів» підготовки здобувачів вищої освіти за другим (магістерським) рівнем зі спеціальності 136 «Металургія» / Укл.: Г.А. Поляков, С.М. Підгорний, Г.М. Трегубенко, В.С. Ігнат'єв, Ю.О. Бубликов – Дніпро: НМетАУ, 2016. – 15 с.

Наведені робоча програма дисципліни з методичними вказівками, рекомендованою літературою і питаннями для самоперевірки за окремими темами, а також індивідуальне домашнє завдання.

Призначена для студентів заочної форми навчання за освітньо-професійною програмою для студентів заочної форми навчання за освітньо-професійною програмою «Металургія кольорових металів» підготовки здобувачів вищої освіти за другим (магістерським) рівнем зі спеціальності 136 «Металургія».

Укладачі: Г.А. Поляков, ст. викладач
С.М. Підгорний, ст. викладач
Г.М. Трегубенко, д-р техн. наук, проф.
В.С. Ігнат'єв, канд. техн. наук, проф.
Ю.О. Бубликов, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск М.І. Гасик, д-р техн. наук, проф.

Рецензент Л.В. Камкіна, д-р техн. наук, проф. (НМетАУ)

Підписано до друку _____. Формат 60x84 1/16. Папір друк. Друк плоский.
Облік.-вид. арк. _____. Умов. друк. арк. _____. Тираж 100 пр. Замовлення № _____

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

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ

1. ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

За навчальним планом студенти заочної форми навчання по спеціальності 7(8).05040102 вивчають дисципліну "Моделювання металургійних процесів" на VI курсі в обсязі 180 годин.

Мета дисципліни - вивчення основ фізичного та математичного моделювання в металургійних процесах.

Студенти заочної форми навчання вивчають цю дисципліну в обсязі 180 години, зокрема 16 годин лекцій, 4 години лабораторних робіт і 160 годин на самостійну роботу.

Основним видом занять при вивченні дисципліни студентами денної форми і особливо заочної форми навчання є самостійна робота з літературою. Основними підручниками по даній дисципліні є:

1.Марков Б.Л., Кирсанов А.А. Физическое моделирование в металлургии. - М.: Металлургия. 1984.-119 с.

2.Єгоров С.Г., Червоний І.Ф., Моделювання процесів чорної і кольорової металургії. Навчальний посібник – Запоріжжя: Видавництво Запорізької державної інженерної академії, 2010. -232 с.

3.Кучер А.Г.Шифрин В.М. Моделирование и оптимизация электротермических процессов: Учебное пособие.-Днепропетровск: Системные технологии, 2000. - 110 с.

4.Компьютерные технологии вычислений в математическом моделировании: Учеб. пособие. - М.: Финансы и статистика, 2002. - 256 с.

2. РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ І МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ТЕМ

Тема 2.1 Основні положення фізичного моделювання у металургії (4 години лекцій та самостійна робота)

2.1.1. Питання навчальної програми

Фізичні величини. Сукупність величин, характеризуючи фізичну систему. Приведення сукупності величин до безрозмірного вигляду. Перетворення величин. Подібне фізичних систем.

2.1.2. Література

[1] с. 3-25; [2] 41-49; [3] с. 5-14

2.1.3. Методичні вказівки

Мета вивчення теми - засвоїти основні положення фізичного моделювання у металургії.

Вивчивши цю тему, студент повинен:

- знати призначення моделі;
- вміти провести побудову чи вибір моделі.

2.1.4. Питання для самоперевірки:

1. Що таке модель і моделювання в наукових дослідженнях?
2. На які групи діляться моделі?
3. Як визначають основні чинники моделювання?
4. Що є фізична модель? Назвіть переваги і недоліки фізичного моделювання.
5. Що таке фізична величина? Назвіть основні величини фізичної системи.
6. Які умови необхідні для фізичного моделювання?
7. На які групи діляться фізичні величини?
8. Дайте визначення функції, аргументу, параметру. Приведіть конкретні приклади.
9. Що визначають похідні величини?
10. Що таке сукупність величин, що становлять фізичну систему?

Тема 2.2. Основи наближеного моделювання (4 години лекцій та самостійна робота)

2.2.1. Питання навчальної програми

Поняття про наближену подібності й моделювання. Виродження впливу критеріїв. Оцінка значимості критеріїв одержання раціональної сукупності.

Практичні рекомендації.

2.2.2. Література

[1] с. 31-50

2.2.3. Методичні вказівки

Мета вивчення теми - засвоїти основні положення наближеного моделювання.

Вивчивши цю тему, студент повинен:

- знати основні поняття приблизної подібності і моделювання;
- вміти для будь-яких складних процесів вивести умови точної подібності,

2.2.4. Питання для самоперевірки:

1. Дайте поняття про наближене моделювання.
2. У чому полягає фізичне значення безрозмірних величин?
3. Який вигляд може мати безрозмірна залежність для критеріїв загальної форми?
4. У чому особливість методу безпосереднього зіставлення фізичних ефектів?
5. Які етапи, включає в себе фізичне моделювання як метод дослідження?
6. Як необхідно виконувати оцінку чисельних значень і значимості критеріїв, що містять лінійні величини?

7. Які є способи складання сукупності?
8. Які фізичні системи називаються однорідними? Приведіть приклади.
9. Які фізичні системи називаються подібними? Приведіть приклади.
10. Які способи отримання інформації використовують при

Тема 2.3. Процеси руху і взаємодії рідкого металу шлаків і газів (самостійна робота)

2.3.1. Питання навчальної програми

Впровадження газових струменів у рідину.

Постановка завдання висновок і аналіз умов подібності. Гідродинаміка продувки металу й шлаків. Газовий отдув у пробоотборному зонді, що занурюється. Заповнення пробірки рідким металом. Рух неізотермічних газових потоків.

2.3.2. Література

[1] с. 54-98.

2.3.3. Методичні вказівки

Мета вивчення теми - засвоїти методику і результати моделювання різних випадків руху металу, шлаку і газів. Вивчивши цю тему, студент повинен:

- знати, що розвиток і показники більшості металургійних процесів, зокрема таких, як виплавка, розливання і кристалізація металу, теплообмін в печах, залежать від характеру руху і взаємодії металу, шлаку і газів;

- вміти застосувати необхідні прийоми і методи аналізу умов подібності і скласти сукупність величин, що описують дану фізичну систему.

2.3.4. Питання для самоперевірки:

1. Що є методом масштабних перетворень величин?
2. У чому полягає розробка методики моделювання гідродинаміки продування металу і шлаку?
3. З яких умов необхідно знаходити розрахунковий масштаб моделей при моделюванні продування двофазної рідини?
4. Що є занурюваними зондами для відбору проб і вимірювання температури металу в металургійних агрегатах і який параметр використовується в цьому випадку для гідравлічного моделювання?
5. Приведіть особливості руху неізотермічних газів в металургії.
6. Що таке критерії подібності і як їх визначають?
7. У чому полягає основна вимога подібності?
8. Перерахуйте основні критерії подібності. Які відносини вони виражають?
9. Що необхідне для забезпечення фізичної подібності моделі і оригіналу?

Тема 2.4. Електрогідравлічні й теплові процеси (самостійна робота)

2.4.1. Питання навчальної програми

Електрогідродинамічні процеси при дуговій плавці металу. Нагрів матеріалів. Спрощена схема плавки металу у вакуумно-дуговій печі з електродом, що витрачається. Залежність діаметра краплі від витрати рідини. Залежність напруги від довжини дуги.

Розподіл температури в середовищі й твердому тілі, що нагрівається при різних критеріях Біо.

2.4.2. Література

[1] с. 99-110.

2.4.3. Методичні вказівки

Мета вивчення теми - засвоїти методику моделювання електрогідравлічних й теплових процесів. Вивчивши цю тему, студент повинен:

- знати закономірності краплинного перенесення металу в зоні електричної дуги вакуумно-дугової печі з електродом, що витрачається;
- вміти застосувати моделювання з метою виявити закономірність.

2.4.4. Питання для самоперевірки:

1. Які ситуації називаються проблемними?
2. Що таке задача і проблема? Яка різниця між ними?
3. Перерахуйте етапи пізнання модельованого об'єкту.

Тема 2.5. Загальні методологічні питання математичного моделювання

(2 години лекції та самостійна робота)

2.5.1. Питання навчальної програми

Основні поняття моделювання. Призначення й функції моделей. Структура процесу моделювання.

Співвідношення детерміністичного й стохастичного підходів.

Про складність систем і моделей. Ізоморфізм. Подібність. Аналогія, Основи теорії подібності.

2.5.2. Література

[2] с. 5-49.

2.5.3. Методичні вказівки

Мета вивчення теми — засвоїти основні поняття математичного моделювання.

Вивчивши цю тему, студент повинен:

- знати призначення і функції моделей, структуру процесу моделювання;
- вміти застосувати основні теорії подібності.

2.5.4. Питання для самоперевірки:

1. Перерахуйте призначення і функції моделі.
2. Дайте поняття, ізоморфізму, подібності і аналогії.
3. У чому полягають основні положення і поняття теорії подібності?
4. У чому полягає спосіб знаходження числа подібності і аналізу рівняння процесу?
5. Дайте поняття л-теореми.
6. Що є додатковим положенням про подібність складних систем?
7. Які цілі переслідує математичне моделювання?
8. Які види математичного моделювання використовуються при дослідженні електротермічних процесів?
9. Які задачі у області електротермії розв'язуються методами математичного моделювання?
10. Яка загальна схема створення математичної моделі?

Тема 2.6. Математичний опис і використанням фізичних законів (4 години лекцій та самостійна робота)

2.6.1. Питання навчальної програми

Математичний опис термодинамічних закономірностей. Перший закон термодинаміки. Термохімічні розрахунки. Другий закон термодинаміки.

Математичний опис і розрахунки рівноваги хімічних реакцій. Моделі кінетики хімічних реакцій масо- і теплопереноса. Особливості кінетики гомогенних і гетерогенних реакцій. Опис дифузій і масопереноса. Рівняння кінетики гомогенних реакцій. Гетерогенні реакції. Опис теплопереноса. Закони збереження маси й імпульсу. Перенос потоків речовини й енергії. Приклад складання математичної моделі об'єкта при можливості допущення зосередженості параметрів. Математичний опис об'єктів з розподіленими параметрами.

2.6.2. Література

[2] с. 51-102.

2.6.3. Методичні вказівки

Мета вивчення теми - засвоїти математичний опис термодинамічних закономірностей, моделі кінетики хімічних реакцій, масо- і теплопереноса, складання математичної моделі об'єкта при нагоді допущення зосередженості параметрів і з розподіленими параметрами. Вивчивши цю тему, студент

повинен:

- знати, що у всіх металургійних агрегатах протікає складний комплекс взаємозв'язаних фізико-хімічних перетворень: зміна агрегатного стану речовин, хімічні реакції, масо- і теплоперенос, механічний рух потоків (гідродинаміка), змішення і витіснення;

- вміти застосувати адекватну математичну модель для конкретного металургійного процесу (агрегату) з метою правильно розкрити механізм досліджуваного процесу і структуру його взаємозв'язку і адекватно описати закономірності цього процесу.

2.6.4. Питання для самоперевірки:

1. Які існують принципи математичного опису з використанням фізичних законів?

2. Приведіть систему рівнянь, за допомогою яких можна визначити теплові ефекти окислення домішок.

3. У чому особливість другого закону термодинаміки?

4. Дайте наближений розрахунок рівноваги хімічних реакцій.

5. У чому особливість кінетики гомогенних і гетерогенних реакцій?

6. Опишіть математично процес дифузії і масопереносу.

7. Дайте поняття закону збереження маси і імпульсу, а також перенесення потоків речовини і енергії.

8. У чому полягає відмінність складання математичної моделі об'єкту при зосередженості параметрів і розподіленими параметрами?

9. Чим є аналогова модель?

10. Чим є математична модель?

Тема 2.7. Статистичні методи математичного опису

(2 години лекцій та самостійна робота)

2.7.1. Питання навчальної програми

Основні характеристики випадкових величин. Регресійний аналіз при пасивному й активному факторному експерименті. Ідея регресійного аналізу й методу найменших квадратів. Активний факторний експеримент. Приклад активного факторного експерименту. Визначення оптимальних умов. Опис динамічних властивостей об'єкта при наявності перешкод. Ідентифікація. Підстроювання моделі. Методи структурної ідентифікації.

Змістовний аналіз залишків як метод перевірки гіпотез про адекватність структури. Метод параметричної ідентифікації. Параметрична ідентифікація для випадку статичної детермінованої моделі. Нелінійні моделі. Параметрична ідентифікація стохастичних об'єктів. Динамічні моделі. Ідентифікація об'єктів із внутрішніми перехресними зв'язками. Ідентифікація об'єктів у системі автоматичного регулювання зі зворотним зв'язком.

2.7.2. Література

[2] с. 105-143, [4] с. 9-57

2.7.3. Методичні вказівки

Мета вивчення теми - засвоїти експериментально-статистичні методи математичного опису і планування експерименту, а також ідентифікацію за допомогою підстроюваних моделей.

Вивчивши цю тему, студент повинен:

- знати регресивний аналіз, динамічний кореляційний аналіз, ідентифікацію і оцінювання параметрів, зокрема з використанням адаптивних моделей;

- вміти реалізувати детерміновані управляючі алгоритми, доцільніше використовувати активні методи при ідентифікації керованих людиною багатовимірних об'єктів.

2.7.4. Питання для самоперевірки:

- 1.Що називається випадковою величиною?
- 2.Що характеризує коефіцієнт кореляції?
- 3.Дайте поняття методу якнайменших квадратів.
- 4.Опишіть теорію випадкових функцій.
- 5.Що розуміється під ідентифікацією об'єктів?
- 6.Які існують методи структурної ідентифікації?
- 7.Які існують методи параметричної ідентифікації?
- 8.Дайте поняття ідентифікації об'єктів з внутрішніми перехресними зв'язками?
- 9.Який вид моделі кращий?
- 10.Що є загальним для всіх видів моделювання?

3.МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

По дисципліні передбачається **12 годин практичних занять та лабораторних робіт**, присвячених виконанню розрахунків процесів моделювання технологічних процесів кольорової металургії.

Лабораторні заняття проводяться в аудиторії під керівництвом викладача.

Для підготовки до занять необхідно ознайомитись з рекомендованою літературою: [2] с. 154-203.

4.МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ДОМАШНЬОГО ЗАВДАННЯ

Індивідуальне домашнє завдання включає одне теоретичне питання з тем дисципліни та розрахункову частину, яке присвячено розрахунку в'язкості шлаку із застосуванням математичної моделі.

Завдання оформлюється на аркушах А4: титульний аркуш, зміст, текст роботи, список використаної літератури; шрифт 14; інтервал 1-1,5; або рукописний у вигляді зошита.

4.1. Теоретична частина індивідуального домашнього завдання

Перелік питань по варіантам:

1. Поняття системи. Класифікація систем.
2. Питання математичного моделювання.
3. Загальні методологічні питання математичного моделювання.

Подоба як теоретична основа моделювання.

4. Математичний опис термодинамічних закономірностей і рівноваги хімічних реакцій.

5. Моделі кінетики хімічних реакцій, масо- і теплопереносу.

6. Математична модель об'єкта при можливості допущення зосередженості параметрів та опис об'єктів з розподіленими параметрами.

7. Основні характеристики випадкових величин. Регресійний аналіз при пасивному та активному факторном експерименті.

8. Основні положення у фізичному моделюванні.

9. Поняття про наближеному подобі і моделюванні. Виродження впливу критеріїв.

10. Оцінка значущості критеріїв та отримання раціональної сукупності .
Практичні рекомендації.

1. Впровадження газових струменів в рідину.

12. Гідродинаміка продувки металу і шлаку.

13. Заповнення пробниці рідким металом. Рух неізотермічних газових потоків.

14. Обробка табличних даних. Інтерполяція.

15. Обробка табличних даних. Апроксимація.

16. Обробка табличних даних. Чисельне інтегрування.

17. Методи оптимізації . Одновимірна оптимізація.

18. Методи оптимізації. Багатовимірна безумовна градієнтна оптимізація.

19. Методи оптимізації. Багатовимірна безградієнтна оптимізація.

20. Методи оптимізації. Багатовимірна випадкова оптимізація.

21. Методи оптимізації . Багатовимірна умовна оптимізація.

4.2. Розрахункова частина індивідуального домашнього завдання

Мета роботи:

■ Вивчення впливу шлаку на технологічний процес виплавки сталі, феросплавів і кольорових металів.

■ Розрахунок в'язкості шлаку по запропонованій математичній моделі.

4.2.1. Загальні положення

При виробництві кольорових металів однієї з головних задач є отримання кінцевого продукту необхідного хімічного складу з високим виходом придатного металу і мінімальними втратами провідних елементів, а також отримання продукції з високими техніко-економічними показниками.

Всі ці показники в значній мірі залежать від властивостей шлаків, які утворюються в процесі плавки.

Одним з показників якості шлаку є його рідкоподвижність або текучість, що характеризується в'язкістю. При узагальненні одержаних експериментальних даних користуються, як правило, графічним представленням результатів у вигляді ізотерм в'язкості на діаграмах склад - властивість. Вимога наочності обмежує число компонентів шлаку і в кращому випадку графічно може бути представлена чотирьохкомпонентна система. При дослідженні реальних багатоконпонентних шлакових систем результати представляються або графіком «в'язкість - температура», або у вигляді табличних даних.

Таке положення обумовлене перш за все тим, що в даний час майже відсутні розробки, що дозволяють кількісно розрахувати зміну в'язкості шлаку залежно від його складу і температури. Разом з тим розвиток обчислювальної техніки і математичних методів обробки результатів досліджень дає підставу припускати, що вельми ефективним може виявитися узагальнення даних про в'язкість шляхом аналітичного опису залежності цієї властивості розплаву від її складу. Сумарний вміст в таких шлаках оксидів кремнію, кальцію, магнію, марганцю і алюмінію складає 95-98%.

Математичний опис залежності властивостей від складу шлаку засновано на ідеях, виказаних Дж. В. Гиббсом і розвинених надалі Н. С. Курнаковим, який показав, що склад q - мірної системи задається $(q-1)$ - мірним комплексом, а кожній фазі або комплексу фаз, що знаходиться в даній системі в стані рівноваги, відповідає певний геометричний образ або своє рівняння, які є безперервними. Функція такого роду може бути розкладена в ряд Тейлора, тобто зміна властивостей розплаву може бути виражена поліномом деякої міри.

Проте в складних багатоконпонентних системах змінні не є незалежними (сума концентрацій компонентів є величина постійна), тому оцінка коефіцієнтів поліноміальної моделі виявляється неможливою унаслідок звироднілості матриці. Задача математичного опису таких систем може бути вирішена таким чином. Грунтуючись на тому, що незалежно можуть варіюватися лише $q-1$ сумішних змінних (зміст останнього q -того компоненту суміші визначиться як залишок від загальної суми), один сумішний компонент виключається з розгляду, а для незалежних, що залишилися, $q-1$ сумішних змінних будується поліном n -ного ступеня. Однією із задач дослідження в цьому випадку є встановлення кількісних зв'язків між пропорціями окремих компонентів і властивостями суміші.

Для математичного дослідження з літературних джерел було відібрано 100 шлаків різного складу. Межі концентрацій сумішних компонентів

коливалися в наступних межах: 30-45% SiO₂; 19-50% CaO; 0,5-15% MgO; 1-25% MnO; 4-10% Al₂O₃; залишок не більш 5.0%.

На підставі апріорної інформації для опису залежності властивостей шлаків від їх складу була вибрана модель неповного полінома третього ступеня типу:

$$Y = v_0 + \sum_{1 \leq i \leq q} v_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq q} v_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k \leq q} v_{ijk} x_i x_j x_k,$$

де v_0 - вільний член рівняння; v_i, v_{ij}, v_{ijk} - розраховані коефіцієнти; x_i, x_{ij}, x_{ijk} - вміст компонентів в шлаку; %; q - число компонентів.

Відповідно до умови методу, в розрахунках виключався останній сумішний компонент, зміст якого визначався як залишок від різниці $[100 - \sum (\text{SiO}_2 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{Al}_2\text{O}_3)]$, а для незалежних п'яти змінних, що залишилися, будуємо поліном.

Таким чином, знаючи хімічний склад шлаку, можна, не вдаючись до постановки спеціальних експериментальних досліджень, використовуючи розраховані коефіцієнти і приведену вище математичну модель, оцінити рідкоподвіжність шлакового розплаву при будь-якій заданій температурі в інтервалі 1400-1550°C.

4.2.2. Початкові дані для розрахунку в'язкості шлаку

У табл. 4.1 приведені розраховані коефіцієнти моделей (Y_i). в табл.4.2 - значення чинників, в табл.4.3 - експериментальні значення в'язкості шлаків відповідно до варіантів індивідуальних завдань.

Таблиця 4.1

Індекси і коефіцієнти моделей (Y_i) при температурі, °C

Індекс коефіцієнт	Коефіцієнт рівнянь (Y_i) при температурі, °C			
	1400(V_1)	1450(V_2)	1500(V_3)	1550(V_4)
v_0	-124,211	-114,564	-106,666	-93,276
v_1	4,982	4,121	3,927	3,155
v_2	2,389	2,224	1,989	1,785
v_3	-12,527	-12,287	-14,095	-10,006
v_4	1,336	1,275	1,164	1,052
v_5	13,029	13,509	13,565	11,893
v_{12}	-0,099	-0,083	-0,078	-0,063
v_{13}	0,076	0,107	0,138	0,104
v_{14}	-0,053	-0,045	-0,042	-0,035
v_{15}	-0,494	-0,443	-0,445	-0,360
v_{23}	0,311	0,313	0,365	0,266
v_{24}	-0,020	-0,020	-0,018	-0,017
v_{25}	-0,267	-0,271	-0,263	-0,231
v_{34}	0,317	0,319	0,334	0,265
v_{35}	0,963	0,815	0,884	0,597
v_{45}	-0,032	-0,053	-0,057	-0,056

Продовження табл. 4.1				
B ₁₂₃	-0,0025	-0,0031	-0,0040	-0,0031
B ₁₂₄	0,0009	0,0010	0,0010	0,0009
B ₁₂₅	0,0106	0,0094	0,0091	0,0074
B ₂₃₄	-0,0064	-0,0068	-0,0072	-0,0059
B ₂₃₅	-0,0222	-0,0199	-0,0219	-0,01521
B ₃₄₅	0,0049	-0,0058	-0,0070	-0,0049

Таблиця 4.2

Значення чинників (x_i) і варіанти індивідуальних завдань для розрахунку в'язкості шлаку при 1400, 1450, 1500 і 1550°C

Чинник						Варіанти індивідуальних завдань при температурі °C			
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	1400	1450	1500	1550
SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	остаток	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
49,50	19,60	9,80	13,50	5,10	2,50	01	02	03	04
42,70	26,00	26,00	13,40	5,20	2,40	1	2	3	4
29,70	39,60	10,10	13,60	5,10	1,90	5	6	7	8
40,00	46,20	3,51	0,52	6,55	3,16	9	10	11	12
37,22	48,06	4,83	1,07	6,80	2,20	13	14	15	16
31,28	43,76	8,48	6,95	6,79	2,74	17	18	19	20
38,40	30,50	17,70	1,99	9,50	1,91	21	22	23	24
21,30	34,46	1,24	24,86	8,03	1,10	25	26	27	28
29,72	35,28	1,25	20,45	8,97	4,33	29	30	31	32
33,84	39,10	0,56	15,81	8,58	2,11	33	34	35	36
29,70	41,66	0,89	14,32	8,36	5,07	37	38	39	40
42,44	36,26	1,65	4,00	9,82	5,81	41	42	43	44

Таблиця 4.3

Експериментальні значення в'язкості шлаків (η) відповідно варіантам індивідуальних завдань

№ варіанту	η , Па·с	№ варіанту	η , Па·с	№ варіанту	η , Па·с	№ варіанту	η , Па·с
01	2.80	02	2.50	03	0.24	04	0.20
1	1.04	2	0.90	3	0.82	4	0.74
5	0.22	6	0.20	7	0.19	8	0.17
9	0.39	10	0.30	11	0.26	12	0.22
13	0.37	14	0.29	15	0.23	16	0.18
17	0.19	18	0.16	19	0.15	20	0.14
21	0.36	22	0.25	23	0.20	24	0.18
25	0.06	26	0.06	27	0.05	28	0.04
29	0.04	30	0.04	31	0.04	32	0.03
33	0.17	34	0.16	35	0.15	36	0.14
37	0.13	38	0.13	39	0.12	40	0.11
41	0,90	42	0,50	43	0,48	44	0,32

4.2.3. Розрахунок значень в'язкості шлаку виконується в наступному порядку

■ Приводиться в розгорненому вигляді рівняння, що описує зміну в'язкості від температури, для чого з табл. 4.1 необхідно взяти значення коефіцієнтів v_i , v_{ij} , і v_{ijk} для заданої температури відповідно до варіанту індивідуального завдання.

■ У розгорнене рівняння підставити значення чинників (табл.4.2) відповідно до індивідуального варіанту завдання.

■ У кооперації з іншими учасниками розрахунків побудувати графік залежності в'язкості від температури. Кооперуються варіанти, розташовані в рядках табл.4.2. наприклад: 1-4; 9-12; 33-36 і т.д. Розрахунки можна виконати за допомогою калькулятора.

4.2.4. Приклад виконання розрахунку

Розрахувати залежність зміни в'язкості від температури і хімічного складу шлаку для варіанту індивідуального завдання 01, що відповідає температурі шлаку 1400 °С і його хімічному складу (в%): SiO₂ 49,50; CaO 19,60; MgO 9,80; MnO 13,50; Al₂O₃, 5,10; залишок 2,50.

Приводимо в розгорненому вигляді рівняння, що описує зміну в'язкості шлаку залежно від приведеного вище хімічного складу при температурі 1400°С:

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & (-124,2 + 4,982 * x_1 + 2,389 * x_2 - 12,527 * x_3 + \\
 & + 1,336 * x_4 + 13,029 * x_5 - 0,099 * x_1 * \\
 & * x_2 + 0,076 * x_1 * x_3 - 0,053 * x_1 * \\
 & * x_4 - 0,494 * x_1 * x_5 + 0,311 * x_2 * \\
 & * x_3 - 0,02 * x_2 * x_4 - 0,267 * x_2 * \\
 & * x_5 + 0,317 * x_3 * x_4 + 0,963 * x_3 * \\
 & * x_5 - 0,032 * x_4 * x_5 - 0,0025 * x_1 * \\
 & * x_2 * x_3 + 0,0009 * x_1 * x_2 * x_4 + \\
 & + 0,0106 * x_1 * x_2 * x_5 - 0,0064 * x_2 * \\
 & * x_3 * x_4 - 0,0222 * x_2 * x_3 * x_5 - \\
 & - 0,0049 * x_3 * x_4 * x_5) * 10^{-1}
 \end{aligned}$$

де x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 - вміст в шлаку SiO₂, CaO, MgO, MnO і Al₂O₃ відповідно, %.

Підставимо в розгорнене рівняння чисельні значення чинників.

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & (-124,2 + 4,982 * 49,5 + 2,389 * 19,6 - 12,527 * 9,8 + \\
 & + 1,336 * 13,5 + 13,029 * 5,1 - 0,099 * 49,5 * \\
 & * 19,6 + 0,076 * 49,5 * 9,8 - 0,053 * 49,5 * \\
 & * 13,5 - 0,494 * 49,5 * 5,1 + 0,311 * 19,6 *
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & * 9,8 - 0,02 * 19,6 * 13,5 - 0,267 * 19,6 * \\
 & * 5,1 + 0,317 * 9,8 * 13,5 + 0,963 * 9,8 * \\
 & * 5,1 - 0,032 * 13,5 * 5,1 - 0,0025 * 49,5 * \\
 & * 19,6 * 9,8 + 0,0009 * 49,5 * 19,6 * 13,5 + \\
 + & 0,0106 * 49,5 * 19,6 * 5,1 - 0,0064 * 19,6 * \\
 & * 9,8 * 13,5 - 0,0222 * 19,6 * 9,8 * 5,1 - \\
 - & 0,0049 * 9,8 * 13,5 * 5,1) * 10^{-1} = 2,66 \text{ Па}\cdot\text{с}
 \end{aligned}$$

Розрахункове значення в'язкості дорівнює 2,66 Па•с.

Відзначимо, що значення в'язкості для шлаку приведеного вище складу при 1400°C. визначене експериментальне, склало 2,80 Па•с, що знаходиться в межах допустимих помилок методу, як розрахункового, так і експериментального.

Аналогічні розрахунки в'язкості шлаку такого ж складу для температур 1450, 1500 і 1550 дають наступні значення в'язкості $Y_2 = 2,38$, $Y_3 = 2,35$, $Y_4 = 1,92$ Па•с. Значення в'язкості, визначені експериментально для цих же температур, склали 2,5; 2,44 і 2,0 Па•с відповідно.

Кооперуючись і варіантами 02, 03 і 04, будуємо графік залежності зміни в'язкості шлаку від температури.

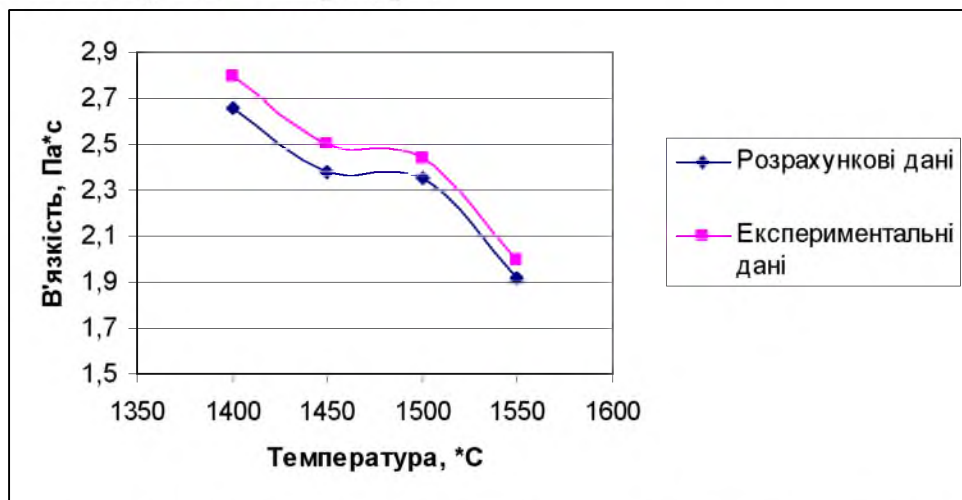


Рис. 4.1. Залежність в'язкості шлаку від температури

Висновки

1. Задовільна збіжність експериментальних і розрахункових даних залежності в'язкості шлаків від температури указує на надійність одержаної математичної моделі.

2. В'язкість шлаку з підвищенням температури різко знижується в інтервалах 1400-1450 і 1500-1550°C. У інтервалі 1450-1500°C спостерігається незначне зменшення в'язкості шлаку.