МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (магістерського) рівня освіти

на тему Впровадження робототехніки в автоматизовані системи управління технологічними процесами

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1744
спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно -інтегровані технології
та робототехніка

освітньої програми Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані
технології_____
_____І. М. Балагуш_____
(ініціали та прізвище)

Керівник проф., д.т.н. Пазюк М. Ю.___
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент директор ТОВ «Електротехмаш»
_____І.А. Курілець_____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно -інтегровані технології та робототехніка
Спеціалізація _____
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____
«___» _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Балагушу Івану Мар`яновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Впровадження робототехніки в автоматизовані системи управління технологічними процесами
керівник роботи Пазюк М. Ю., професор, докт.техн.наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «19» вересня 2025 року № 1304-с
2 Строк подання студентом роботи 12 грудня 2025 р.
3 Вихідні дані до роботи технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз існуючих способів управління процесом грануляції сипких матеріалів та методів його моделювання; аналіз методів дослідження сегрегаційних процесів у сипких матеріалах; розробка моделі процесу огрудкування та обчислювальні дослідження ефективності різних керуючих вплив; розробка моделі структурних змін огрудкованого

матеріалу при його русі трактом шихтоподачі

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): аналіз існуючих способів управління процесом огрудкування; математичне моделювання процесу огрудкування; дослідження впливу керуючих факторів; алгоритм прогнозування фракційного складу

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	проф. Пазюк М. Ю.		

7 Дата видачі завдання 24.01.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючих способів управління процесом грануляції сипких матеріалів та методів його моделювання	27.01-09.02.25	виконав
2	Аналіз методів дослідження сегрегаційних процесів у сипких матеріалах	26.05-08.06.25	виконав
3	Розробка моделі процесу огрудкування та обчислювальні дослідження ефективності різних керуючих вплив	09.06-22.06.25	виконав
4	Розробка моделі структурних змін огрудкованого матеріалу при його русі трактом шихтоподачі	23.06-06.07, 24.11-07.12.2025	виконав
5	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю, підготовка доповіді	08.12-14.12.25	виконав

Студент Ivan Balaguch Іван БАЛАГУШ
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____ Михайло ПАЗЮК
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Олена БАРІШЕНКО
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Балагуш І. М. Впровадження робототехніки в автоматизовані системи управління технологічними процесами

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», науковий керівник М. Ю. Пазюк, Запорізький національний університет, Інженерний науково-навчальний інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2025.

У роботі виконано оптимізацію управління процесом огрудкування агломераційної шихти та розробку математичної моделі огрудкування шихти, що дозволило знизити витрату палива у процесі спікання та підвищити продуктивність агломераційного процесу за виходом придатного агломерату; встановлено закономірності масообмінних процесів, що протікають при огрудкуванні аглошихти; визначено час перебування шихти у барабані-огрудковувачі, який необхідний для досягнення процесом огрудкування сталого режиму; досліджено вплив коливань гранулометричного складу вихідної шихти та зміни вологості, кута нахилу і шивдкості обертання огрудковувача на коєфіцієнти масопереносу та гранулометричні характеристики огрудкованого матеріалу з метою визначення можливих шляхів оптимізації управління процесом огрудкування агломераційної шихти; розроблено спосіб оцінки міцності гранул огрудкованого матеріалу за ступенем їх руйнування під час руху трактом завантаження на аглострічку.

Ключові слова: робототехніка, оптимізація, автоматизація, система управління, алгоритм, агломераційна шихта, агломерація

ABSTRACT

I. Balahush. Introduction of Robotics into Automated Process Control Systems

The final master's qualifying work for completion of the higher education in the specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics", supervisor: M. Yu. Paziuk, Zaporizhzhia National University, Engineering Education and Research Institute, Department of Electrical Engineering and Cyberphysical Systems. Zaporizhzhia, 2025.

The paper optimises the control of the sinter charge pelletising process and develops a mathematical model of charge pelletising, which allows to reduce fuel consumption during sintering and increase the productivity of the sintering process in terms of the yield of suitable sinter; establishes the regularities of mass transfer processes occurring during sinter charge pelletising; determines the time of charge residence in the pelletising drum, which is necessary for the sintering process to achieve a steady-state regime; the influence of fluctuations in the granulometric composition of the initial charge and changes in humidity, angle of inclination and speed of rotation of the pelletiser on the mass transfer coefficients and granulometric characteristics of the pelletised material was investigated in order to determine possible ways to optimise the control of the sinter charge pelletisation process; a method was developed to assess the strength of pelletised material granules by the degree of their destruction during movement along the sinter belt feeding path.

Keywords: robotics, optimization, automation, control system, algorithm, sintering charge, sintering

ЗМІСТ

Вступ ……. 8
Розділ 1 Аналіз існуючих способів управління процесом грануляції сипких матеріалів та методів його моделювання..…… 12
1.1 Роль процесу огрудкування у агломерації залізних руд та його характеристика з позиції управління…… 12
1.2 Процес та обладнання для огрудкування шихти…… 14
1.3 Постановка задачі дослідження……..…... 24
Розділ 2 Аналіз методів дослідження сегрегаційних процесів у сипких матеріалах…….. 27
2.1 Сегрегаційні процеси в агломераційній шихті та їх вплив на перебіг процесу огрудкування……... 27
2.2 Методи оцінки гранулометричного складу агломераційної шихти…… 36
2.3 Висновки до розділу 2……... 45
Розділ 3 Розробка моделі процесу огрудкування та обчислювальні дослідження ефективності різних керуючих впливів…… 46
3.1 Моделювання процесу огрудкування сипкого матеріалу……. 46
3.2 Розрахунок часу активної взаємодії часток під час огрудкування……. 62
3.3 Дослідження впливу коливань вихідного фракційного складу шихти на динаміку процесу огрудкування.....…….. 66
3.4 Дослідження ефективності застосування витрати зволожуючої рідини, кута нахилу та швидкості обертання огрудковувача в якості керуючих впливів на процес грануляції… 72
3.5 Висновки до розділу 3……..…… 82
Розділ 4 Розробка моделі структурних змін огрудкованого матеріалу при його русі трактом шихтоподачі…… 83

4.1 Моделювання структурних змін огрудкованого матеріалу при русі в завантажувальному вузлі агломашини……... 83
4.2 Синтез алгоритму прогнозування фракційного складу шихти, що вивантажується з проміжного бункера агломашини……. 89
4.3 Висновки до розділу 4……... 98
Висновки……... 101
Використані джерела……... 103
Додаток А……. 107

ВСТУП

Актуальність теми. Одним з основних шляхів повоєнного відновлення та економічного розвитку України є підвищення ефективності доменного виробництва, яке може бути досягнуто за рахунок підвищення якості агломерації залізниї руд та економії палива для цього процесу. Вирішальний вплив на результат спікання надають газопроникливість та структура шару шихти на аглострічці, які, у свою чергу, визначаються якістю огрудкування сипкого матеріалу у барабанному огрудкувачі.

Аналіз стану управління огрудкувачем сипких матеріалів показує, що на вітчизняних виробництвах спроби отримання гранулята із завданими властивостямичасто не мають задовільного результату з-за недостатньої вивченності процесу, відсутності раціональних критеріїв управління, використання керуючих впливів, що вносять збурення у процеси транспортування та спікання шихти, а також відсутності комплексного підходу до формування гранулометричного складу шихти при огрудкуванні та транспортуванні на аглострічку. Наслідками обзначених проблем є зниження продуктивності агломашини та нераціональне використання теплоти згоряння твердого палива.

Вказані недоліки усунені шляхом отримання достовірного математичного опису процесів огрудкування та транспортування шихти на аглострічку, яке було б засноване на аналізі сутності даних процесів та пов’язувало б основні технологічні параметри, а також побудови на основі отриманих моделей алгоритмів керування, які забезпечать оптимізацію управління формуванням гранулометричного складу шихти. Тому синтез математичних моделей вказаних процесів та побудова на їх основі алгоритмів керування є актуальною задачею.

Мета дослідження. Оптимізація управління процесом огрудкування агломераційної шихти та розробка математичної моделі огрудкування шихти, що дозволить знизити витрату палива у процесі спікання та

підвищити продуктивність агломераційного процесу за виходом придатного агломерату.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети у кваліфікаційній роботі сформульовано і вирішено такі завдання:

1. Встановлено закономірності масообмінних процесів, що протікають при огрудкуванні аглошихти, у вигляді залежностей фракцій багатофракційної шихти від коефіцієнтів масопереносу, що визначаються вихідним гранулометричним складом, а також вологістю шихти та кутом нахилу огрудковувача.

2. Визначено за допомогою встановлених закономірностей такий час перебування шихти у барабані- огрудковувачі, який необхідний для досягнення процесом огрудкування сталого режиму, при якому швидкості формування та руйнування часток становляться рівними.

3. Досліджено вплив коливань гранулометричного складу вихідної шихти та зміни вологості, кута нахилу і шивдкості обертання огрудковувача на коєфіцієнти масопереносу та гранулометричні характеристики огрудкованого матеріалу з метою визначення можливих шляхів оптимізації управління процесом огрудкування агломераційної шихти.

4. Розроблено спосіб оцінки міцності гранул огрудкованого матеріалу за ступенем їх руйнування під час руху трактом завантаження на аглострічку.

Об'єкт дослідження. Процес зміни гранулометричного складу агломераційної шихти при огрудкуванні у барабанному огрудкувачі.

Предмет дослідження. Алгоритм управління процесом формування гранулометричного складу агломераційної шихти.

Методи дослідження. Балансовий метод моделювання при розробці математичних моделей процесів огрудкування та структурних змін огрудкованого матеріалу; методи планування експерименту при дослідженні впливу керуючих дій; методи математичної статистики та

ідентифікації при обробці результатів досліджень; численні методи розв’язання систем рівнянь

Наукова новизна одержаних результатів

1. Розширено підхід до вирішення завдань ідентифікації гранулометричних характеристик агломераційної шихти з урахуванням технологічних особливостей її переробки, що ґрунтується на системі рівнянь балансу фракцій у матеріалі.

2. Підтверджено закономірності зміни структури огрудкованої шихти під дією стираючих та ударних навантажень у вигляді лінійних залежностей вмісту фракцій полідисперсного матеріалу від висоти заповнення проміжного бункера.

3. Запропоновано критерій управління формуванням гранулометричних характеристик агломераційнорї шихти у вигляді різниці поточного розподілу фракцій у огрудкованому матеріалі, що завантажується на агломтрічку, та його значенням, яке забезпечує максимальну продуктивність агломашини за придатним агломератом.

Практичне значення одержаних результатів. Удосконалена схема моделювання розподілу частинок агломераційної шихти по висоті шару на аглоленті на основі припущень про характер взаємодії фракцій матеріалу при формуванні шару і відоме значення середнього діаметра частинок матеріалу. Розроблено методику прогнозування розподілу фракцій агломераційної шихти по висоті шару на аглоленті на основі відомого середнього діаметра частинок, коефіцієнтів, що відображають особливості переробки агломераційної шихти на даному виробництві, і припущень про характер взаємодії частинок матеріалу при формуванні .

Особистий внесок дослідника полягає у формуванні мети та задач дослідження, обґрунтуванні наукових положень; проведенні теоретичних і експериментальних досліджень; розробленні критерію управління формування гранулометричних характеристик агломераційної шихти;

розроблення технологічних рішень щодо удосконалення роботи ділянки барабанних грануляторів.

Апробація результатів досліджень. Основні положення і результати магістерської роботи доповідалися і обговорювалися на: Міжнародній науково-практичної конференції «Сучасні перспективи розвитку обліку, фінансів, економіки, управління, права та інженерії» (5-6 грудня 2024р., м. Запоріжжя) та XVIII університетської науково-практичної конференції студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених Молода наука - 2025» (14-18 квітня 2025р., м. Запоріжжя).

Публікації.

1. Оглобліна В.О., Балагуш І.М., Одарюк І.О. Штучний інтелект у сучасній інженерії: розробка та практичне застосування. *Сучасні перспективи розвитку обліку, фінансів, економіки, управління, права та інженерії : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (5-6 грудня 2024р., м. Запоріжжя)* / за ред. Макаренка А. П., Меліхової Т. О. Запорізький національний університет. Запоріжжя: ЗНУ, 2024. С. 385-387

2. Оглобліна В.О., Загородній С.А., Балагуш І.М. Використання штучного інтелекту для автоматизації систем управління технологічними процесами в умовах війни та поствоєнного відновлення. *Вплив штучного інтелекту на розвиток людини, суспільства, освіти, культури, економіки в умовах війни і поствоєнного відновлення: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції 21-22 листопада 2025 року* / ред.-упорядник: д.філософ.н., проф., В. Г. Воронков. Львів – Торунь: Liha- Pres, 2025.

Структура та обсяг магістерської роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання з 42 найменувань, викладена на 108 сторінках машинописного тексту, включаючи 20 рисунків, 17 таблиць та додаток на 3 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ГРАНУЛЯЦІЇ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ ЙОГО МОДЕЛЮВАННЯ

1.1 Роль процесу огрудкування у агломерації залізних руд та його характеристика з позиції управління

Агломерація – це процес спікання суміші дрібної руди із твердим паливом та флюсами, у результаті якого утворюються міцні пористі куски – агломерат.

Виробничі операції, що виконуються на агломераційній фабриці, показано на рис. 1.1. Матеріали з рудного двору поступають до приймальних бункерів 1 шихтового відділення, де вони змішуються у відповідному співвідношенні. З бункера 3 у шихтове відділення або у огрудковувач 6 поступає повернення. По транспортерному корвеєру 2 шихта поступає до приймального бункера 4 спікального відділення, а звідти транспортером 5 подається до барабана- огрудковувача 6, де відбувається її змішування, зволоження та огрудкування. Дозування здійснюється встановленням необхідних витрат компонентів шихти, що подаються на транспортер 2 живильниками 7 з відповідних бункерів. Після огрудкування шихта подається до проміжного бункера агломашини 8, а звідти рівномірно та безперервно системою завантаження подається на агломашину 9 та укладається на ланцюг колошникових візків. Запалювання шару шихти на аглострічці відбувається при проходженні шару під запальним горном 10. Під візками розташовано вакуум-камери 11. Готовий агломерат скидують у кінці машини з візків, подрібнюють у дробарках 12, розсіюють у грохоті 13 та відправляють у доменний цех.

Продукти згоряння та повітря з вакуум-камер по колектору 14 поступають на очищення у циплони 15 та видаляються ексгаустером 16 через трубу 17.

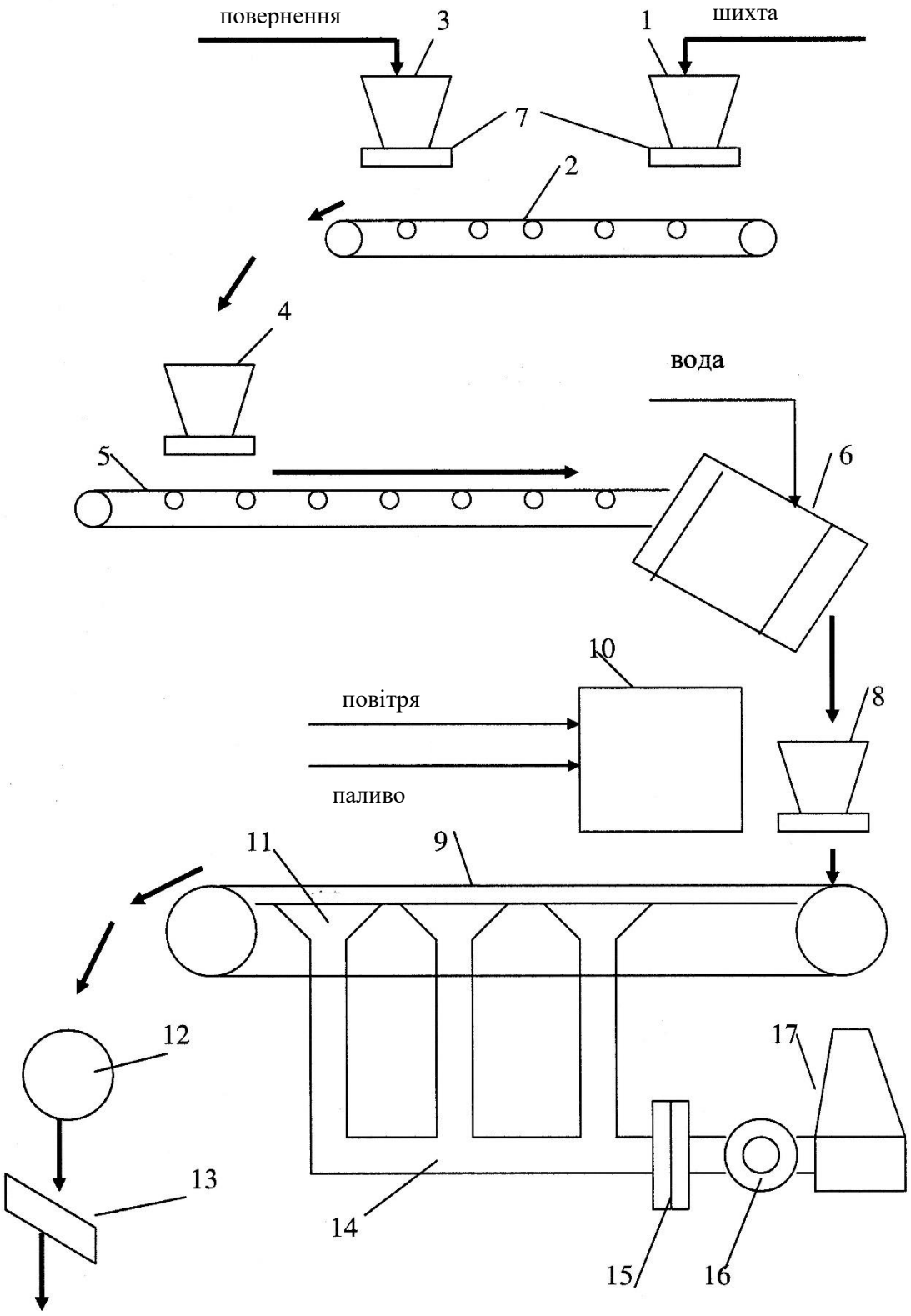


Рисунок 1.1 – Технологічна схема агломераційної фабрики

З точки зору управління агломераційний процес є безперервним, тому головною задачею управління є дотримання матеріального балансу. Усі нев'язки матеріального балансу компенсуються буферними ємностями, функції яких виконують приймальні бункери шихтового відділення, спікального відділення та проміжні бункери агломашин.

Процес грануляції є невід'ємною чвастиною технології виробництва агломерату. Суха агломераційна шихта має настільки низьку газопроникливість, що ексгаустер не в змозі просмоктати кріз шар достатню кількість повітря та продуктів згоряння. При зволоженні та змішуванні шихти порошинки шихти злипаються у невеличкі комочки та газопроникливість шару, що спікається, суттєво збільшується. Огрудкування сипких матеріалів здійснюється у обертових барабанах або на тарільчастих огрудковувачах.

1.2 Процес та обладнання для огрудкування шихти

У процесі огрудкування беруть участь шихтові матеріали, що складається з руди, рудного концентрата, вапняка, агтрациту, колошникового пилу, коксу та повернення, вода, поверхнево-активні речовини, що поліпшують змочуваність рудних часток, та колоїдні матеріли, які сприяють зміцненню гранул.

Ретельне змішування забезпечує рівномірний розподіл вапняку, вапна, твердого палива, різних добавок у масі залізорудних складових шихти – аглоруді та концентраті. В основі процесу змішування лежить взаємне переміщення часток у загальному обсязі шихти. Чим хаотичніше розподілені матеріали в цьому обсязі, тим однорідніша за хімічним складом та фізичними властивостями перемішана шихта. Результати змішування – досягнення однорідності шихти – визначаються як властивостями і співвідношенням мас матеріалів, а й режимом роботи змішувальних апаратів.

Найбальше розповсюдження на підприємствах чорної металургії отримали огрудковувачі барабанного типу, які відрізняються простотою конструкції та експлуатації, а також високою продуктивністю (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика змішувальних барабанів, що застосовуються на агломераційних фабриках України

Параметри	Типи змішувачів		
	СБ 2,8×6	СБ 2,8×8	СБ 3,2×12,5
Продуктивність, т/год	350	350	1200
Діаметр/довжина барабана, м	2,8/6	2,8/8	3,2/12,5
Кут нахилу, град.	4	0-4	2,5
Ступінь заповнення, %	15	13	18
Число обертів, $хв^{-1}$	6,35	6,55; 9,84	9,4
Кількість форсунок для зволоження шихти	4	8	12
Витрата води на зволоження, $м^3$/год	до 10	до 25	до 36
Потужність електродвигуна, кВт	55	132	400

Загальна схема руху сипкого матеріалу в барабані, що обертається така, що маса матеріалу піднімається на певну висоту і потім падає або скочується під дією власної сили тяжіння. Внаслідок наявності різниці рівня шихти на кінцях барабана (рівень завантаження вище на 0,7-1,2 м рівня вивантаження) відбувається одночасне переміщення її уздовж осі барабана до розвантажувального кінця. Кожен макрооб'єм шихти здійснює зазначених у табл. 1.1 барабанах близько 20 - 25 подібних циклів протягом приблизно трьох хвилин пересипання шихти в процесах змішування або обгортування.

Залежно від швидкості обертання барабана та ступеня заповнення його об'єму шихтою, виникають два характерні режими руху матеріалу в поперечному перерізі барабана – водоспадний та перекату (рис. 1.2).

Водоспадний режим руху шихти, що пересипається, характерний для підвищених швидкостей обертання барабана, що забезпечують окружну швидкість часток шихти в діапазоні 1,2-2 м/с при ступенях заповнення об'єму барабана 13-18% (табл. 1.1). При малій мірі заповнення близько 5% водоспадний режим руху матеріалу, як правило, не досягається.

Із загальної теорії та практики змішування матеріалів відомо, що водоспадний режим виникає при повному переході матеріалу з четвертого та третього до другого квадранту барабана (рис. 1.2, б, в). Траєкторія руху матеріалу складається з трьох ділянок: кругового – ВА, параболічного, після відриву часток шихти у вільне падіння – АС та ділянки СВ – зсипання матеріалу по розпушеному висхідному потоку шихти кругового руху.

Відрив тіла від стінки барабана відповідає моменту, коли відцентрова сила $F_ц$ зрівняється з радіальною складовою сили тяжкості тіла $G_в$.

Відцентрова сила:

$$F_ц = mV^2/R,$$

де R - радіус барабана, м;

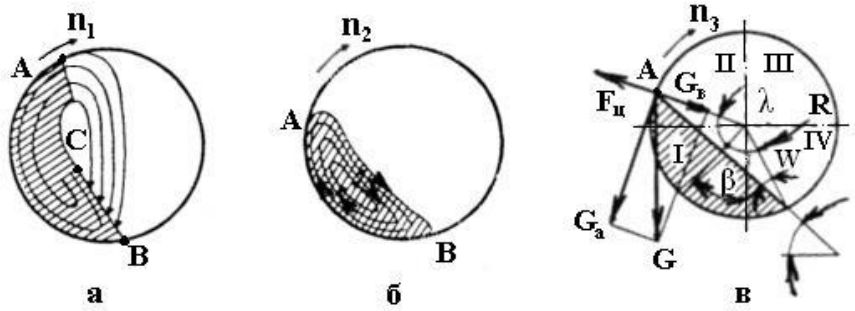
m - маса тіла, що обертається;

V – лінійна швидкість обертання тіла (м/с), пов'язана зі швидкістю обертання барабана n (об/хв) рівністю $V = \pi Rn/30$.

Радіальна складова сили тяжіння:

$$Gв = G\cdot\cos\alpha = m\cdot g\cdot\cos\alpha,$$

де α – кут відриву тіла – між вектором сили тяжіння G та вектором її радіальної складової Gв.



а – водоспадний режим; б – режим перекату; в – вектори діючих на часточки шихти сил, параметри сегментів змішування та оздоблення матеріалів барабані; Fтр – сила тертя; Fц - відцентрова сила; G, Ga, Gв – сила тяжіння та її складові; α – кут відриву матеріалу від стінки барабана – між векторами сил G та Ga; β – кут між вертикаллю та лінією, що з'єднує центр ваги сегмента шихти та вісь обертання барабана; λ – центральний кут охоплення шихти; ω – кут зсипання шихти у режимі перекату; R – радіус барабана; n_1, n_2, n_3 – швидкості обертання барабана; I-IV – квадранти барабани; A, B, C – граничні сфери об'єму барабана

Рисунок 1.2 - Схеми руху шихти в змішувальному (а) та огрудкувальному (б) барабанах [1]

Таким чином, умова відриву тіла відповідає рівності:

$$mV^2/R = m \cdot g \cdot \cos\alpha,$$

звідси

$$\cos\alpha = mV^2/Rmg;$$

підставивши значення $V = \pi Rn/30$ і виконавши перетворення, отримаємо величину безрозмірного критерію кінематичного подібності, який

дорівнює cosα і представлений формулою B = n2R/900. Параметр для сухих сипких матеріалів може мати значення в діапазоні 0,25-0,45 од. Ці величини поділяють режими перекату та водоспадний, тобто менші значення вказують на режим перекату, а великі – на водоспадний режим. Прослизування часток по стінці барабана ускладнює, а укрупнення часток при їх зволоженні, навпаки, полегшує перехід руху шихти з перекату режиму в водоспадний режим.

Режим перекату, показаний у поперечному перерізі барабана, що обертається (рис. 1.2, поз. б), як правило, виникає при малих лінійних швидкостях обертання (0,5-1 м/с) і шихтовому навантаженні барабана (ступенях заповнення його об'єму) 5- 10%, підвищених коефіцієнтах тертя під час руху шихти по шорсткої внутрішньої поверхні барабана. Як і у випадку водоспадного режиму, тут також діють на часточки шихти згадані вище три сили: відцентрова $F_ц$, тяжкості G і тертя $F_{тр}$. Визначає характер руху шихти переважно співвідношення двох останніх сил. Відцентрова сила при знижених швидкостях обертання барабана має малі величини. Коли сила тяжіння (її рушійна складова) врівноважує силу тертя, шихта зсипається вниз у режимі перекату, стадії якого представлені в такий спосіб. Спочатку зволожувана шихта рухається по круговій траєкторії і як тільки кут β нахилу до поверхні (рис. 1.2, поз. в) перевищить кут природного укосу, надлишкова маса шихти під дією сили тяжіння, що перевищила силу тертя, перекочується в нижню частину барабана шихти, що поділяє її висхідний і низхідні потоки. Значна частина граничного шару практично нерухома - це центр тяжкості шихти, що перекочується. Навколо нього обертаються згадані шихтові потоки. Тільки верхні та нижні зони граничного шару шихти беруть участь у русі. Замість кожної порції шихти, що зсипалася, з'являється нова і такі цикли ссипання-перекочування багаторазово повторюються. Перекочування відносно великих шматків аглоруди, повернення, вапняку по поверхні вологої

шихти, що містить дрібні класи концентрації та інших матеріалів, забезпечує формування ущільнених гранул і грудок шихти.

Якісне змішування не допускає перевищення вологості шихти понад оптимальну (не більше 4-5%), інакше, при більшій вологості, у локальних обсягах шихти формуються великі котуни діаметром до 20-30 мм. Потрапляючи з змішувального в окамкувальний барабан, такі котуни або збільшуються у розмірі або утворюють уламки з подальшим формуванням на їх основі таких же великих, некондиційних гранул-окатишів. При спіканні шихти великі котуни не прогріваються до потрібних температур плавлення (1350 ºС) і в готовому спеку представлені великими включеннями прожареної шихти, що виділяється у вигляді пилу при охолодженні та при обробці агломерату в процесах дроблення та гуркотіння. Утворення великої маси великих котунів у процесах змішування- огрудкування часто спостерігається на аглофабриках, що спікають шихти з високим вмістом концентратів і шламів підвищеної вологості. Відомий промисловий досвід, коли для руйнування великих котунів в барабанних огрудковувачах встановлювали довгі, важкі металеві труби - гранулокалібратори, що перекочуються вздовж осі барабана разом з шихтою, що комкується.

Для підвищення однорідності шихти, що змішується на багатьох вітчизняних аглофабриках барабанні змішувачі подовжили на 1-2 м, збільшивши при цьому тривалість процесу змішування, яка не перевищує 2,5- 3 хв, в той час як на закордонних аглофабриках довжина змішувачів досягає 18-23 м, а час змішування дорівнює 5-6 хв і більше.

Недостатнє змішування шихти призводить до локалізації палива та флюсів в окремих макрооб'ємах шихти та одержання агломерату, схильного до руйнування через поліморфне перетворення високотемпературної модифікації силікату кальцію зі збільшенням об'єму цього мінералу при охолодженні на 11% і перетворенням більшої.

На закордонних аглофабриках шихту змішують у барабанах великої довжини та продуктивності. Так, на одній з агломашин японської фірми додатково до змішувача, що діє, діаметром 4 і довжиною 23 м встановили майже такий же змішувач розмірами 4,5 і 23 м відповідно. Великі витрати на таку модернізацію принесли суттєві вигоди: витрата твердого палива на агломерацію скоротилася на 4,8%, збільшилася відновність агломерату при зменшенні масової частки в ньому монооксиду заліза від 6,4 до 5,3%, що створює можливість зниження витрат коксу в доменній плавці приблизно на 4 кг/т чавуну. В останніх роботах Ю.А. Фролова та В.П. Пузанова перспективи застосування довгих барабанів суттєво скориговані: показано можливості покращення змішування у менш довгих барабанах за рахунок оптимізації їх параметрів та режимів роботи.

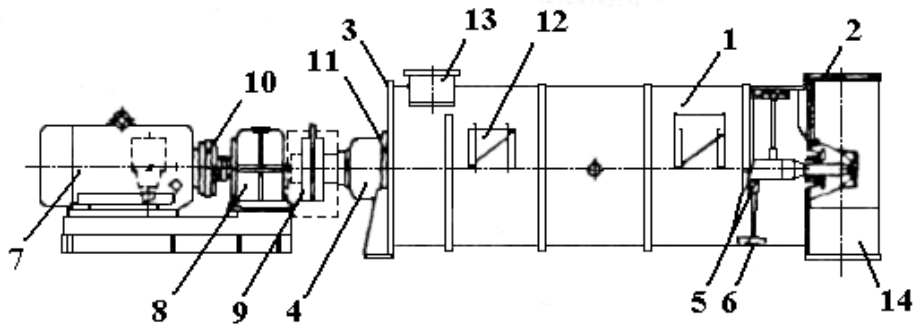
Крім потужних барабанних змішувачів на японських та європейських аглофабриках використовують горизонтальні або частіше – вертикальні барабанні інтенсивні змішувачі.

Один із варіантів горизонтальних інтенсивних змішувачів невеликої продуктивності (360 т/год) показаний на рис. 1.3.

Нерухомий барабан 1 діаметром 1,9 і довжиною 5 м має 13 завантажувальний і розвантажувальний 14 патрубки. По осі барабана встановлений горизонтальний вал з чотирнадцятьма лопатями, що перемішують шихту, обертається приводною системою 7-11 зі швидкістю 73 об/хв. Інтенсивне змішування шихти у вихровому (за характером руху матеріалу) змішувачі забезпечує однорідність шихти, близьку до одиниці (не менше 0,95) і, крім того, активізує поверхневі властивості, що сприяють кращому огрудкуванню шихти. Вихрові змішувачі міксерного типу використовують у системах комбінованого змішування шихти: 70-77% її маси (повернення, коксову дрібницю, концентрат, аглоруду) перемішують у барабанному змішувачі, а решту (вапняк, залишки аглоруди, шлами, окалину) інтенсивно перемішують в шнековому змішувачі. Використання такого змішування в поєднанні з якісним

обкомкуванням шихти дозволяє зарубіжним фахівцям удосконалити технологію агломерації, наприклад, збільшити висоту шару шихти, що спікається, від 450 до 490 мм і за рахунок цього зменшити на 8,5% витрату твердого палива на спікання, підвищити міцність. класів із нього на 2,6%.

Найкращими апаратами для змішування шихти у світі визнані вертикальні (за розташуванням змішувальних валів) інтенсивні змішувачі, які випускають німецька фірма «Айріх» і використовуються в агломерації Японії, Німеччини та інших західноєвропейських країн. Ці змішувачі не тільки ідеально перемішують компоненти аглошихти, рівномірно розподіляють в ній вологу, але і, як уже підкреслено, активізують поверхневі властивості часток, формують мікрогранули з концентрату, інших дрібних матеріалів, що є центрами грануляції шихти при її подальшій обробці в барабанах- огрудковувачах.



1 – корпус барабана; 2 – каркас; 3 – фланець; 4 – підшипник; 5 – вал; 6 – лопатка; 7 – електродвигун; 8 – редуктор; 9 – муфта пружна; 10 - муфта зубчаста; 11 – ущільнення сальникове; 12 – кришка; 13 - завантажувальний патрубок; 14 - патрубок вивантаження змішаної шихти

Рисунок 1.3 - Загальний вигляд горизонтального вихрового змішувача [1]

Встановлено, що продуктивність агломашини пропорційна газопроникливості шихти, яка, у свою чергу, визначається якістю її огрудкування. Таким чином, ціллю управління роботою грануляторів

сипких матеріалів є забезпечення оптимального ступеня обкомкованості шихти, під якою розуміють її гранулометричний склад та міцність гранул.

Значення цих параметів є вихідними величинами огрудковувача як об'єкта автоматизації, однак їх визначеня є ускладненим. Оскільки кінцевий гранулометричний склад шихти та її кінцева вологість взаємопов'язані, то для визначення ступеня обкомкованості використовується один з цих параметрів. Для дискретного вимірювання гранулометричного складу матеріалу при управлінні у ручному режимі застосовують пристрої, робота яких основана на ситовій класифікаціїї проб [2].

Існує ряд методів автоматичного контролю якості огрудкування шихти, таких як:

- нейтронний метод вимірювання вологості, оснований на ефекті уповільнення швидких нейтронів атомами водню;

- термокондуктометричний метод вимірювання вологості, заснований залежності теплопроводності шихти від її вологості;

- кондуктометричний метод вимірювання вологості.ю заснований на залежності електричного опору зволоженого матеріалу від його вологості;

- фотометричний метод визначення гранулометричного складу, заснований на залежності послаблення світлового потоку, який пересікає потік огрудкованої шихти, від крупності її комків;

- метод контролю гранулометричного складу шихти, заснований на залежності кута підйому її маси у розвантажувального краю огрудковувача від значення середнього діаметру її часток [3];

- метод контролю гранулометричного складу шихти, заснований на оцінки розсіювання електромагнітної енергії СВЧ-діапазону гранулами сипкого матеріалу [7];

- методи контролю гранулометричного складу шихти, засновані на вимірюванні вібрацій механічної коливальної системи, що викликані ударами потоками часток матеріалу [2];

- методи контролю гранулометричного складу шихти, засновані на наведені у індукційному датчикі сигналів більшої чи меншої амплітуди та тривалості внаслідок зміни розмірів часток матеріалу при його транспортуванні [2];

- метод контролю гранулометричного складу шихти, заснований на зйомці потоку сипкого матеріалу та подальшої обробки отриманного зображення обчислювальною машиною з ціллю отримання кількісних характеристик.

Очевидно, що останній метод, поява якого обумовлена розвитком обчислювальної техніки, є найбільш точним та перспективним.

Властивостями сипких матеріалів, що впливають на зід процем=су грануляції, є вміст та розподіл у них вологості, форма часток, гранулометричний та хімічний склад [5, 6]. Комплексний вплив цих факторів визначає комкуваність сипких матеріалів. Для оцінки комкуваності застосовується метод вільної каплі, визначення капілярного тиску, висоти капілярного всмоктування теплоти смочуваності. В. М. Вітючиним запропонований показник комкуваності:

$$K = \frac{HKB - W_{вз}}{MKB - HKB}$$

де МКВ та НКВ – найбільша на найменша капілярна вологості;

$W_{вз}$ – внутрішньозеренна вологість.

Стабільність процесу грануляції залежить також від постійності продуктивності дозатора приймального бункера, що подає шихту у огрудковувач, оскільки вона визначає ступінь заповнення барабану [7].

Умови визначення гранул у барабані визначаються такими характеристиками огрудковувача та механічного впливу на матеріал, як довжина агрегату, його радіус, кут його нахилу, стан його внутрішньої поверхні, число обертів, кількість зволожувальної рідини, навантаження за шихтою [8].

У процесі огрудкування беруть участь такі компоненти, як шихта, вода, поверхнево-активні речовини та колоїдні матеріали.

Таким чином, барабан- огрудковувач як об’єкт управління може бути представлений схемою, наведеною на рис. 1.4.



$\overrightarrow{\Phi'}$ – гранулометричний склад огрудкованої шихти, %; $\vec{\Phi}$ – гранулометричний склад вихідної шихти; W – вологість шихти, %; n – швидкість обертання, об/хв; α - кут нахилу огрудковувача, град; $\vec{П}$ – міцність гранул

Рисунок 1.4 - Барабан- огрудковувач як об’єкт управління

Стан об’єкту визначається гранулометричним складом огрудкованої шихти $\overrightarrow{\Phi'}$ та міцністю гранул $\vec{П}$.

Основний обурюючий вплив - гранулометричний склад вихідної шихти $\vec{\Phi}$.

Керуючі впливи - вологість шихти W, швидкість обертання n та кут нахилу огрудковувача α.

1.3 Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз існуючих засобів та систем управління огрудкуванням сипких матеріалів та математичних моделей цього процесу дозволяє зробити висновки:

1. Процес огрудкування агломераційної шихти є складним об’єктом з позиції управління, так як на нього впливає велика кількість збурюючих впливів – коливання фракційного і хімічного складу иа вологість шихти – та його результат визначається комплексом технологічних параметрів, таких як витрата води, розмір, кут нахилу, швидкчть обертання та ступінь заповнення огрудковувача.

2. Визначено, що основним обурюючим впливом на процес огрудкування є коливання фракційного складу шихти, що вивантажується з приймального бункера. У якості керуючих впливів доцільно розглядати витрату зволожуючої рідини, швидкість обертання огрудковувача та його кут нахилу. Найбільш інформативними величинами оцінки якості огрудкування є гранулометричний склад та міцність гранул.

Загалом, аналіз відомих рішень дає змогу сформулювати основну мету роботи: оптимізація управління процесом огрудкування агломераційної шихти та розробка математичної моделі огрудкування шихти, що дозволить знизити витрату палива у процесі спікання та підвищити продуктивність агломераційного процесу за виходом придатного агломерату.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання:

1. Встановити закономірності масообмінних процесів, що протікають при огрудкуванні аглошихти, у вигляді залежностей фракцій багатофракційної шихти від коефіцієнтів масопереносу, що визначаються вихідним гранулометричним складом, а також вологістю шихти та кутом нахилу огрудковувача.

2. Визначити за допомогою встановлених закономірностей такий час перебування шихти у барабані-огрудковувачі, який необхідний для досягнення процесом огрудкування сталого режиму, при якому швидкості формування та руйнування часток становляться рівними.

3. Дослідити вплив коливань гранулометричного складу вихідної шихти та зміни вологості, кута нахилу і шивдкості обертання

огрудковувача на коєфіцієнти масопереносу та гранулометричні характеристики огрудкованого матеріалу з метою визначення можливих шляхів оптимізації управління процесом огрудкування агломераційної шихти.

4. Розробити спосіб оцінки міцності гранул огрудкованого матеріалу за ступенем їх руйнування під час руху трактом завантаження на аглострічку.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ СЕГРЕГАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У СИПКИХ МАТЕРІАЛАХ

2.1 Сегрегаційні процеси в агломераційній шихті та їх вплив на перебіг процесу огрудкування

Переробка залізорудних концентратів у доменній печі пов'язана з великим виносом рудної дрібниці газами та порушенням правильного перебігу доменного процесу внаслідок зменшення газопроникності шихти. Тому дрібні руди та концентрати піддають попередньому обкусуванню – агломерації.

Спікання рудної дрібниці на колосниковій решітці з просмоктування повітря через шар шихти, що спікається, є найпоширенішим способом окускування. Спікання піддають рудну дрібницю з часточками розміром до 10 мм, концентрати, колосниковий пил і пилоподібні залізовмісні матеріали. Для виробництва офлюсованого агломерату до рудної частини додають подрібнений вапняк розміром часток до 3 мм. Як паливо застосовують подрібнений коксик фракції 0-3 мм. У суміш цих матеріалів додають оборотний продукт (повернення), часточки агломерату в шматках до 8 мм і шихту, що не спеклася.

Рудна дрібниця або концентрати збагачення ретельно перемішуються з подрібненим коксиком при одночасному зволоженні. Дрібні зволожені часточки матеріалу при перемішуванні укрупняються в невеликі більш-менш міцні грудочки. В результаті шихта набуває зернистого складу, що зменшує її насипну вагу та створює необхідну газопроникність, що дозволяє вести процес спікання у шарі 200 – 300 мм і більше.

Підготовлена шихта завантажується в спікальний пристрій, нижня частина якого є колосниковими гратами, і запалюється з поверхні за допомогою спеціального горна. Одночасно під колосниковими гратами створюється вакуум, завдяки чому повітря просмоктується через шар завантаження, що забезпечує інтенсивне окиснення матеріалів шихти в міру підвищення температури в зоні горіння. Горіння, що почалося з поверхні шихти, в обмеженій по висоті зоні послідовно проходить через всю товщину завантаженого матеріалу і закінчується біля колосникових грат.

На колосникові грати перед завантаженням шихти укладають шар готового агломерату крупністю 8-15 мм. Це так звана постіль, яка оберігає колосникові грати від впливу високих температур, запобігає пробудженню шихти через колосникові грати і полегшує сходження агломераційного пирога з грат після закінчення процесу спікання.

Характерні риси агломераційного процесу зберігаються незалежно від конструкції агломераційних машин. Найбільш поширені в промисловості агломашини стрічкового типу, які являють собою безперервний ряд візків, що рухаються (паллет) з колосниковими гратами. Шихту завантажують на палети у головній частині машини. Потім палети послідовно проходять під запальним горном та над усіма вакуумними камерами установки. За час руху палети верхньої робочої гілки машини зона горіння проходить весь шлях від верхніх шарів шихти до постілі. До моменту закінчення процесу палета досягає розвантажувальної частини машини, де при її перекиданні готовий агломерат скидається з колосників, охолоджується і поділяється на фракції - готовий агломерат, ліжко, повернення.

Продуктивність агломераційної машини оцінюють за формулою:

$$Q = 0{,}6F\rho lm\,, \qquad (2.1)$$

де F - площа спікання стрічки, м^2;

ρ - насыпна щільність шихти, т/м^3;

l - вертикальна швидкість спікання, м/хв;

m - вихід годного агломерату з шихти, %.

Як видно з (2.1), підвищення продуктивності агломераційних машин на діючій аглофабриці може бути зведено до збільшення вертикальної швидкості спікання і виходу готового агломерату. Збільшення продуктивності також пов'язане зі зменшенням простоїв агломашини.

Вертикальна швидкість спікання характеризує переміщення фронту формування агломерату по висоті шару в одиницю часу. На практиці швидкість спікання визначається як окреме від розподілу висоти шару на загальний час процесу, що включає час розігріву верхнього шару зовнішнім джерелом тепла і час часткового охолодження агломерату. Незалежно від методу її обчислення швидкість спікання визначається швидкістю переміщення теплової хвилі, яка, у свою чергу, залежить від швидкості фільтрації повітря, теплофізичних властивостей шихти і від швидкості горіння палива. Теплофізичні властивості шихти і палива залежать від того, з якого родовища вони отримані і тому оперативно керувати їх параметрами не є можливим. Тому основним способом прискорення спікання є збільшення швидкості фільтрації повітря через шар.

Швидкість фільтрації газу пов'язана з параметрами шару і розрідженням повітря під колосниковими гратами. За даними, наведеними в роботі, вертикальна швидкість спікання прямо пропорційна газопроникності шихти, що вимірюється кількістю повітря, що проходить через 1 м^2 площі всмоктування машини.

Таким чином, основним способом інтенсифікації процесу спікання є збільшення швидкості фільтрації повітря через шар, що досягається за допомогою зниження газодинамічного опору та підвищення вакууму під колосниковою решіткою. Однак підвищення вакууму пов'язане із значним

збільшенням витрати електроенергії на 1 тону агломерату. При перевищенні розрідження деякого критичного значення приріст продуктивності уповільнюється. Тому, найбільший інтерес представляє розробка методів підвищення газопроникності шару шихти.

Газопроникність спекаемого шару можна істотно підвищити, якщо забезпечити задану сегрегацію часток за його висотою [11] при завантаженні шихти на аглоленту. Під сегрегацією розумітимемо розподіл класів крупності часток матеріалу у його масі. У роботі [12] визначено кількісні можливості інтенсифікації процесу спікання за рахунок перерозподілу часток шихти різного розміру по висоті шару. Для агломераційної шихти, газопроникність шару з максимальною неоднорідністю по висоті відрізняється від газопроникності шару однорідної структури, завантаженого без сегрегації, приблизно на 20%. У роботах [13] також дано оцінку впливу сегрегації на газопроникність шару. Згідно з наведеними даними, управління сегрегацією часток шару аглошихти викликає збільшення його газопроникності в середньому на 15%.

Однією з переваг сегрегації автори робіт [14] вважають утворення постелі з великих гранул. Однак, при цьому не враховується виникнення неоднорідності шару шихти за речовинним та гранулометричним складами. Деякі автори вважають, що се-грегація корисна лише до певного значення, вище якої вона починає надавати несприятливий вплив на процес спікання. Висновок про позитивний вплив сегрегації обґрунтовується раціональним розподілом палива за висотою шару.

Автори робіт [15] вважають, що сегрегація надає негативний вплив на стабільність властивостей агломерату, збільшуючи хімічну неоднорідність по висоті шару, а скупчення великої кількості дрібних фракцій (-3 мм) у верхніх горизонтах шару до підвищення газодинамічного опору завантажуваного матеріалу.

У ряді випадків, сегрегація шихти по крупності в деякому подовжньому перерізі шару є основною причиною зниження якості агломерату. У цих роботах показано, що при зменшенні сегрегації можливе підвищення однорідності та поліпшення металургійних властивостей агломерату. Сегрегація бажана за відсутності комбінованого нагріву шихти, оскільки призводить до вирівнювання теплового рівня процесу. При комбінованому нагріванні, коли витрата палива знижується на 10%, його перерозподіл призводить до нестачі тепла нижніх горизонтах шару. Будь-який подовжній перетин шару агломераційної шихти на аглострічці називається горизонтом шару.

Разначено, що існує сегрегація не лише за висотою шару, а й за шириною спікальних візків. Проведена порівняльна оцінка сегрегації при завантаженні шихти барабанним і вібраційним живильниками. Якщо в першому випадку розподіл вуглецю по висоті шару було приблизно рівномірно, то в другому його вміст у верхній половині склало 5,21%, в нижній - 2,55%. Це дозволило суттєво підвищити техніко-економічні показники агломераційного процесу за рахунок зниження витрати палива. Експериментальні дослідження показали, що газопроникність шару значно підвищується при встановленні завантажувального лотка під кутом, рівним або близьким до кута природного укосу матеріалу.

Характеристики міцності агломерату багато в чому залежать від закономерностей зміни хімічного складу і теплового режиму процесу спікання по висоті шару. В агломераційній шихті флюс і паливо зосереджуються у фракції 0-3 мм, частку якої припадає близько 83% вуглецю і 73% окису кальцію. Тому, сегрегація шихти по гранулометричному складу викликає сегрегацію за вмістом палива, і впливатиме на тепловий режим спікання, і, отже, на міцність агломерату. Початковий період спікання характеризується недоліком тепла, тому верхня частина спека, що досягає однієї третини всієї спекаемой маси матеріалу, є найменш міцною. Після випробувань агломерату на скидання,

у пробі з верхньої частини спеку вміст фракції -5 мм становив 21,2%, з нижньої – 15,6%.

Таким чином, як показує аналіз літературних джерел, переважний вплив на умови протікання агломераційного процесу та якісні характеристики агломерату надають структура підготовленого до спікання шару залізорудного матеріалу та закономірності розподілу за його висотою палива та флюсів.

Маса надходить матеріалу, що представляє собою сукупність часток, близьких до сферичної форми, рухається по поверхні завантажувального лотка до укосу шару під дією гравітаційних сил більші часточки скочуються до основи шару, що формується, дрібні зосереджуються у верхній частині.

Розглядаючи окрему часточку як тіло правильної форми (куля), що вільно рухається по похилій площині, отримані рішення, що характеризують розподіл часток сипкого матеріалу по висоті шару, що формується при коченні часток:

$$h_i = \frac{l_1(\sin\alpha_1 - f_{1i}^1 \cos\alpha_1)\sin\alpha_2}{f_2^1 \cos\alpha_2 - \sin\alpha_2}, \qquad (2.2)$$

и при одночасному ковзанні та коченні:

$$h_i = \frac{l_1(\sin\alpha_1 - f_{1i} \cos\alpha_1)\sin\alpha_2}{v(f_{2i}^1 \cos\alpha_2 - \sin\alpha_2)}, \qquad (2.3)$$

де h_i - положення і-ї часточки у шарі, м;

α_1 - кут нахилу завантажувального лотка, град;

α_2 - кут нахилу поверхні відкосу шару град;

f_{1i}^1, f_{1i} - коефіцієнти тертя кочення та ковзаня і-ї часточки по поверхні завантажувального лотка;

f_{2i}^{1} - коефіцієнт тертя кочення та ковзаня часточки по поверхні відкосу шару;

v - коефіцієнт форми часточки.

Рівняння (2.2) відповідає коченню часточки шихти по поверхні завантажувального лотка і укосу шару. Залежність (2.3) дає можливість визначити розподіл часток шихти в шарі при їх коченні зі ковзанням по завантажувальному лотку і чистому коченню по поверхні укосу матеріалу.

Аналіз отриманих залежностей та порівняння результатів математичного моделювання з дійсними процесами [16] дозволяє зробити наступний висновок: основний вплив на процес формування шару полідисперсного матеріалу надають його фізико-механічні властивості та кут нахилу завантажувального лотка.

Вплив зовнішніх зусиль на структуру стаціонарного шару полідисперсного сипкого матеріалу досліджено у роботах [17]. Показано, що зміна висоти шару (усадка) пов'язана з ущільненням його структури під дією розрідження та вібрації конструкції аг-ломашини.

У роботі [18] представлена математична модель процесу сегрегації сипкого матеріалу при завантаженні її в шахту доменної печі:

$$\frac{dx_i}{dl} = -\alpha_i x_i (l - x_i),$$

де α_i - коєффіцієнт сегрегації і-ї фракції;

x_i - вміст і-ї фракції у шихті, %;

l - відстань у радіальному напрямку руху до стінки печі, м.

Розв'язання цього рівняння є функція, яка дає співвідношення між різними фракціями шихти при сегрегації, характеризується функцією:

$$\log(\frac{x_i}{x_i - 1}) = \log(\frac{x_i^{\ f}}{x_{i-1}^{\ f}}) - (\alpha_i - \alpha_{i-1}),$$

де f - коефіцієнт, що характеризує властивості матеріалу.

Наведена модель призначена для опису окремого випадку сегрегації полідисперсних матеріалів в умовах зустрічно спрямованого руху газу через шар, що формується. Основні коефіцієнти (α_i, f) і структура моделі визначені експериментально, що знижує можливість їх використання для опису механізму сегрегації.

Відома модель розподілу полідисперсного матеріалу по укосу шару, побудована на основі розподілу Вейбулла [19].

Зміна середнього діаметра часток шихти по довжині укосу шару матеріалу апроксимується рівнянням:

$$\overline{d} = \overline{d}_n \frac{l}{r(k+1)} \left(\ln \frac{l}{l-e} \right)^k,$$

де $\overline{d}_n$ - середний діаметр часток вихідного матеріалу, мм;

l - відносна довжина відкосу шару, м;

k - емпірічний коефіцієнт, $k = \frac{\overline{d}_n}{m_n} l^{-B\overline{d}_n}$;

$r(x)$ - гамма-функція;

B - емпірічний коефіцієнт, що визначає властивості матеріалу;

m_n - показник ступеня неоднорідності матеріалу.

Модель дозволяє оцінювати зміну середнього розміру часток укосу шару матеріалу при відомому гранулометричному складі матеріалу.

Неоднозначність зв'язку середнього діаметра часток матеріалу з його фракційним складом, експериментальне визначення ряду коефіцієнтів знижують можливість застосування моделі в різних технологічних умовах.

Для чисельної оцінки ступеня сегрегації агломераційної шихти за висотою шару при відомому розподілі фракцій запропоновано коефіцієнт сегрегації [20], який визначається за наступною формулою

$$K_{сф} = 1 - \frac{\sum_{ij} \frac{\left| C_{ij}^{\,ид} - C_{\text{ij}}^{\,\text{ф}} \right|}{C_i}}{\sum_{ij} \frac{\left| C_{ij}^{\,ид} - C_{\text{i}} \ / n \right|}{C_i}},$$

де $C_{ij}^{\,ид}, C_{\text{ij}}^{\,\text{ф}}$ - вміст і-ї фракції на j-ому горизонті шару при ідеальній та фактичній сегрегації відповідно, %;

C_i - вміст і-ї фракції у вихідній шихті, %;

n - кількість горизонтів у шарі.

У даному випадку запропоновано показник сегрегації полідисперсного матеріалу по висоті шару, який не відображає фізичних основ механізму його формування і не може бути використаний для моделювання процесу.

Необхідно відзначити, що управління тільки однією газопроникністю шару агломераційної шихти не забезпечить підвищення економічної ефективності процесу її спікання і металургійних характеристик агломерату. Так, для умов комбінату «Запоріжсталь» максимальна швидкість спікання агломераційної шихти і міцність отриманого агломерату досягається при певній сегрегації фракцій матеріалу і твердого палива за висотою шару, який не відповідає оптимуму по газопроникності [15].

Розглянуті методи дозволяють визначити середній діаметр часток у кожному з горизонтів шару, що дає неоднозначну інформацію про вміст різних фракцій у них. Тому, розрахунок параметрів процесу спікання може бути зведений до розрахунку розподілу заданих фракцій по висоті шару

шихти, а значить актуальною є розробка методів розрахунку, які дозволять знайти розподіл фракцій по висоті шару.

Таким чином, створення заданої за деякими критеріями се-грегації має забезпечити найкраще спікання агломерату і призводити до економії енергоресурсів.

Таким чином, завдання отримання оцінки розподілу часток матеріалу по висоті шару шихти на аглоленті відповідно до заданих характеристик є актуальною. Для вирішення такого завдання необхідні пристрої контролю середньої крупності часток та спосіб розрахунку цієї величини в залежності від параметрів завантажувального вузла.

2.2 Методи оцінки гранулометричного складу агломераційної шихти

Для підвищення ефективності роботи промислових підприємств з масової переробки сипких матеріалів у гірничо-збагачувальній, гірничо-хімічній, металургійній та інших галузях промисловості, необхідно оперативно контролювати якісні показники сировини, до яких відноситься його гранулометричний склад. Розробка досить точних і надійних вимірювальних пристроїв і математичних моделей, що дозволяють автоматично контролювати гранулометричний склад матеріалу в заданих точках технологічних ліній, робить можливим управління параметрами аг-ломашин залежно від параметрів потоку агломераційної шихти [21].

Існує велика кількість методів та засобів вимірювання крупності та гранулометричного складу матеріалів. За принципом дії і характеру вимірів їх можна розділити на дві групи: дискретного та аналогового дії.

До першої групи відносяться гранулометри, засновані на принципі сухого або мокрого розсіву на гуркотах. Розподіл за класами крупності оцінюється за допомогою аналітичних формул, що базуються на апроксимації кумулятивних кривих гранулометричного складу. Недоліком

цієї групи пристроїв є дискретність процесу вимірювання та відносно великий час аналізу.

Переважними з точки зору оперативності контролю, що дозволяють включити системи контролю гранулометричного складу в контури регулювання, є вимірювачі характеристик крупності в потоці. До методів, що використовуються в цій групі вимірювачів, належать електронно-оптичний, кондуктометричний, а також метод, заснований на перетворенні параметрів шматка в електричний імпульс. В останньому випадку, реєструються амплітудні та частотні характеристики пружного чутливого механізму при зіткненні зі шматками матеріалу.

Специфічні умови роботи датчиків на збагачувальних фабриках обмежують застосування промислових (розроблюваних і серійно) пристроїв. До таких умов відноситься підвищена хімічна агресивність потоків, корозійний і абразивний вплив середовища на чутливі елементи (у пульпах, рудних потоках), вибухонебезпечність, властиві тільки збагачувальним фабрикам діапазони зміни параметрів (витрати, концентрації). Це обставина робить актуальним виконання дослідницьких робіт у галузі вимірювання технологічних параметрів, що відповідають умовам збагачувальних фабрик.

Будь-який технологічний продукт є неоднорідною за складом сумішшю часток, що відрізняються розміром, масою, хімічним складом. Цю суміш можна як статистичну сукупність. Частка маси продукту, що припадає на нескінченно вузький інтервал фракції крупності, визначається залежністю, котра в статистиці носить назву щільності розподілу. Відносний вміст всіх фракцій, меньших d, характеризується функцією розподілу:

$$R[< d] = \int_{d_{\min}}^{d} r[d]dd ,$$

головна властивість якого

$$\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} r[d]dd = 1$$

На практиці гранулометричний склад продукту визначається з допомогою ситового аналізу чи іншого методу, вихід фракції заданий дискретно. У цьому випадку функція розподілу має вигляд:

$$R[< d] = \sum_{i=1}^{N} r[d_i],$$

де N - загальна кількість фракцій;

d_i - середній діаметр часток фракції i.

Мартін Р. [22] одним із перших почав розглядати суміш зерен як статистичну сукупність. Він прийняв, що крива густини розподілу кількості зерен підпорядкована експоненційному закону. Звідси випливало, що з кубічних часток розміром щільність розподілу маси визначається:

$$r[d] = Ad^3 e^{-ad}, \qquad (2.4)$$

де A, a - деякі емпіричні коєфіцієнти.

Рівняння функції розподілу за мінусовим класом:

$$R[> d] = A\int_0^d d^3 e^{-ad} dd$$

Пізніше, приймаючи, що маса часток пропорційна кубу її характерного розміру (діаметру) для подрібненого продукту формулу (2.4) запропонував А.А. Андреасен [23]. Крива щільності розподілу починається

на початку координат, зростає до максимуму в точці $d = 3/a$ і знижується при $d \to \infty$ до осі абсцис.

Н. Хейвуд підвищення точності рівняння (1.4) ввів додатковий показник ступеня в експоненційний закон розподілу числа часток [24]. Це призвело його до наступного рівняння густини розподілу матеріалу:

$$r[d] = Ad^3 e^{-ad^b}. \qquad (2.5)$$

Крива, що описується рівнянням (2.5), також має максимум. Рівняння Хейвуда складніше, не лінеаризується, в силу цього поширення не отримало.

Узагальнюючи велику кількість результатів ситових аналізів різних подрібнених продуктів, А.А. Годен вивів емпіричне ступеневе рівняння для сумарного числа дрібних фракцій [25]:

$$r[d] = Ad^a. \qquad (2.6)$$

У подальшому С. Андрєєв, та Р. Шухман, аналізуючи подрібнення, прийшли до того ж рівняння [26].

Щільність функції розподілу (1.6) також має ступеневий вираз:

$$r[d] = Aad^{a-1}. \qquad (2.7)$$

У залежності від показника крива щільності монотонно знижується ($a < 1$) або монотонно підвищується ($a > 1$). Перевага рівнянь (2.6) та (2.7) – їх простота та легкість визначення коефіцієнтів.

А. Вейнінг вивів формулу щільності розподілу маси матеріалу за діаметрами часток, виходячи з аналізу подрібнення [27]. Він прийняв, що маса часток пропорційна кубу їх діаметрів, а густина розподілу числа часток від діаметра слід рівнянню:

$$N[d] = Bd^{-b}e^{-a^2d^2}$$

Звідси випливає наступна формула густини розподілу маси фракцій:

$$N[d] = Bd^{-b}e^{-a^2d^2}.$$

Ця щільність розподілу має максимум при $b < 3$, при $b > 3$ крива має вигляд гіперболи.

Розін і Раммлер, аналізуючи гранулометричний склад подрібнених продуктів як статистичну сукупність зерен, знайшли, що щільність розподілу маси фракцій по ситовому складу добре описується розподілом Вейбулла:

$$r[d] = Aad^{a-1}e^{-Ad^a},$$

якому відповідає просте рівняння функції розподілу:

$$R[< d] = 1 - e^{-Ad^a}$$

Рівняння гранулометричного складу за сумарним залишком на ситі з осередком d отримало назву Розіна – Раммлера:

$$R[> d] = e^{-Ad^a}. \qquad (2.8)$$

При використанні чисельного значення коефіцієнта a, рівняння (1.8) дозволяє описати широкий клас кривих. При $a > 1$ крива густини зростає до максимуму і потім асимптотично знижується. При $a < 1$ крива має вигляд гіперболи. Чим більший показник А, тим більше увігнута крива гранулометричного складу.

При рівнянні (2.8) перетворюється на однопараметричний закон експоненційного розподілу:

$$R[>d] = e^{-Ad},$$
$$r[d] = Ae^{-Ad}$$

Математичні методи знаходять дедалі ширше застосування під час вирішення різних питань збагачення. У зв'язку з цим багато традиційних завдань збагачення вимагають суворої, більш точної, а в деяких випадках і принципово нової постановки.

Одним з перспективних напрямів дослідження та моделювання процесів, що протікають при переробці сипких матеріалів на промислових підприємствах, є використання балансового методу. Однією з його переваг є те, що за його допомогою можливий опис технологічних процесів як у масштабі всього підприємства, так і для окремого агрегату.

Технологічна схема виробництва агломерату представляє собою деякий граф, у вузлах якого відбувається підведення матеріальних потоків та їх відведення в інші технологічні переділі. Оскільки накопичення матеріалу в технологічних агрегатах немає, у вузлах графа спостерігається нульовий запас. Це означає, що граф має баланс між приходом та витратою матеріальних потоків і може бути описаний системою балансових рівнянь.

У [28] розглянуто застосування балансової моделі розподілу маси продукту та його компонентів за технологічною схемою. У загальному вигляді схема розглядається як розгалужена мережа (граф) зі зворотними зв'язками. Розташування апаратів у схемі, взаємозв'язок потоків продуктів, визначають топологію схеми. Незалежно від характеру схеми і застосовуваних апаратів, виду сировини та її якості, для схеми загалом і кожної її операції (вузла) справедливий закон матеріального балансу по загальному продукту і його компонентам, звідси й назва методу.

У математичному плані, балансовий розрахунок схем зводиться до вирішення системи рівнянь алгебри. Для кожного i-го вузла схеми можна скласти рівняння балансу за масою продукту в цілому:

$$\sum_{s=1}^{k_{i1}} \gamma_{is}^{вх} = \sum_{s=1}^{k_{i2}} \gamma_{is}^{вых},\ i=\overline{1,n},$$

та балансу за масою складових його компонентів:

$$\sum_{s=1}^{k_{i1}} \gamma_{is}^{вх} \alpha_{js}^{вх} = \sum_{s=1}^{k_{i2}} \gamma_{is}^{вых} \alpha_{js}^{вых},\ j=\overline{1,m},$$

де k_{i1}, k_{i2} - число продуктів на вході та виході вузла i;

s - номер продукту вузла;

$\gamma_{is}^{вх}$, $\gamma_{is}^{вых}$ - кількість продукту s на вході та виході вузла;

$\alpha_{js}^{вх}$, $\alpha_{js}^{вых}$ - вміст у продукті s компонента j;

n - кількість вузлів;

m - кількість компонентів.

Кількість доданків у рівняннях балансу визначається сумарною кількістю вхідних і вихідних продуктів відповідного вузла. Кількість число рівнянь - числом компонентів m, що містяться в продуктах. Отже, для кожного вузла можна записати $m+1$ балансових рівнянь. Оскільки схема являє собою взаємопов'язаний ланцюг апаратів, то отримані рівняння утворюють систему з $n(m+1)$ рівнянь. Розрахунок схеми зводиться до вирішення тим чи іншим способом отриманої системи рівнянь, яка відображає матеріальний баланс продуктів та їх компонентів.

Технологічні продукти піддають також і фракційного аналізу. Розподіл по фракціях може характеризувати різні параметри матеріалу - крупність часток, щільність, міцність, магнітну сприйнятливість і так далі.

Розглянемо процедуру складання рівнянь за запропонованою методикою [28]. Припустимо, що у нас є якийсь вихідний продукт γ_0. Розділимо його на чотири фракції. Вихід першої фракції - $\gamma_0^{(1)}$, другої - $\gamma_0^{(2)}$, і далі - $\gamma_0^{(3)}$, $\gamma_0^{(4)}$. У сумі ці фракції складуть γ_0. Кожна фракція характеризується вмістом компонентів $\alpha_0^{(1)}$, $\alpha_0^{(2)}$, $\alpha_0^{(3)}$,$\alpha_0^{(4)}$ У середньому продукту зміст компонента становить α_0. Якщо вихідний продукт γ_0 технологічно розділити на два продукти, і кожен із них, у свою чергу, піддати фракційному аналізу, то збережеться загальний баланс маси вихідного продукту, баланс кожної фракції, баланс компонентів у кожній фракції та загальний баланс компонентів. Крім того, для кожного з трьох продуктів є баланс по фракціям та вмісту в них компонентів. Запишемо систему рівнянь, що представляє поділ однокомпонентного продукту на чотири фракції. Баланс для всіх фракцій кожного продукту:

$$\gamma_0^{(1)} + \gamma_0^{(2)} + \gamma_0^{(3)} + \gamma_0^{(4)} = \gamma_0,$$
$$\gamma_1^{(1)} + \gamma_1^{(2)} + \gamma_1^{(3)} + \gamma_1^{(4)} = \gamma_1,$$
$$\gamma_2^{(1)} + \gamma_2^{(2)} + \gamma_2^{(3)} + \gamma_2^{(4)} = \gamma_2,$$

баланс для кожної фракції у продуктах:

$$\gamma_1^{(1)} + \gamma_2^{(1)} = \gamma_0^{(1)},$$
$$\gamma_1^{(2)} + \gamma_2^{(2)} = \gamma_0^{(2)},$$
$$\gamma_1^{(3)} + \gamma_2^{(3)} = \gamma_0^{(3)},$$
$$\gamma_1^{(4)} + \gamma_2^{(4)} = \gamma_0^{(4)},$$

баланс для компонента кожної фракції:

$$\gamma_0^{(1)}\alpha_0^{(1)} + \gamma_0^{(2)}\alpha_0^{(2)} + \gamma_0^{(3)}\alpha_0^{(3)} + \gamma_0^{(4)}\alpha_0^{(4)} = \gamma_0\alpha_0,$$
$$\gamma_1^{(1)}\alpha_1^{(1)} + \gamma_1^{(2)}\alpha_1^{(2)} + \gamma_1^{(3)}\alpha_1^{(3)} + \gamma_1^{(4)}\alpha_1^{(4)} = \gamma_1\alpha_1,$$
$$\gamma_2^{(1)}\alpha_2^{(1)} + \gamma_2^{(2)}\alpha_2^{(2)} + \gamma_2^{(3)}\alpha_2^{(3)} + \gamma_2^{(4)}\alpha_2^{(4)} = \gamma_2\alpha_2,$$

баланс по компоненту для кожної фракції у продуктах:

$$\gamma_1^{(1)}\alpha_1^{(1)} + \gamma_2^{(1)}\alpha_2^{(1)} = \gamma_0^{(1)}\alpha_0^{(1)},$$
$$\gamma_1^{(2)}\alpha_1^{(2)} + \gamma_2^{(2)}\alpha_2^{(2)} = \gamma_0^{(2)}\alpha_0^{(2)},$$
$$\gamma_1^{(3)}\alpha_1^{(3)} + \gamma_2^{(3)}\alpha_2^{(3)} = \gamma_0^{(3)}\alpha_0^{(3)},$$
$$\gamma_1^{(4)}\alpha_1^{(4)} + \gamma_2^{(4)}\alpha_2^{(4)} = \gamma_0^{(4)}\alpha_0^{(4)}.$$

Таким чином, повний баланс для однокомпонентного продукту одного вузла по чотирьох фракціях з поділом на два потоки описується чотирнадцятьма рівняннями. З них випливають лінійно залежні рівняння:

$$\gamma_1 + \gamma_2 = \gamma_0,$$
$$\gamma_1\alpha_1 + \gamma_2\alpha_2 = \gamma_0\alpha_0.$$

Для фракційного поділу одного вузла справедливі наступні співвідношення:

$$N_y = t(m+1),$$
$$N_0 = z(m+1),$$
$$N_0 = N_y + N_{np} = (m+1)(t+z),$$

де N_y - число рівнянь для вузла за балансом фракцій та компонентів;

t - число фракцій;

m - число компонентів;

N_0 - загальне число балансових рівнянь для вузла;

z - число продуктів;

N_{np} - число рівнянь продукту за балансом компонентів.

Число балансових рівнянь для схеми, що містить n вузлів:

$$N = nN_0 = n(m+1)(t+z)\,.$$

Рішення системи балансових рівнянь пов'язане з низкою обчислювальних труднощів. Основні з них: велика розмірність системи, погана обумовленість (визначник близький до нуля), перевизначеність, несумісність. Принципову складність розрахунку схем викликають замкнуті контури. Якщо схеми не містять замкнутих контурів, то розрахунок балансової системи в цілому розчленовується на послідовний розрахунок балансових систем окремих вузлів [28].

Вибір методу розрахунку балансової системи залежить від багатьох факторів: складності схеми, порядку системи, її обумовленості, обсягу інформації та її достовірності, необхідної точності та оперативності розрахунку. Зроблено різні спроби вирішення балансових систем [29]. У роботі [30] розглянуто застосування методів лінійного програмування на вирішення балансових систем. У роботі [32] застосовані ймовірнісні методи, в яких враховується, що коефіцієнти системи - випадкові числа. У роботі [33] пропонується розглядати визначення продуктів виходу циркуляції як самостійну задачу, що дає можливість розчленування завдання на малі (вузлові) системи, які вирішуються роздільно. Однак обмеження пам'яті та швидкодії ЕОМ не дозволяють оперувати із системами великих розмірів, виникає проблема накопичення похибок вимірювань.

Розподіл фракцій і компонентів, що містяться в них, по продуктах поділу дозволяє технологам мати повну картину процесу поділу. Однак балансовий розрахунок схем, заснований на фракційному аналізі продуктів, утруднений у зв'язку з обчислювальними труднощами. Тому, розробка методів розв'язання балансових рівнянь стосовно умов сипких середовищ є актуальним завданням.

2.3 Висновки до розділу 2

Аналіз стану питань контролю гранулометричного складу сипких матеріалів і моделювання процесів сегрегації в агломераційній шихті при її завантаженні на аглострічку дозволяє зробити висновок про необхідність проведення додаткових досліджень у цих областях, що обумовлено вимогою вдосконалення існуючих методів і розширення сфери їх застосування.

Так як для формування шару агломераційної шихти на аглострічці із заданими показниками сегрегації необхідні пристрої контролю крупності часток, які в даний час відсутні, завдання може бути вирішене методом математичного моделювання, пов'язаного з розв'язанням системи балансових рівнянь. Спроби використання цього методу для розрахунку розподілу маси продукту і його компонентів по технологічних агрегатах мали місце, але не отримали подальшого розвитку внаслідок труднощів обчислювального характеру.

РОЗДІЛ 3

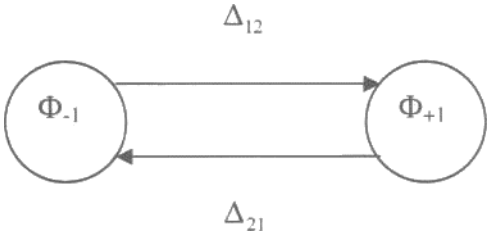
РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ОГРУДКУВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ КЕРУЮЧИХ ВПЛИВ

3.1 Моделювання процесу огрудкування сипкого матеріалу

Розгляд структурних змін в масі матеріалу, що огрудковується, різними дослідниками [34] дозволяє зробити висновок, що механізм процесу окрудування включає численні зіткнення часток, що накочуються, і центрів утворення гранул. Тому моделювання даного процесу доцільно проводити пофракційно, вважаючи основними факторами різниця швидкостей руху по гранулляторі комкується і комкує фракцій [35]. Для моделювання доцільно використовувати аналітичний балансовий метод, який є універсальним і дозволяє з високою достовірністю досліджувати вплив виробничих факторів на роботу технологічних агрегатів, а також ефективно вирішувати складні питання щодо вибору оптимальних значень основних параметрів процесу. Відповідно до цього методу, характеристики процесу грануляції сипкого матеріалу визначаються виходячи з рівнянь матеріального балансу.

Для моделювання масопереносу при обгортуванні умовно розділимо матеріал по гранулометричному складу на дві частини [36]: фракція діаметром <3 мм, що грудкується і діаметром >3 мм, що грудкує. В процесі обгортування фракція <3 мм взаємодіє з фракцією >3 мм, поступово накочуючись на її поверхню і таким чином збільшуючи розмір часток. Одночасно з накочуванням фракцій, що комкуються, на поверхню комкуючих відбувається часткове руйнування останніх під дією стираючих і ударних навантажень. Таким чином, у процесі обгортування відбувається

масоперенесення від дрібних фракцій до великих і навпаки, що представлено на рис. 3.1:



Δ_{12}, Δ_{21} - швидкості масопереносу відповідно від дрібної до великої фракції та навпаки

Рисунок 3.1 - Схема масопереносу між фракціями шихти при огрудкуванні

Процес грануляції протікає протягом періоду подачі до огрудковувача зволожуючої рідини і супроводжується зміною гранулометричного складу матеріалу: відбувається зростання кількості фракцій, що комкують, і зменшення числа тих, що комкують. Після припинення подачі в барабан зволожуючої рідини швидкість масопереносу від дрібних до великих фракцій починає знижуватися, а від великих до дрібних - збільшуватися. Цей процес триває деякий час до стану рівноваги між зростанням кількості комкующей фракції та її руйнуванням, тобто. до того моменту, коли швидкості утворення великої та дрібної фракцій стають рівними.

Позначимо вихідне кількість фракцій, що комкує та що комкується, як Φ_{-1} і Φ_{+1} відповідно. Тоді в момент припинення подачі зволожуючої рідини кількість фракцій обох класів крупності можна визначити таким чином:

$$\left.\begin{aligned} \Phi'_{-1} &= \Phi_{-1} - (\Delta_{12} - \Delta_{21})\tau_{ж} \\ \Phi'_{+1} &= \Phi_{+1} - (\Delta_{21} - \Delta_{12})\tau_{ж} \end{aligned}\right\} \quad (3.1)$$

де $\Phi'_{-1,}\Phi'_{+1}$- кількість відповідно комкованої фракції та фракції, що комкує, у момент припинення подачі зволожуючої рідини, %;

Δ_{12} - швидкість масопереносу від фракції, що комкується, до комкуючої, %/с;

Δ_{21} - швидкість масопереносу від комкуючої фракції до фракції, що клмкується, %/с;

$\tau_{ж}$ - час, що минув від початку процесу огрудкування до припинення подачі барабан зволожуючої рідини, с.

Через певний інтервал часу процес досягне стану динамічної рівноваги, кількість фракцій обох класів у який визначатиметься як:

$$\left.\begin{aligned} \Phi''_{-1} &= \Phi'_{-1} - \left(\Delta_{12cp} - \Delta_{21cp}\right)\tau_{p1} \\ \Phi''_{+1} &= \Phi'_{+1} - \left(\Delta_{21cp} - \Delta_{12cp}\right)\tau_{p1} \end{aligned}\right\} \qquad (3.2)$$

де $\Phi''_{-1,}\Phi''_{+1}$- кількість відповідно комкованої фракції та фракції, що комкує, у момент встановлення рівноважного масопереносу між ними, %;

$\Delta_{12ср}$ – середня швидкість масопереносу від фракції, що комкується, до комкуючої, за час від припинення подачі зволожуючої рідини до моменту встановлення динамічної рівноваги, %/с;

$\Delta_{21ср}$ - швидкість масопереносу від комкуючої фракції до фракції, що клмкується, за час від припинення подачі зволожуючої рідини до моменту встановлення динамічної рівноваги, %/с;

$\tau_{р1}$ – час від припинення подачі зволожуючої рідини до моменту встановлення динамічної рівноваги, с.

Після досягнення процесом грануляції рівноважного стану швидкості масопереносу з одного класу фракцій до іншого стають рівними, тобто:

$$\Delta''_{12} = \Delta''_{21} \qquad (3.3)$$

де Δ''_{ij} - швидкість масопереносу від і-ї фракції до j-ї у стані рівноваги процесу грануляції.

Оскільки під час перехідного процесу, що починається після припинення подачі зволожуючої рідини, швидкості масопереносу постійно змінюються, то для моделювання процесу грануляції на цій ділянці доцільно ввести поняття коефіцієнта швидкості масопереносу між фракціями матеріалу, що обкомковується. Цей коефіцієнт показує, скільки матеріалу переходить з однієї фракції в іншу в одиницю часу. Тоді середні швидкості масопереносу між фракціями в шихті за час перехідного процесу становитимуть:

$$\left.\begin{aligned}\Delta_{12ср} &= K'_{12}\frac{\Phi'_{-1}+\Phi''_{-1}}{2}\\ \Delta_{21ср} &= K'_{21}\frac{\Phi'_{+1}+\Phi''_{+1}}{2}\end{aligned}\right\}$$

(3.4)

де K'_{ij} - коефіцієнт масопереносу від і-ї фракції до j-ї в переходному процесі, $с^{-1}$.

Приймаючи, що K'_{ij} залишається незмінним після завершення перехідного процесу, отримуємо:

$$\left.\begin{aligned}\Delta''_{12} &= K'_{12}\Phi''_{-1}\\ \Delta''_{21} &= K'_{21}\Phi''_{+1}\end{aligned}\right\}$$

(3.5)

Спільне рішення рівнянь (3.2) і (3.3) дозволяє визначити коефіцієнти швидкості масопереносу між фракціями оздоблюваного матеріалу. Після підстановки (3.2) розгорнутих значень з (3.4), а в (3.3) - з (3.5) отримаємо:

$$\begin{cases} \Phi''_{-1} = \Phi'_{-1} - (K'_{12}\dfrac{\Phi'_{-1}+\Phi''_{-1}}{2} - K'_{21}\dfrac{\Phi'_{+1}+\Phi''_{+1}}{2})\tau_{p1} \\ \Phi''_{+1} = \Phi'_{+1} - (K'_{21}\dfrac{\Phi'_{+1}+\Phi''_{+1}}{2} - K'_{12}\dfrac{\Phi'_{-1}+\Phi''_{-1}}{2})\tau_{p1} \\ K'_{12}\Phi''_{-1} = K'_{21}\Phi''_{+1} \end{cases} \quad (3.6)$$

Використовуючи для вирішення системи метод послідовної заміни невідомих, визначаємо коефіцієнти масопереносу:

$$\left.\begin{aligned} K'_{12} &= \frac{\Phi'_{-1}-\Phi''_{-1}}{\tau_{p1}\left(\dfrac{\Phi''_{+1}}{\Phi''_{-1}}\cdot\dfrac{\Phi'_{-1}+\Phi''_{-1}}{2} - \dfrac{\Phi'_{+1}+\Phi''_{+1}}{2}\right)}\cdot\frac{\Phi''_{+1}}{\Phi''_{-1}} \\ K'_{21} &= \frac{\Phi'_{-1}-\Phi''_{-1}}{\tau_{p1}\left(\dfrac{\Phi''_{+1}}{\Phi''_{-1}}\cdot\dfrac{\Phi'_{-1}+\Phi''_{-1}}{2} - \dfrac{\Phi'_{+1}+\Phi''_{+1}}{2}\right)} \end{aligned}\right\} \quad (3.7)$$

При використанні подовжених барабанних грануляторів (довжиною понад 6 м) огрудкована шихта після завершення формування гранулометричного складу проходить стадію динамічного ущільнення. На цій стадії внаслідок стиснення від ударних навантажень відбувається зміцнення гранул огрудкованого матеріалу. У цей період здійснюється масообмін між фракціями обох класів, але змінюються швидкості перенесення матеріалу з однієї фракції в іншу. Після досягнення міцністю гранул певного значення процес динамічної стабілізації завершується, і склад огрудкованого матеріалу переходить у сталий стан.

Для огрудкованої маси, умовно поділеної на два класи крупності, коефіцієнти масопереносу в процесі динамічного ущільнення можуть бути знайдені із системи, аналогічної (3.6):

$$\begin{cases} \Phi'''_{-1} = \Phi''_{-1} - (K''_{12}\dfrac{\Phi''_{-1}+\Phi'''_{-1}}{2} - K''_{21}\dfrac{\Phi''_{+1}+\Phi'''_{+1}}{2})\tau_{p2} \\ \Phi'''_{+1} = \Phi''_{+1} - (K''_{21}\dfrac{\Phi''_{+1}+\Phi'''_{+1}}{2} - K''_{12}\dfrac{\Phi''_{-1}+\Phi'''_{-1}}{2})\tau_{p2} \\ K''_{12}\Phi'''_{-1} = K''_{21}\Phi'''_{+1} \end{cases} \quad (3.8)$$

де $\Phi'''_{-1,}\Phi'''_{+1}$ - кількість дрібної та крупної фракції після завершення процесу динамічної стабілізації, відповідно, %;

K''_{ij} - коефіцієнт масопереносу від і-ї фракції до j-ї у процесі динамічної стабілізації, $с^{-1}$;

τ_{p2} – час від моменту досягнення процесом огрудкування рівноважного стану до завершення процесу динамічного ущільнення, с.

Таким чином, в результаті моделювання процесу грануляції запропонованим способом ми знаходимо коефіцієнти швидкості масопереносу матеріалу з однієї фракції до іншої стадії процесу. Маючи інформацію про гранулометричний склад шихти на вході в барабан, ми можемо прогнозувати гранулометричний склад матеріалу в будь-якому його перерізі, і, отже, шляхом вибору відповідного часу перебування матеріалу в грануляторі забезпечити заданий фракційний склад на виході з нього [37].

У зв'язку з тим, що в умовах виробництва важко визначати значення τ_{pi}, доцільно за експериментальними даними визначити значення $К_{ij}$, що характеризують проміжний стан сипкої маси в процесі її огрудкування. Для проведення експериментів довжина барабана має перевищувати 6 м; в цьому випадку маса, що комкується, не встигне перейти в стадію динамічного ущільнення, і отримані коефіцієнти характеризуватимуть процес огрудкування. Вимірюючи час перебування матеріалу в барабані, а також його початковий і кінцевий гранулометричний склад, можна за формулами (3.7) визначити коефіцієнти масопереносу від одного класу фракцій до іншого, що характеризують середню швидкість масопереносу за період огрудкування. Підставляючи отримані коефіцієнти формули

(3.6), отримуємо рівняння для визначення фракційного складу матеріалу в кожний момент часу процесу грануляції:

$$\Phi''_{+1} = a\Phi'_{+1} + b\Phi'_{-1} \tag{3.9}$$

де

$$\left.\begin{aligned} a &= \frac{2+(K'_{12}-K'_{21})\tau_{p1}}{2+(K'_{12}+K'_{21})\tau_{p1}} \\ b &= \frac{2K'_{12}\tau_{p1}}{2+(K'_{12}+K'_{21})\tau_{p1}} \end{aligned}\right\} \tag{3.10}$$

Кількість дрібної (некондиційної) фракції визначається як 100 - Φ''_{+1}.

При викладі запропонованого методу моделювання для наочності розгляду гранули сипкого матеріалу були умовно поділені на два класи крупності. Насправді фракційний склад матеріалу характеризується наявністю у ньому n числа фракцій, і у процесі грануляції відбувається взаємодія кожної з фракцій з іншими відповідно до розглянутих вище закономірностей, тобто мають місце $2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} i$ взаємодій, що можна представити за допомогою наступної схеми (рис. 3.2):

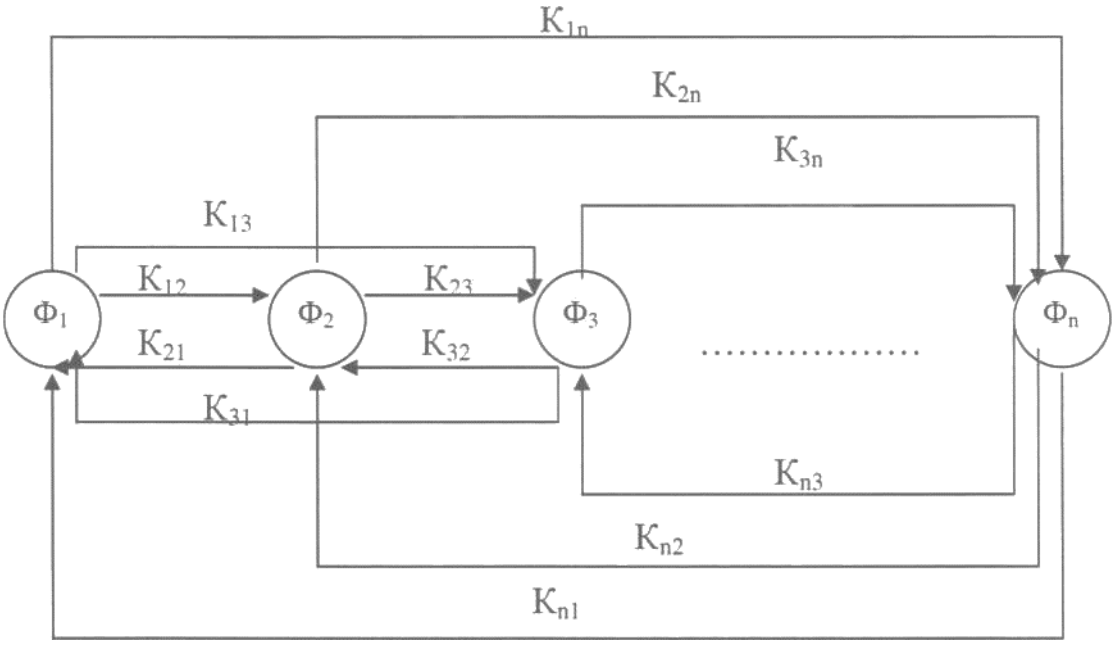


Рисунок 3.2 - Схема моделі масопереносу при грануляції

В результаті процесу огрудкування гранулометричний склад матеріалу змінюється відповідно до системи рівнянь:

$$\begin{cases} \Phi_{н1} + \Phi_{н2} + ... + \Phi_{нn} = \Phi_{н\Sigma} \\ \Phi_{к1} + \Phi_{к2} + ... + \Phi_{кn} = \Phi_{к\Sigma} \end{cases}, \tag{3.11}$$

де $\Phi_{нi}$ - вміст і-ї фракції в сипкому матеріалі до початку процесу огрудкування, %;

$\Phi_{кi}$ - вміст і-ї фракції в сипкому матеріалі після процесу огрудкування, %.

При цьому загальна кількість матеріалу залишається без зміни:

$$\Phi_{н\Sigma} = \Phi_{к\Sigma} \tag{3.12}$$

Кількість кожної фракції змінюється залежно від її ступеня її участі у процесі обгортування. Позначимо ці зміни так:

$$\left.\begin{array}{l} \Phi_{к1} - \Phi_{н1} = \Phi_{\Delta 1} \\ \Phi_{к2} - \Phi_{н2} = \Phi_{\Delta 2} \\ ..... \\ \Phi_{кn} - \Phi_{нn} = \Phi_{\Delta n} \end{array}\right\} \tag{3.13}$$

При цьому з (3.12) випливає, що

$$\sum_{i=1}^{n} \Phi_{\Delta i} = 0$$

Застосуємо для розглянутої множини n фракцій рівняння (3.1), що характеризують гранулометричний склад в момент припинення подачі зволожуючої рідини. Отримуємо таку систему:

$$\left.\begin{array}{c} \Phi_1' = \Phi_{н1} - (\Delta_{12} + \Delta_{13} + \ldots + \Delta_{1n} - \Delta_{21} - \Delta_{31} - \ldots - \Delta_{n1})\tau_{ж} \\ \Phi_2' = \Phi_{н2} - (\Delta_{21} + \Delta_{23} + \ldots + \Delta_{2n} - \Delta_{12} - \Delta_{32} - \ldots - \Delta_{n2})\tau_{ж} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \Phi_n' = \Phi_{нп} - (\Delta_{n1} + \Delta_{n2} + \ldots + \Delta_{n,n-1} - \Delta_{1n} - \Delta_{2n} - \ldots - \Delta_{n-1,n})\tau_{ж} \end{array}\right\} \quad (3.15)$$

У стані динамічної рівноваги гранулометричний склад матеріалу описуватиметься системою:

$$\left.\begin{array}{c} \Phi_1'' = \Phi_1' - (\Delta_{12ср} + \Delta_{13ср} + \ldots + \Delta_{1nсс} - \Delta_{21ср} - \Delta_{31ср} - \ldots - \Delta_{n1ср})\tau_{р1} \\ \Phi_2'' = \Phi_2' - (\Delta_{21ср} + \Delta_{23ср} + \ldots + \Delta_{2nсс} - \Delta_{12ср} - \Delta_{32ср} - \ldots - \Delta_{n2ср})\tau_{р1} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \Phi_n'' = \Phi_n' - (\Delta_{n1ср} + \Delta_{n2ср} + \ldots + \Delta_{n,n-1ср} - \Delta_{1nсс} - \Delta_{2nсс} - \ldots - \Delta_{n-1,nсс})\tau_{р1} \end{array}\right\} \quad (3.16)$$

У цьому елементарні масопотоки стабільні, тобто:

$$\left.\begin{array}{c} \Delta_{12}'' + \Delta_{13}'' + \ldots + \Delta_{1n}'' = \Delta_{21}'' + \Delta_{31}'' + \ldots + \Delta_{n1}'' \\ \Delta_{21}'' + \Delta_{23}'' + \ldots + \Delta_{2n}'' = \Delta_{12}'' + \Delta_{32}'' + \ldots + \Delta_{n2}'' \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \Delta_{n1}'' + \Delta_{n2}'' + \ldots + \Delta_{n,n-1}'' = \Delta_{1n}'' + \Delta_{2n}'' + \ldots + \Delta_{n-1,n}'' \end{array}\right\} \quad (3.17)$$

Середні швидкості масопереносу між фракціями визначаються аналогічно рівнянням (3.4):

$$
\left.
\begin{aligned}
\Delta_{12\,ср} &= K'_{12}\,\frac{\Phi'_1+\Phi''_1}{2}\\
\Delta_{13\,ср} &= K'_{13}\,\frac{\Phi'_1+\Phi''_1}{2}\\
&\cdots\cdots\ \cdots\cdots\ \cdots\cdots\ .\\
\Delta_{1n\,ссс} &= K'_{1n}\,\frac{\Phi'_1+\Phi''_1}{2}\\
\\
\Delta_{21\,ср} &= K'_{21}\,\frac{\Phi'_2+\Phi''_2}{2}\\
\Delta_{23\,ср} &= K'_{23}\,\frac{\Phi'_2+\Phi''_2}{2}\\
&\cdots\cdots\ \cdots\cdots\ \cdots\cdots\ .\\
\Delta_{2n\,ссс} &= K'_{2n}\,\frac{\Phi'_2+\Phi''_2}{2}\\
\\
&\cdots\cdots\ \cdots\cdots\ \cdots\cdots\ \ldots\\
\Delta_{n1\,ср} &= K'_{n1}\,\frac{\Phi'_n+\Phi''_n}{2}\\
\Delta_{n2\,ср} &= K'_{n2}\,\frac{\Phi'_n+\Phi''_n}{2}\\
&\cdots\cdots\ \cdots\cdots\ \cdots\cdots\ \ldots\\
\Delta_{n,n-1\,ср} &= K'_{n,n-1}\,\frac{\Phi'_n+\Phi''_n}{2}
\end{aligned}
\right\}
$$

(3.18)

Приймаючи, що K'_i залишається незмінним після завершення перехідного процесу, отримаємо:

$$\left.\begin{aligned}
&\Delta''_{12} = K'_{12}\Phi''_1 \\
&\Delta''_{13} = K'_{13}\Phi''_1 \\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
&\Delta''_{1n} = K'_{1n}\Phi''_1 \\
&\Delta''_{21} = K'_{21}\Phi''_2 \\
&\Delta''_{23} = K'_{23}\Phi''_2 \\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
&\Delta''_{2n} = K'_{2n}\Phi''_2 \\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
&\Delta''_{n1} = K'_{n1}\Phi''_n \\
&\Delta''_{n2} = K'_{n2}\Phi''_n \\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
&\Delta''_{n,n-1} = K'_{n,n-1}\Phi''_n
\end{aligned}\right\}$$

(3.19)

Щоб визначити коефіцієнти масопереносу між фракціями шихти в процесі огрудкування, необхідно підставити розгорнуті значення з (3.18) до (3.16), а з (3.19) до (3.17) і спільно вирішити рівняння (3.16) і (3.17):

$$\left.\begin{aligned}
&\Phi''_1 = \Phi'_1 - \left(K'_{12}\frac{\Phi'_1+\Phi''_1}{2} + \ldots + K'_{1n}\frac{\Phi'_1+\Phi''_1}{2} - K'_{21}\frac{\Phi'_2+\Phi''_2}{2} - \ldots - K'_{n1}\frac{\Phi'_n+\Phi''_n}{2}\right)\tau_{p1} \\
&\Phi''_2 = \Phi'_2 - \left(K'_{21}\frac{\Phi'_2+\Phi''_2}{2} + \ldots + K'_{2n}\frac{\Phi'_2+\Phi''_2}{2} - K'_{12}\frac{\Phi'_1+\Phi''_1}{2} - \ldots - K'_{n2}\frac{\Phi'_n+\Phi''_n}{2}\right)\tau_{p1} \\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
&\Phi''_n = \Phi'_n - \left(K'_{n1}\frac{\Phi'_n+\Phi''_n}{2} + \ldots + K'_{n,n-1}\frac{\Phi'_n+\Phi''_n}{2} - K'_{1n}\frac{\Phi'_1+\Phi''_1}{2} - \ldots - K'_{n-1,n}\frac{\Phi'_{n-1}+\Phi''_{n-1}}{2}\right)\tau_{p1} = \\
&K'_{12}\Phi''_1 + \ldots + K'_{1n}\Phi''_1 = K'_{21}\Phi''_2 + \ldots + K'_{n1}\Phi''_n \\
&K'_{21}\Phi''_2 + \ldots + K'_{2n}\Phi''_2 = K'_{12}\Phi''_1 + \ldots + K'_{n2}\Phi''_n \\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
&K'_{n1}\Phi''_n + \ldots + K'_{n,n-1}\Phi''_n = K'_{1n}\Phi''_1 + \ldots + K'_{n-1,n}\Phi''_{n-1}
\end{aligned}\right\}$$

(3.20)

де $\Phi'_1 - \Phi'_n$ - кількість фракцій кожного класу крупності у початковий момент часу, %

$Ф_1'' - Ф_n''$ - кількість фракцій кожного класу крупності у момент встановлення рівноважного масопереносу між ними, %;

$К_{ij}$ - коефіцієнт масопереносу від і-ї фракції до j-ї у процесі грануляції, %/с;

$\tau_{р1}$ – час грануляції, с.

Розв’язання системи рівнянь (3.20) дозволить знайти коефіцієнти масопереносу між фракціями шихти в процесі огрудкування і, отже, надасть можливість прогнозувати гранулометричний склад матеріалу у будь-який момент часу [38]. Також визначення величин коефіцієнтів масопереносу забезпечить можливість аналізу динаміки процесу впливу на неї різних обурювальних та керуючих впливів.

Так як отримана система рівнянь є недовизначеною, знайти її рішення аналітично неможливо. Тому для визначення значень коефіцієнтів масопереноса застосуємо чисельні методи розв'язання систем рівнянь. Оскільки кожен з цих методів має певну похибку і дозволяє отримати лише наближене значення результату, то доцільно отримати рішення за допомогою декількох методів і, порівнявши їх результати, зробити висновок про характер розподілу коефіцієнтів, що шукаються. Для цієї мети були використані метод квазі-Ньютона та метод Лівенберга-Маркардта [39].

Система (3.20) через недовизначеність має безліч рішень, у зв'язку з чим виникає необхідність якимось чином визначити області можливих значень коефіцієнтів масопереносу і вибрати ймовірні їх значення з цих областей. Для цього доцільно використовувати значення коефіцієнтів, отримані аналітично для матеріалу, розділеного на три класи крупності фракцій [34]:

$$К_{12}^{3} = 0{,}0217\ \%/с \qquad К_{21}^{3} = 0{,}0095\ \%/с$$

$$К_{13}^{3} = 0{,}00033\ \%/с \qquad К_{31}^{3} = 0{,}0095\ \%/с$$
$$К_{23}^{3} = 0{,}012\ \%/с \qquad К_{32}^{3} = 0{,}0269\ \%/с$$

При цьому матеріал був розділений наступним чином: фракції діаметром менше 3 мм (F_1), від 3 до 10 мм (F_2) та понад 10 мм (F_3).

Розділяючи шихту на п'ять класів крупності, виділимо такі групи фракцій: діаметром менше 3 мм (F_1), від 3 до 6 мм (F_2), від 6 до 10 мм (F_3), від 10 до 15 мм (F_4) та понад 15 мм (F_5).

У такому разі матимуть місце такі співвідношення:

$$\left.\begin{aligned} K_{12}^{3} &= K_{12} + K_{13} \\ K_{13}^{3} &= K_{14} + K_{15} \\ K_{21}^{3} &= K_{21} + K_{31} \\ K_{31}^{3} &= K_{41} + K_{51} \\ K_{23}^{3} &= K_{24} + K_{25} + K_{34} + K_{35} \\ K_{32}^{3} &= K_{42} + K_{43} + K_{52} + K_{53} \end{aligned}\right\} \qquad (3.21)$$

Припустимо, що розподіл невідомих коефіцієнтів усередині цих областей підпорядковується нормальному закону (як має найбільш широке поширення на практиці) з параметрами $m_x = \frac{a+b}{2}$ і $\sigma_x = \frac{b-a}{6}$ (згідно з правилом «трьох сигм»), де a = 0, b = $\{К_{12}^{3}, К_{13}^{3}, К_{21}^{3}, К_{31}^{3}, К_{23}^{3}, К_{32}^{3}\}$. Тоді у якості передбачуваних значень (базових точок) шуканих змінних поставимо такі, розраховані як математичні очікування m_x величин коефіцієнтів масопереносу:

$$К_{12} = К_{13} = 0{,}01085\ \%/с \qquad К_{14} = К_{15} = 0{,}000165\ \%/с$$
$$К_{21} = К_{31} = 0{,}00475\ \%/с \qquad К_{41} = К_{51} = 0{,}00475\ \%/с$$
$$К_{24} = К_{25} = К_{34} = К_{35} = 0{,}003\ \%/с$$
$$К_{42} = К_{52} = К_{43} = К_{53} = 0{,}006725\ \%/с$$
$$К_{23} = К_{32} = 0{,}003\ \%/с \qquad К_{45} = К_{54} = 0{,}006725\ \%/с$$

Функція, що описує зміну кількості певної фракції з часом, містить у знаменнику аргумент у ступені n, тобто має розриви другого роду. Положення точок розриву визначається абсолютним значенням коефіцієнтів масопереносу. Очевидно, що наявність розривів даної функції в позитивній піввісі часу позбавлене фізичного сенсу, тому при вирішенні системи (3.20) необхідно значення шуканих коефіцієнтів накладати область допустимих значень, всередині якої значення коефіцієнтів забезпечать положення точок розриву в негативній півосі часу.

У табл. 3.1 наведено результати вирішення системи (3.20) зазначеними двома методами.

Таблиця 3.1 - Значення коефіцієнтів масопереносу при грануляції матеріалу, поділеного на п'ять класів крупності фракцій (Для умов аглофабрики комбінату «Запоріжсталь»)

Коеффіцієнт	Метод квазі- Ньютона	Метод Ливенберга-Маркардта
$К_{12}$	0,0062	0,0053
$К_{13}$	0,0053	0,0044
$К_{14}$	0,0007	0,0013
$К_{15}$	0,0003	0,0012
$К_{21}$	0,0158	0,0145
$К_{23}$	0,0034	0
$К_{24}$	0	0
$К_{25}$	0	0,0037
$К_{31}$	0,0093	0,007
$К_{32}$	0,0028	0,0037
$К_{34}$	0	0,0051
$К_{35}$	0,0107	0,0014
$К_{41}$	0	0
$К_{42}$	0	0,0125
$К_{43}$	0	0,0068
$К_{45}$	0,0054	0,0061
$К_{51}$	0,0097	0,0186
$К_{52}$	0,0162	0,002
$К_{53}$	0,0137	0,0119
$К_{54}$	0	0

Отримані коефіцієнти дозволяють проаналізувати особливості масопереносу під час грануляції матеріалу. Очевидно, що дрібна фракція F_1 бере активну участь у процесі огрудкування, накочуючись на поверхню гранул решти всіх фракцій і збільшуючи їх розмір. При цьому найбільша кількість матеріалу із цієї фракції переходить у фракцію F_2, яка є кондиційною. По мірі збільшення розміру фракцій на їхню поверхню налипає дедалі менше фракції F_1. Одночасно зі збільшенням кількості фракції F_2 в результаті переходу в неї матеріалу з F_1 відбувається руйнування неміцних гранул даної фракції і спостерігається інтенсивний масоперенос F_2 в F_1. Також відбувається частковий перехід гранул фракції F_2 у фракцію F_3; масоперенос з F_2 у великі фракції F_4 та F_5 практично відсутня. Найбільший масоперенос із фракції F_3 спостерігається у F_1, також певна кількість гранул цієї фракції збільшує свій розмір, переходячи у великі фракції (більшість у F_5). Для фракції F_4 характерна слабка участь у процесі грануляції, переважно гранули цієї фракції збільшують свій розмір, переходячи в F_5. Значний масоперенос спостерігається з F_5 у F_1, також певна кількість матеріалу цієї фракції переходить в дрібніші F_2 і F_3; у фракцію F_4 масоперенос відсутній. Таким чином, в результаті взаємного тертя та зіткнення часток великих фракцій утворюється в основному дрібна фракція F_1; вона є основним джерелом матеріалу для формування кондиційної фракції F_2, але також у неї повертається велика кількість матеріалу з кондиційної фракції. Таким чином, отримані результати дають змогу пояснити наявність великої кількості дрібної фракції на виході з барабана, яким характеризується процес грануляції.

Промоделюємо процес огрудкування за рівняннями системи (3.20) для умов аглофабрики комбінату «Запоріжсталь», які характеризуються такими значеннями: радіус барабана 1,3 м та довжина 7,5 м; час грануляції у такому барабані становить 80 с. Для вирішення системи (3.20) використовується метод квазі-Ньютона. Результати моделювання наведені у таблиці 3.2 та графічно представлені на рис. 3.3.

Таблиця 3.2 – Зміна гранулометричного складу матеріалу у процесі грануляції

Час, с	Кількість фракції F_1 (<3 мм), %	Кількість фракції F_2 (3-6 мм), %	Кількість фракції F_3 (6-10 мм), %	Кількість фракції F_4 (10-15 мм),	Кількість фракції F_5 (>15 мм), %
0	74,90	7,30	11,50	5,10	1,20
8	69,8	10	12,8	5,3	2,1
16	65,5	12,3	13,9	5,4	2,9
24	61,9	14,2	14,8	5,6	3,5
32	58,8	15,8	15,6	5,7	4
40	56,2	17,3	16,3	5,8	4,5
48	23,8	18,5	16,8	5,8	5
56	51,8	19,6	17,4	5,9	5,3
64	49,9	20,6	17,8	6	5,7
72	48,3	21,5	18,3	6	6
80	46,8	22,2	18,6	6	6,2

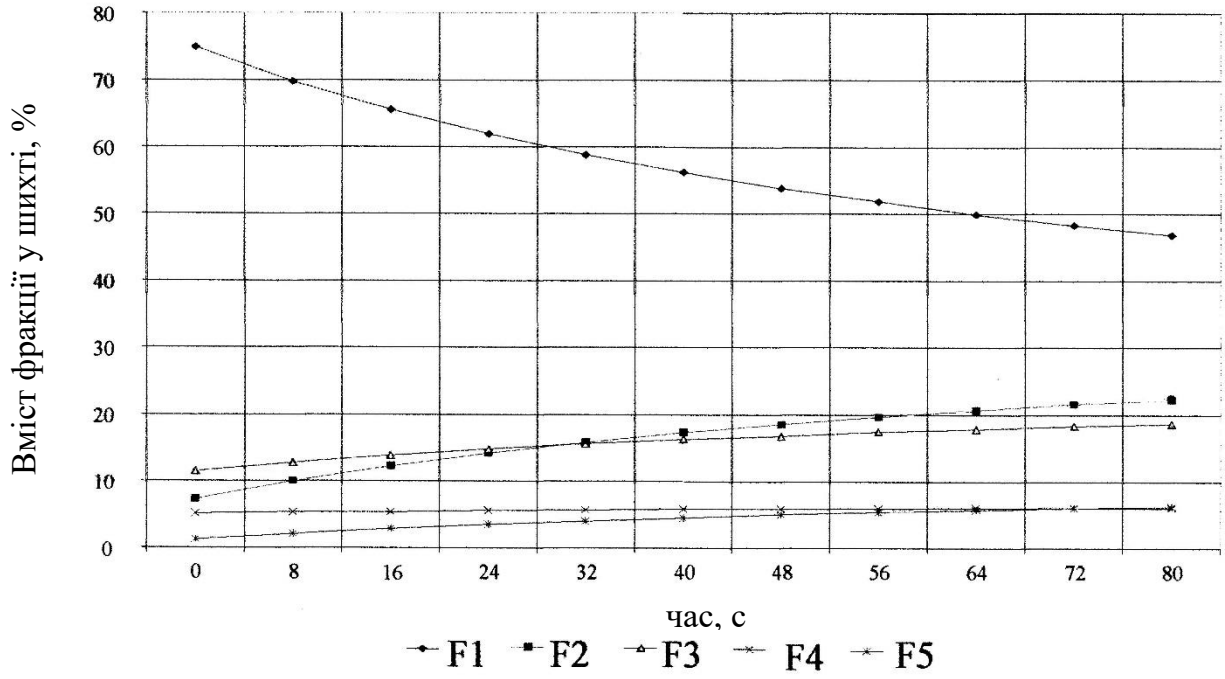


Рисунок 3.3 – Зміна гранулометричного складу матеріалу у процесі грануляції

Перевірку адекватності розробленої моделі (3.20) виконано відповідно до методики, яка дозволяє дослідити адекватність моделі експериментальним даним, отриманим в умовах пасивного експерименту,

коли розрахунок дисперсії відтворюваності неможливий через відсутність паралельних дослідів.

У умовах для перевірки адекватності доцільно скористатися емпіричною залежністю (при рівні значимості 0,05):

$$\frac{S_y^2}{S_{\text{ост}}^2} \geq 5 \ldots 10 \qquad (3.22)$$

де S_y^2 – оцінка дисперсії вихідного параметра;

$S_{\text{ост}}^2$ – залишкова дисперсія.

Оцінки дисперсії розраховуються за формулами:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N} (y_{j\text{э}} - \overline{y_\text{э}})^2}{N-1}$$

$$\overline{y_\text{э}} = \frac{\sum_{j=1}^{N} y_{j\text{э}}}{N}$$

$$S_{ост}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N} y_{j\text{э}} - \overline{y_j}}{N-k-1}$$

де N – число дослідів;

$y_{j\text{э}}$ - значення вихідного параметра в j-му досвіді;

$\overline{y_J}$- значення вихідного параметра, обчислене для j-го досвіду моделі;

k - хисло факторів в експерименті.

Якщо умова (3.22) виконується, гіпотезу про адекватність синтезованої моделі результатам пасивного експерименту слід прийняти.

Доцільно також перевірити працездатність отриманої моделі, що опосередковано дає деяке уявлення про адекватність. Аналіз працездатності включає дослідження залишків:

$$e_j = y_{j\text{э}} - \overline{y_J},\ j = 1, N$$

Якщо отримана математична модель адекватно описує процес, то залишки характеризуватимуть властивості шуму - адитивної перешкоди. Таким чином, один з основних напрямків дослідження залишків - це аналіз справедливості вихідних припущень про властивості шуму (перешкода є випадковою величиною, розподіленою за нормальним законом з математичним очікуванням рівним нулю та постійною дисперсією):

$$R^2 = 1 - \frac{(N-k+1)S^2_{\text{ост}}}{(N-1)S^2_y} \qquad (3.23)$$

Ця залежність показує, яка частка із загального розсіювання експериментальних значень вихідного параметра щодо свого середнього обумовлена модельною залежністю. Величина R^2 може змінюватися в межах від 0 до 1. Якщо розрахункове значення R^2 менше R_{min} = 0,75, то модельні залежності можна вважати непрацездатними. Якщо розрахункове значення R^2 близько до одиниці, можна говорити про хорошому якість моделювання за умови, що N досить велике проти (k+1).

Для перевірки адекватності виразів (3.20) використовуються дані пасивних експериментів, проведених на аглофабриці комбінату «Запоріжсталь».

Як видно із аналізу отриманих даних, значення показника $\frac{S^2_y}{S^2_{\text{ост}}}$ для кожної фракції перевищує критичне значення 5...10, а значення величини R^2 близько до одиниці. Таким чином, розроблена модель огрудкування сипкого матеріалу адекватна досліджуваному технологічному процесу.

3.2 Розрахунок часу активної взаємодії часток під час огрудкування

Як показують результати практичних досліджень, процес огрудкування шихти в барабанних грануляторах характеризується наявністю двох стадій: режиму, що не встановився, коли відбувається

активна взаємодія часток, що комкуються, та часток, що комкують, і обкомковуваний матеріал істотно змінює свій гранулометричний склад, і сталого режиму, коли відбувається динамічне ущільнення сформованих на першій стадії гранул. Якщо довжина барабана- огрудковувача є недостатньою для завершення зазначених стадій, то результатом процесу буде отримання частково обкомкованого матеріалу, гранули якого не мають достатньої міцності. У зв'язку з цим представляє інтерес визначення часу, необхідного для завершення неусталеного режиму обгортування, яке є достатнім для залучення в процес всього потенційно можливої кількості фракцій, що комкуються. Якщо довжина барабана буде відповідати цьому часу перебування в ньому шихти, то ступінь обкомкованості матеріалу, що вивантажується, буде максимальною для даного вхідного гранулометричного складу.

Процес грануляції триває протягом подачі до огрудковувача рідини, що зволожує. Функція, що описує зміну кількості дрібної фракції у часі, для двофракційної суміші, отримана з рівняння (3.6) має вигляд:

$$Fm(t) := \frac{\left[Fnm - \left[K12\frac{Fnm}{2} - K21\left[\frac{Fnk}{2} + \frac{\left[Fnk - \left(K21\frac{Fnk}{2} - K12\frac{Fnm}{2} \right) t \right]}{2\left(1 + K21\frac{t}{2} \right)} \right] \right] \cdot t \right]}{1 + K12\frac{t}{2} - K21 \cdot K12 \cdot t \frac{t}{4\left(1 + K21\frac{t}{2} \right)}} \tag{3.24}$$

Дана фінкція має дрібно-раціональний вигляд та дозволяє дійти висновку, що інтенсивність взаємодії фракцій навіть рпи незмінній витраті води не є постійною. Існує ділянка активної взаємодії, на якій дрібна фракція інтенсивно накочується на поверхню крупних; у цей період кількість кожної фракції суттєво змінюється. Далі інтенсивність взаємодії між фракціями значно знижується і зміна кількості матеріалу у кожній фракції відбувається монотонно (кількість дрібної фракції асимптотично

добігає нуля). Таким чином, натає умовна рівновага процесу. Якщо позначити час активної взаємодії фракцій через $\tau_{акт}$, а час знаходження шихти у барабані $\tau_{гр}$,тто умова завершення процесу огрудкування має вигляд:

$$\tau_{акт} \leq \tau_{гр}$$

Для знаходження $\tau_{акт}$ для конкретних умов грануляції необхідно визначити кінець ділянки активної взаємодії фракцій (кінець ділянки інтенсивного зменшення кількості дрібної фракції). Оскільки швидкість зміни значення функції характеризується її похідною, то кінець ділянки, що шукається, може бути знайдений як точка, в якій відношення похідної до похідної в попередній точці перевищує значення 0,7. Тобто, кількість дрібної фракції $Ф_м^{акт}$, що відповідає закінченню зони огрудкування знаходиться в точці, для якої виконується умова:

$$\frac{Ф_м'(\tau)}{Ф_м'(\tau - \Delta\tau)} \geq 0{,}7 \qquad (3.25)$$

Продиференціювавши функцію (3.24) по τ, отримуємо:

$$F_m'(\tau) = -4 \cdot \frac{-K21 \cdot F_{nk} + K12 \cdot F_{nm}}{(2 + K21 \cdot \tau + K12 \cdot \tau)^2}$$

Тоді умова (3.25) має вигляд:

$$\frac{-4 \cdot \dfrac{-K21 \cdot F_{nk} + K12 \cdot F_{nm}}{(2 + K21 \cdot \tau + K12 \cdot \tau)^2}}{-4 \cdot \dfrac{-K21 \cdot F_{nk} + K12 \cdot F_{nm}}{(2 + K21 \cdot (\tau - \Delta\tau) + K12 \cdot (\tau - \Delta\tau)^2}} - 0{,}7 \geq 0$$

У зв'язку з труднощами аналітичного диференціювання функції зміни кількості дрібної фракції для багатофракційної суміші та складністю подальшого вирішення отриманої нерівності, для визначення часу огрудкування доцільно застосувати наступний алгоритм, складений на основі методу кінцевих різниць:

1. Знаходимо значення функції $\Phi_м(\tau)$. Позначаємо його як $\Phi_м^{i-1}$.

2. Збільшуємо час задану величину $\Delta\tau$. Знаходимо $\Phi_м(\tau)$ для нового τ. Позначаємо його як $\Phi_м^i$.

3. Збільшуємо час на задану величину $\Delta\tau$. Знаходимо $\Phi_м(\tau)$ для нового τ. Позначаємо його як $\Phi_м^{i+1}$

4. Визначаємо $\Delta = \frac{\Phi_м^{i+1} - \Phi_м^i}{\Phi_м^i - \Phi_м^{i-1}}$. Якщо Δ <0,7, то привласнюємо $\Phi_м^{i-1}$ значення $\Phi_м^i$ та переходимо до кроку 2; інакше поточне значення τ приймається як $\tau_{акт}$.

Кількість дрібної фракції в момент часу $\tau_{акт}$ є мінімально можливим для умов грануляції. За достатньої довжини барабана, коли виконується умова $\tau_{акт} < \tau_{гр}$, на виході буде вивантажено саме цю кількість дрібної фракції. Подальше збільшення часу перебування матеріалу в грануляторі не призведе до зростання кількості кондиційної фракції та зменшення кількості дрібної, а лише до зміцнення сформованих гранул.

Застосуємо розроблений алгоритм для розрахунку часу активної взаємодії часток при обгортуванні в умовах аглофабрики комбінату «Запоріжсталь» (довжина барабана 7,5 м, радіус 1,3 м, кут нахилу 2,5 град і швидкість обертання 8 об/хв). Час знаходження шихти у такому барабані становить 80 с (визначено в результаті експериментальних досліджень). Вихідний гранулометричний склад приймемо наступний [37]: <3 мм – 74,9 %; 3-6 мм – 7,3 %; 6-10 мм – 11,5 %; 10-15 мм – 5,1 %; >15 мм – 1,2 %. Промоделювавши зміну гранулометричного складу шихти в ході огрудкування, отримуємо результат, показаний на рис. 3.4.

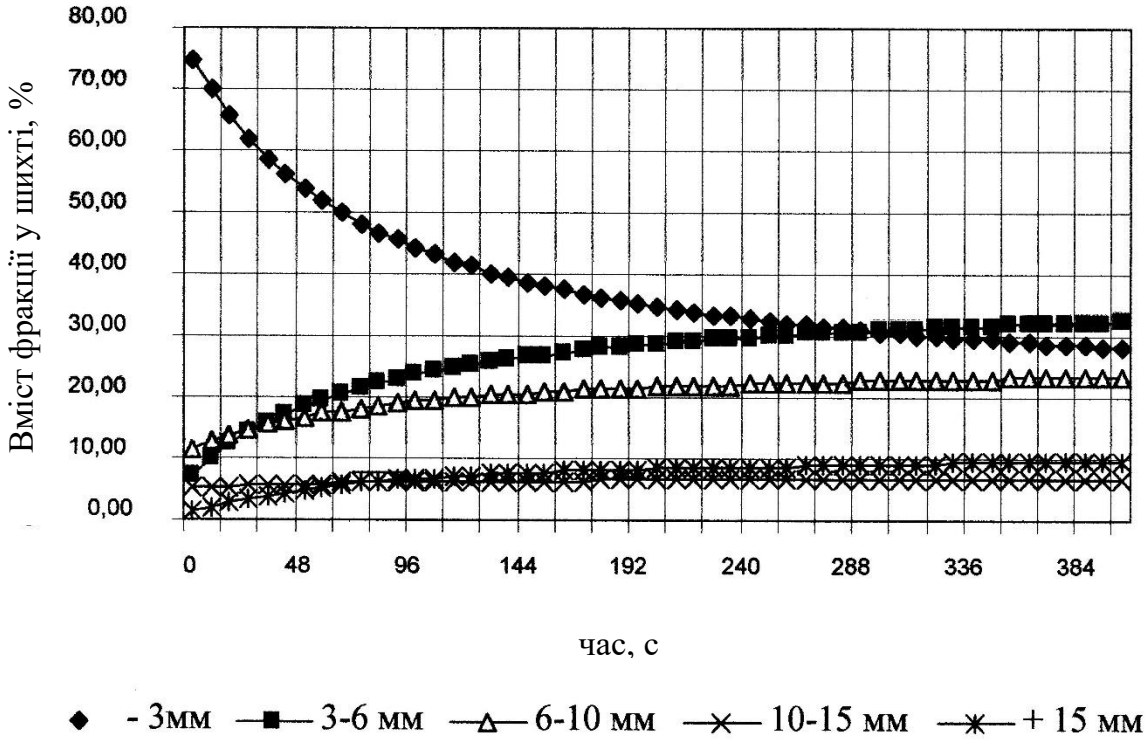


Рисунок 3.4 – Процес огрудкування у довгому барабані

Як видно із рис. 3.4, час активної стадії огрудкування при даних виробничих умовах становить близько 130 с, при цьому кількість фракції <3 мм на виході становить 40 %. Таким чином, резервом для підвищення якості огрудкування на аглофабриці комбінату «Запоріжсталь» є збільшення довжини барабанів- огрудковувачів до 12,2 м.

3.3 Дослідження впливу коливань вихідного фракційного складу шихти на динаміку процесу огрудкування

Відомо, що на інтенсивність протікання процесу грануляції і, отже, його результат, впливають властивості сипкого матеріалу, що надходить - вологість, фракційний і хімічний склад [5]. Оскільки зміни хімічного складу шихти є довготривалими, то в даній ситуації доцільно проводити переналаштування моделі для нових властивостей шихти, що огрудковується. Фракційний склад матеріалу, що подається на огрудкування, значною мірою залежить від умов проходження через

приймальний бункер спікального відділення, насамперед від висоти стовпа матеріалу в бункері [7]. Оскільки в даний час на виробництвах робота ділянки приймальних бункерів характеризується значною нестабільністю, то коливання фракційного складу шихти, що подається на огрудкування, є основним обурюючим впливом на цей процес; у зв'язку із чим актуальним завданням є дослідження впливу цього фактора на динаміку процесу грануляції.

Відповідно до розробленої моделі огрудкування, ефективність цього процесу визначається значеннями коефіцієнтів масопереносу між фракціями сипкого матеріалу. Тому слід досліджувати вплив зазначеного обурення на величину даних коефіцієнтів. З цією метою проведено обробку експериментальних даних, отриманих на агломераційних фабриках вітчизняних та зарубіжних металургійних заводів. У табл. 2.3 наведено дані про вологість та фракційний склад матеріалу до і після грануляції для металургійного заводу Німеччини. Для зручності подальших розрахунків матеріал поділено на п'ять класів крупності: F_1 <3 мм, F_2 3-6 мм, F_3 6-10 мм, F_4 10-15 мм, F_5> 15 мм. Час окамкування в даному барабані становить 120 с, швидкість обертання 6 об/хв.

Таблиця 3.3 – Експериментальні дані про вологість та фракційний склад агломераційної шихти металургійного заводу

№ досліда	Грансклад на вході, мм					Грансклад на виході, мм					W,%
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	
1	57,70	25,95	10,85	3,00	2,50	39,70	37,40	15,00	4,40	3,50	7,90
2	60,10	25,00	7,80	4,10	3,00	41,70	36,00	14,00	5,00	3,50	8,70
3	60,30	25,00	9,20	3,00	2,50	39,40	39,90	14,20	4,00	2,60	7,70
4	66,80	22,00	7,40	2,30	1,50	38,80	37,55	16,35	4,00	3,20	8,60

З метою визначення коефіцієнтів масопереносу матеріал, що розглядається, був спочатку розділений на два класи крупності фракцій і шляхом аналітичного рішення системи (3.6) отримані значення сумарних коефіцієнтів перенесення між дрібною і великою фракціями. Ці значення є

область допустимих значень щодо шуканих коефіцієнтів. Далі за допомогою методу квазі-Ньютона одержано рішення системи (3.20) для п'ятифракційної суміші. Результати обчислень наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 Коефіцієнти масопереносу між фракціями шихти у процесі грануляції

Коэфіцієнти, %/с	№ досліду			
	1	2	3	4
$К_{12}$	0,0065	0,00625	0,0067	0,0065
$К_{13}$	0,0052	0,0049	0,0054	0,0053
$К_{14}$	0,0005	0,00048	0,00028	0,0004
$К_{15}$	0,0001	0,0001	0,00002	0,00015
$К_{21}$	0,0095	0,0099	0,0094	0,0097
$К_{23}$	0,002	0,002	0,00195	0,00205
$К_{24}$	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
$К_{25}$	0,0055	0,0055	0,0051	0,0051
$К_{31}$	0,0099	0,0111	0,0097	0,0093
$К_{32}$	0,0125	0,0125	0,0198	0,109
$К_{34}$	0	0	0,0001	0,0001
$К_{35}$	0,105	0,0115	0,0115	0,108
$К_{41}$	0,0002	0,0002	0,00035	0,00025
$К_{42}$	0,0009	0,0009	0,0009	0,00095
$К_{43}$	0,0025	0,0026	0,0026	0,0092
$К_{45}$	0,00169	0,00169	0,0006	0,0006
$К_{51}$	0,00596	0,00596	0,00902	0,00872
$К_{52}$	0,0521	0,0521	0,0691	0,0691
$К_{53}$	0,0445	0,0345	0,0385	0,0385
$К_{54}$	0,0002	0,0002	0,00089	0,00089

Оскільки максимальним вмістом в шихті, що завантажується, характеризується дрібна фракція F_1 і її кількість схильна до найбільш значних коливань, то найбільший інтерес представляє дослідження залежності коефіцієнтів масопереносу від кількості даної фракції. Оскільки

масоперенос між усіма фракціями всередині сипкої маси детермінується кількістю кожної фракції вихідної суміші, доцільно розглянути зміну найбільш вагомих коефіцієнтів, які надають вирішальний вплив на результат процесу, тобто, простежити зміну перенесення з фракції F_1 до F_2 і F_3 і навпаки. Шукана залежність показана на рис. 3.5.

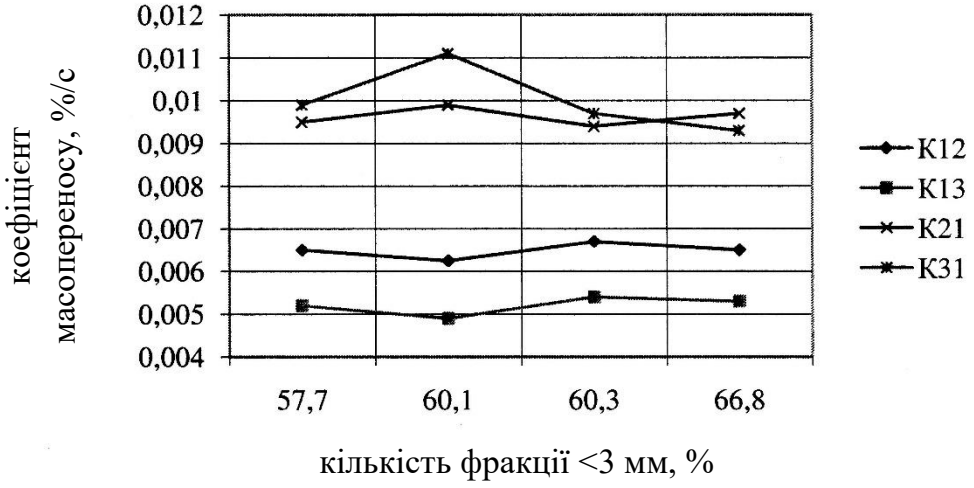


Рисунок 3.5 – Вплив кількості фракції <3 мм у вихідній шихті на основні кефіцієнти масопереносу

Аналіз отриманих результатів дещо ускладнюється відмінністю вологості вихідного матеріалу, проте при попарному порівнянні точок з приблизно однаковою вологістю стає очевидним, щ при збільшенні кількості дрібної фракції коефіцієнти $К_{12}$ і $К_{13}$ зростають (відповідно з 0,0065 до 0,0067 і з 0,0052 до 0,0054; з 0,00625 до 0,0065 і з 0,0049 до 0,0053), а $К_{21}$ і $К_{31}$ зменшуються (відповідно з 0,0095 до 0,0094 і з 0,0099 до 0,0097); з 0,0099 до 0,0097 і з 0,00111 до 0,0093). Отримані результати дозволяють припустити, що оптимальне значення вологості шихти для цих умов грануляції знаходиться на рівні 8%; Таким чином, для даної шихти збільшення кількості фракції <3 мм з 58 до 67% є інтенсифікуючим фактором.

Дані про фракційний склад шихти до та після огрудкування для комбінату «Запоріжсталь» наведено в табл. 3.5. У ході експерименту відбиралися проби п'яти класів крупності, для зручності розрахунку вони

наведені до таких значень: F_1 <3 мм, F_2 3-6 мм, F_3 6-10 мм, F_4 10-15 мм, F_5 >15 мм. Вологість шихти у всіх дослідах підтримувалася постійною на рівні 8,5 %.

Таблиця 3.5 - Експериментальні дані про фракційний склад агломераційної шихти комбінату «Запоріжсталь»

№ досліда	Грансклад на вході, мм					Грансклад на виході, мм					W,%
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	
1	61,5	17,0	12,0	5,5	4,0	38,1	27,1	16,9	8,7	8.8	61,5
2	62,8	16,8	10,9	5,4	4,1	38,3	26,7	16,7	8,7	9,0	62,8
3	63,7	16,3	11,2	4,9	3,8	34,3	28,5	18,0	9,3	9,3	63,7
4	64,6	16,1	11,1	4,7	3,5	30,4	29,6	19,4	9,9	10,1	64,6
5	74,9	7,3	11,5	5,1	1,2	46,8	22,3	18,6	6,1	6,2	74,9

Результати розрахунку коефіцієнтів масопереносу для даних умов грануляції представлені у табл. 3.6.

Таблиця 3.6 - Коефіцієнти масопереносу між фракціями шихти у процесі грануляції для умов комбінату «Запоріжсталь»

Коэфіцієнти, %/с	№ досліду				
	1	2	3	4	5
$К_{12}$	0,0072	0.0074	0,0079	0,0083	0,0062
$К_{13}$	0,0062	0,0064	0,0072	0,0076	0,0053
$К_{14}$	0,0012	0,0015	0,002	0,0025	0,0007
$К_{15}$	0,0006	0,0009	0,0012	0,0017	0,0003
$К_{21}$	0,0145	0,0148	0,015	0,0152	0,0158
$К_{23}$	0,003	0,0029	0,003	0,003	0,0034
$К_{24}$	0,0002	0,0002	0	0	0
$К_{25}$	0,0055	0,0001	0,0001	0,0001	0
$К_{31}$	0,0094	0,0093	0,0089	0,0084	0,0093
$К_{32}$	0,0105	0,0031	0,0038	0,0039	0,0028
$К_{34}$	0	0,0006	0,0006	0,0006	0
$К_{35}$	0,0105	0,0165	0,0165	0,0165	0,0107
$К_{41}$	0	0,0003	0,0003	0,0003	0
$К_{42}$	0,0004	0	0,0003	0,0004	0

$К_{43}$	0,0009	0	0	0	0
$К_{45}$	0,0017	0,0061	0,0061	0,0073	0,0054
$К_{51}$	0,0024	0,0092	0,0092	0,0078	0,0097
$К_{52}$	0,0191	0,0151	0,017	0,0193	0,0162
$К_{53}$	0,0185	0,0144	0,0155	0,0178	0,0137
$К_{54}$	0,0002	0	0	0	0

Вплив кількості фракції <3 мм на основні коефіцієнти масопереносу показано на рис. 3.6

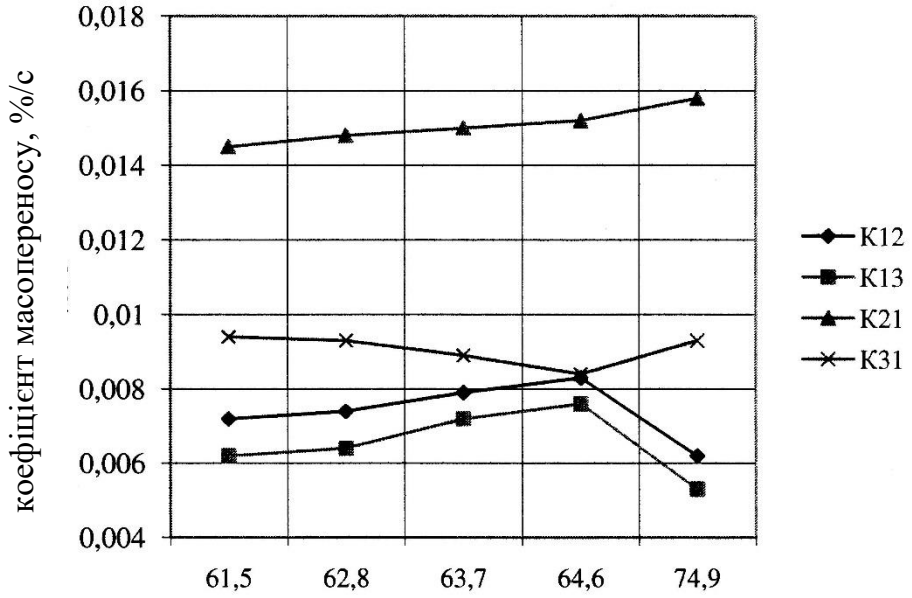


Рисунок 3.6 - Вплив кількості фракції <3 мм у вихідній шихті на основні коефіцієнти масопереносу (комбінат Запоріжсталь)

Отримані результати показують, що для даних умов грануляції збільшення кількості дрібної фракції до певного значення (з 61 до 65%) викликає зростання коефіцієнтів $К_{12}$ (з 0,0072 до 0,0083), $К_{13}$ (з 0,0062 до 0,0076)) та $К_{21}$ (з 0,0145 до 0,0152), а також зменшення коефіцієнта $К_{31}$ (з 0,0094 до 0,0084). Відмінності у динаміці зміни коефіцієнтів (зростання коефіцієнта $К_{21}$) можна пояснити різними умовами протікання процесу. Очевидно, в даному випадку збільшення інтенсивності переходу фракції F_1 F_2 призводить до збільшення інтенсивності зустрічно спрямованого

процесу руйнування фракції F_2. Також отримані результати дозволяють зробити висновок про наявність критичного значення кількості дрібної фракції $Ф_{1кр}$, при перевищенні якого знижується ефективність процесу (зменшуються значення коефіцієнтів $К_{12}$ і $К_{13}$).

3.4 Дослідження ефективності застосування витрати зволожуючої рідини, кута нахилу та швидкості обертання огрудковувача в якості керуючих впливів на процес грануляції

На формування структур огрудкованого матеріалу значний вплив надає його вологість, яка визначається вихідною вологістю матеріалу і кількістю зволожуючої рідини, що подається на огрудкування, а також характеристики роботи огрудковувача перш за все, кут його нахилу і швидкість обертання [40]. Зміна вологості впливає на грудкуючі властивості гранул; збільшення числа оборотів огрудковувача підвищує інтенсивність взаємодії часток між собою, таким чином впливаючи на величину масопереносу між ними; зміна кута нахилу барабана спричиняє зміну швидкостей руху різних фракцій по агрегату і, отже, зміна коефіцієнтів масопереносу між цими фракціями.

Оскільки вплив перерахованих технологічних параметрів на процес огрудкування не розкрито в явному вигляді в моделі процесу, представленої системою (3.20), необхідно отримати кількісний опис їх впливу на коефіцієнти масопереносу між фракціями, які, згідно розробленої моделі, визначають динаміку аналізованого процесу. З цією метою було виконано регресійний аналіз експериментальних даних про досліджуваний вплив для огрудковувачів аглофабрики комбінату «Запоріжсталь» [40, 41], в результаті якого були отримані залежності коефіцієнтів масопереносу від кута нахилу гранулятора, числа його оборотів та вологості матеріалу для двофракційної суміші:

$$К_{1\Sigma} = -0{,}13537 - 1{,}286\cdot10^{-3}\cdot\alpha + 5{,}986\cdot10^{-4}\cdot n + 0{,}03344\cdot W - 1{,}909\cdot10^{-3}W^2;$$
$$К_{2\Sigma} = -0{,}04743 - 5{,}45\cdot10^{-4}\cdot\alpha + 2{,}434\cdot10^{-4}\cdot n + 0{,}01279\cdot W - 3{,}748\cdot10^{-4}W^2; \quad (3.26)$$

Середньоквадратичні похибки розрахунку складають: $\Delta К_{1\Sigma ср} = 0{,}0023$ %/с; $\Delta К_{2\Sigma ср} = 0{,}0038$ %/с.

Отримані залежності є справедливими для таких інтервалів керуючих впливів:

$$7{,}5 \le W \le 9{,}5 \text{ (\%)}$$
$$0 \le \alpha \le 3 \text{ (град)}$$
$$6 \le n \le 10 \text{ (об/хв)}$$

Коефіцієнт $К_{1\Sigma}$ характеризує масоперенос з дрібної фракції -3 мм у всі інші фракції; $К_{2\Sigma}$ - масоперенос з великих фракцій у дрібну. Значення даних коефіцієнтів накладають обмеження на область допустимих значень шуканих коефіцієнтів масопереносу між фракціями багатофракційної суміші:

$$K_{1\Sigma} = K_{12} + K_{13} + K_{14} + K_{15}$$
$$K_{2\Sigma} = K_{21} + K_{31} + K_{41} + K_{51}$$

Для завдання передбачуваних значень змінних, що шукаються, доцільно скористатися тенденцією їх розподілу, яка може бути отримана за допомогою аналізу значень коефіцієнтів масопереносу, розрахованих за методом квазі-Ньютона для матеріалу вологістю 8,5%.

Для дослідження впливу вологості матеріалу, кута нахилу та швидкості обертання гранулятора на коефіцієнти масопереносу між фракціями шихти проведено обчислювальні експерименти, в яких факторами виступають перелічені керуючі дії, а відгуками є:

- сумарний коефіцієнт масопереносу $К_{1\Sigma}$;

- сумарний коефіцієнт масопереносу $К_{2\Sigma}$.

Рівні варіювання факторів:

- X_1 (вологість): 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5%;

- X_2 (кут нахилу): 0; 1; 2; 3 град;

- X_3 (швидкість обертання): 6; 8; 10 об/хв.

Оскільки кількість факторів та рівнів їх варіювання невелика, має сенс проведення повних факторних експериментів, кількість обчислювальних дослідів у яких визначимо за допомогою формули:

$$N = l_1 \cdot l_2 \ldots \cdot l_k$$

де l_i - кількість рівнів, які може приймати і-й фактор;

k – кількість факторів.

Таким чином, N = 5 * 4 * 3 = 60.

Як нульові рівні факторів виберемо наступні:

$$X_{01} = 8,5\%;\ X_{02} = 1,5 \text{ град};\ X_{03} = 8 \text{ об/хв}.$$

Тоді кодовані значення факторів, розраховані відповідно до формули:

$$X_i = \frac{C_i - C_{0i}}{\varepsilon}$$

де C_i - поточне значення фактора,

C_{0i} - значення фактора на нульовому рівні,

ε - інтервал варіювання,

мають вигляд:

$$X_{11} = -1;\ X_{12} = -0,5;\ X_{13} = 0;\ X_{14} = +0,5;\ X_{15} = +1;$$

$$X_{21} = -1;\ X_{22} = -0{,}33;\ X_{23} = +0{,}33;\ X_{24} = +1;$$

$$X_{31}=-1;\ X_{32} = 0;\ X_{33} = +1$$

Вихідний гранулометричний склад шихти у всіх дослідах був постійним і характеризувався такими значеннями: кількість фракції -3 мм – 74,9 %; 3-6 мм – 7,3 %; 6-10 мм – 11,5 %; 10-15 мм – 5,1 %; +15 мм – 1,2%. Значення сумарних коефіцієнтів масопереносу та K_{21} розраховувалися за формулами (3.36). Матриці планування та результати експериментів наведені в таблицях А.1 та А.2 (дод. А).

В результаті експериментів отримано дані про вплив вектора управління на коефіцієнти масопереносу при грануляції для короткого та довгого барабанів. Вплив вологості шихти, кута нахилу та швидкості обертання огрудковувача на найбільш вагомі коефіцієнти моделі показано на рис. 3.7.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про вплив кожного фактора на комкуючі властивості фракцій матеріалу.

При фіксованих значеннях кута нахилу огрудковувача та його швидкості обертання (а = 2 град; і = 8 об/хв) вплив зміни вологості має такі характеристики. Залежність коефіцієнтів масопереносу з дрібної фракції <3 мм у фракції кондиційного розміру 3-6 мм і 6-10 мм має екстремальний характер. При цьому зміна вмісту вологи в шихті з 7,5 до 9% призводить до збільшення переносу з дрібної фракції у фракцію 3-6 мм на 0,00123%/с; а у фракцію 6-10 мм – на 0,00145 %/с. Подальше збільшення вмісту вологи до 9,5% дає зменшення зазначених коефіцієнтів відповідно на 0,0004%/с та 0,00047%/с. Це може бути пояснено тим, що відсутність достатньої кількості вологи її не вистачає для повного змочування шихти, утворення капілярних плівок між часточками і стягування їх у грудочки. Надмірна кількість вологи зменшує здатність дрібних часток до агрегації, т.к. їх порожнечі вже заповнені водою і сили, що стягують, послаблюються. Перенесення з дрібної фракції у великі 10-15 мм і >15 мм також має екстремум, який пояснюється аналогічно, однак абсолютне значення

коефіцієнтів K_{14} та K_{15} змінюється незначно внаслідок низького вмісту даних фракцій у шихті та слабкого масообміну з ними.

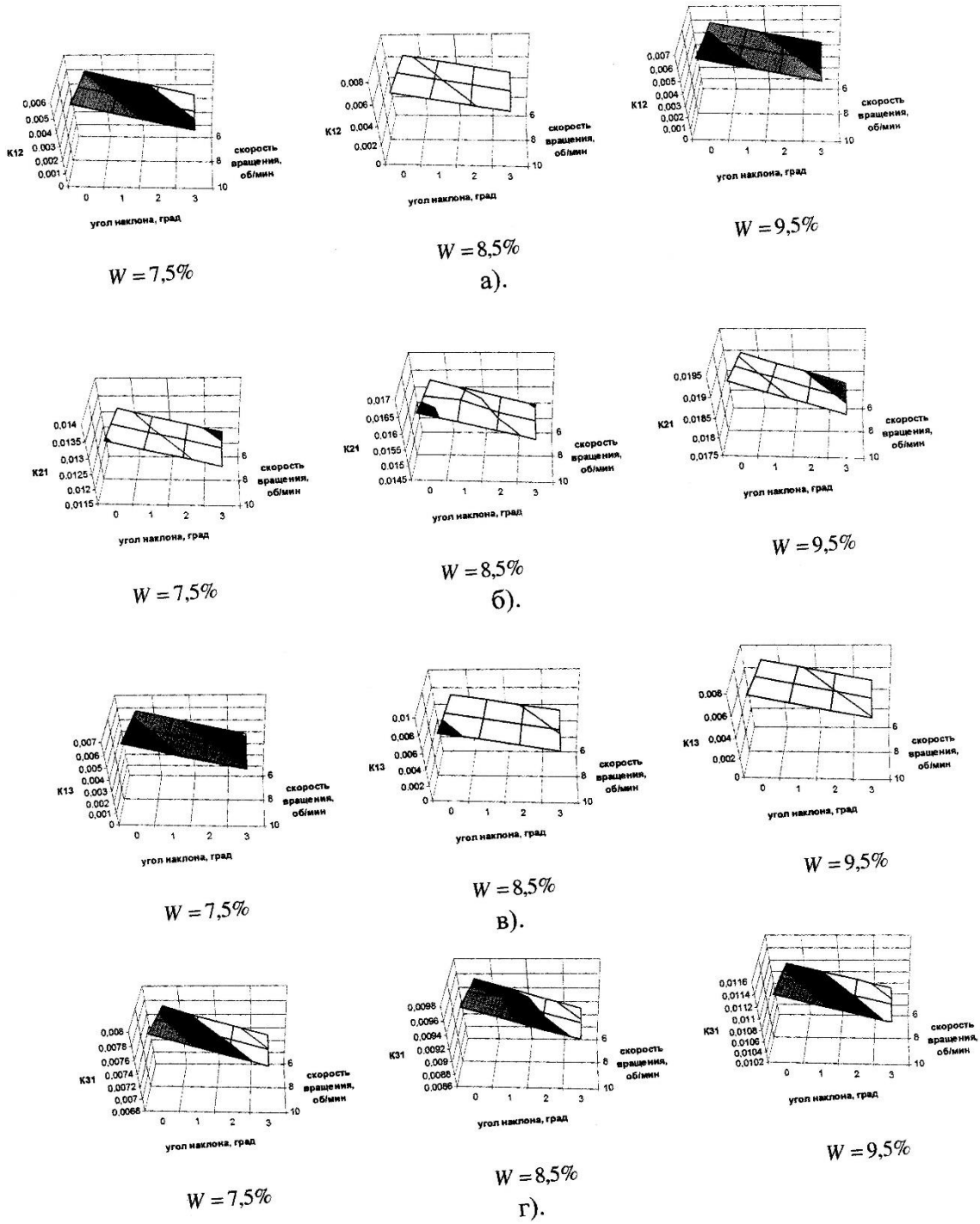


Рисунок 3.7 – Вплив вологості шихти, кута нахилу та швидкості обертання огрудковувача на коефіцієнти масопереносу між фракціями <3 мм та 3-6 мм (а), 3-6 мм та 3 мм (б), <3 мм та 6-10 мм (в), 6-10 мм та <3 мм (г)

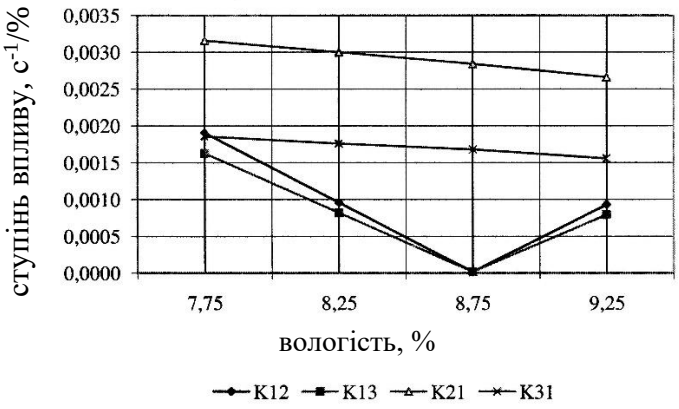
Зворотнє перенесення матеріалу з великих фракцій до дрібних зростає зі збільшенням вологості матеріалу, т.к. гранули розпушуються, стають менш міцними і руйнуються під впливом динамічних навантажень. З цієї ж причини зі збільшенням вмісту вологи зростає перенесення з великої фракції >15 мм у більш дрібні, а також перенесення з фракції 6-10 мм у фракцію 3-6 мм. При збільшенні вологості також спостерігається зростання масопереносу з фракції 3-6 мм у фракції 6-10 і +15 мм, а також з 10-15 мм >15мм. Це може пояснюватися тим, що з часток даних розмірів ще досягнуто оптимальне вміст вологи і з її збільшенням ще триває зростання їх комкуемости, оскільки оптимальне зміст вологи для грануляції часток пропорційно їх розміру. Таким чином, в результаті збільшення вологості матеріалу з 7,5% до 8,5% вміст дрібної фракції <3 мм в обкомкованому матеріалі для короткого барабана зменшується на 4,2% (для довгого на 4,3%), а вміст кондиційної фракції 3-6 мм зростає на 1,3 % (для довгого 1 %); подальше збільшення вологості до 9,5% призводить до збільшення вмісту дрібної фракції для короткого барабана на 5,1% (для довгого на 6,5%) та зменшення кондиційної на 1,6% (для довгого на 1,1%).

Вплив зміни кута нахилу огрудковувача при незмінній швидкості обертання та вологості шихти (W = 8,5%; n = 8 об/хв) на масоперенос між фракціями має лінійний характер. Збільшення кута нахилу від 0° до 3 град веде до зменшення абсолютних значень всіх коефіцієнтів моделі (масоперенос з дрібної фракції у фракцію 3-6 мм зменшується на 0,00163%/с, фракцію 6-10 мм - на 0,00191%/ с; зменшення зворотного перенесення становить відповідно 0,00074 %/с та 0,00043 %/с). Дана тенденція коефіцієнтів масопереносу до зменшення може бути пояснена тим, що при збільшенні кута нахилу огрудковувача різниця між швидкостями руху окремих фракцій зростає (великі рухаються швидше, дрібніші повільніше), отже, зменшується час взаємодії фракцій між собою і менша кількість матеріалу переходить з однієї фракції в іншу. Вказане збільшення кута нахилу для короткого барабана дає збільшення кількості

дрібної фракції 8,4% (для довгого на 3,8%) та зменшення кількості кондиційної фракції 3-6 мм відповідно на 3,3% та 3,8%.

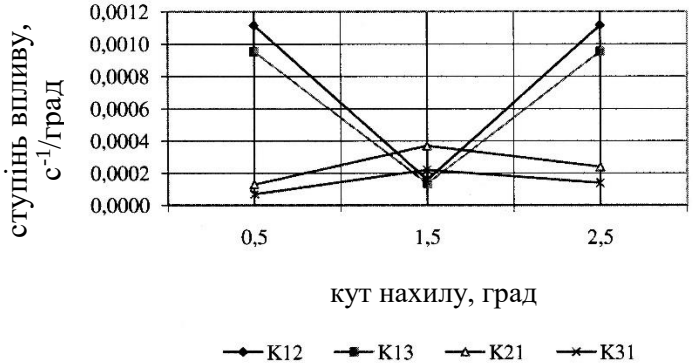
Зміна швидкості обертання огрудковувача при незмінному куті нахилу та вологості шихти (W = 8,5 %; α = 2 град) також має лінійний характер впливу на коефіцієнти моделі. Збільшення швидкості обертання з 6 об/хв до 10 об/хв призводить до збільшення масопереносу з дрібної фракції у фракцію 6-10 мм на 0,00102%/с, а у фракцію 6-10 мм на 0,00119%/с; також збільшується зворотний перенесення: відповідно на 0,00045%/с та 0,00026%/с. Збільшення значень коефіцієнтів моделі при збільшенні швидкості обертання барабана може бути пояснено інтенсивнішим змішуванням матеріалу і, відповідно, більш глибокою взаємодією між його фракціями. Збільшення кута нахилу з 6 об/хв до 10 об/хв дл якороткого барабана зменшує вихід дрібної фракції на 5,3 % (для довгого барабана 6,1%) та збільшує кількість кондиційної відповідно на 2,1 % та 2,5 %.

Проведений експеримент також дозволяє зробити кількісну оцінку ступеня впливу вологості шихти, кута нахилу огрудковувача та швидкості його обертання на коефіцієнти моделі. Для даної оцінки використовувався параметр $\frac{\Delta K_{ij}}{\Delta U}$ -де ΔK_{ij} - зміна коефіцієнта масопереносу з і-ої фракції в j-ту при одиничній зміні впливу керуючого ΔU. Ступінь впливу кожного з керуючих впливів на коефіцієнти масопереносу, які мають найбільше значення для процесу окрудування, показано на рис. 3.8.



$\alpha = 2$ °; $n =$ **8 об/хв**

а).



$w = 8{,}5$ %; $n =$ **8 об/хв**

б).



$w = 8{,}5$ %; $\alpha = 2$ °

в).

Рисунок 3.8 – Ступінь впливу вологості шихти (а), кута нахилу огрудковувача (б) та швидкості його обертання (в) на коефіцієнти моделі

Як видно, найбільший вплив на коефіцієнти масопереносу з дрібної фракції - 3 мм у фракції 3-6 мм і 6-10 мм (порядку 0,001-0,002) має зміна вмісту вологи в матеріалі в діапазоні 7,5-8,5 %, при подальшому збільшення вологості її вплив на ці коефіцієнти знижується. Зміна кута нахилу огрудковувача здійснює на коефіцієнти K_{12} і K_{13} вплив порядку

0,0006, а зміна швидкості обертання - 0,0003. Зміна вологості також надає максимальний вплив на коефіцієнти перенесення з фракцій 3-6 мм і 6-10 мм у фракцію <3 мм (порядку 0,002-0,003), причому цей вплив монотонно знижується зі збільшенням вологості. Зміна кута нахилу має найбільший вплив на коефіцієнти $К_{21}$ і $К_{31}$ в діапазоні 1-2 град (порядку 0,0002-0,0003), швидкість обертання барабана має найменший вплив на ці коефіцієнти (порядку 0,0001), який практично постійний у всьому діапазоні зміни. Таким чином, ступінь впливу зміни вологості на основні коефіцієнти моделі на порядок вищий за ступінь впливу інших двох керуючих впливів. Однак при стабілізації кількості рідини, що подається в гранулятор, слід брати до уваги наявність чіткого екстремуму залежності міцнісних характеристик агломерату від вмісту вологи в підготовленому до спікання матеріалі [41]. Тому при управлінні процесом обгортування доцільно стабілізувати вміст вологи в шихті на рівні, оптимальному для процесу спікання (який визначається експериментально для кожної конкретної шихти), а згладжування впливу збурень забезпечувати альтернативними керуючими впливами (зміною кута нахилу барабана та швидкості його обертання).

Очевидно, що повну компенсацію коливань фракційного складу шихти в діапазоні 60-85 % за кількістю дрібної фракції розглянуті керуючі впливу забезпечити не можуть. Оскільки найбільший вихід гранул кондиційного розміру спостерігається при вмісті дрібної фракції у вихідній шихті близько 70%, то при зміні кількості доцільно збільшувати швидкість обертання барабана і зменшувати кут його нахилу. Зміна зазначених параметрів до 0° та 10 об/хв дозволить згладити коливання виходу кондиційної фракції при зниженні кількості дрібниці у вихідній шихті до 63% та збільшенні до 73 %. Значення коефіцієнтів масопереносу для даних умов грануляції отримані шляхом додавання відповідних коефіцієнтів при зміні величини керуючих впливів у зазначеному діапазоні. У таблицях 3.7 та 3.8 наведено фракційні склади огрудкованої шихти, одержані при

відхиленні вмісту дрібної фракції у вихідній шихті у зазначених межах без застосування керуючих впливів та в їх присутності.

Таблиця 3.7 - Моделювання зміни фракційного складу огрудкованої шихти при зміні кута нахилу та швидкості обертання короткого барабана

№ досліду	Гранскладна на вході, %				
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
1	69,0	12,0	9,5	5,6	3,9
2	63,0	14,5	11,3	6,4	4,9
3	72,0	10,8	8,6	5,2	3,4
	Гранскладна виході (без компенсації коливань F_1), %				
1	15,0	36,0	25,3	12,7	11,0
2	28,0	30,3	21,2	12,5	8,1
3	29,6	30,6	24,3	8,5	7,0
	Гранскладна виході (з компенсацією коливань F_1), %				
2	19,4	35,1	21,4	13,0	11,2
3	22,5	35,4	28,3	6,0	7,7

Таблиця 3.8 - Моделювання зміни фракційного складу огрудкованої шихти при зміні кута нахилу та швидкості обертання довгого барабана

№ досліду	Гранскладна вході, %				
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
1	69,0	12,0	9,5	5,6	3,9
2	63,0	14,5	11,3	6,4	4,9
3	72,0	10,8	8,6	5,2	3,4
	Гранскладна виході (без компенсації коливань F_1), %				
1	15,0	36,0	25,3	12,7	11,0
2	28,0	30,3	21,2	12,5	8,1
3	29,6	30,6	24,3	8,5	7,0
	Гранскладна виході (з компенсацією коливань F_1), %				
2	19,4	35,1	21,4	13,0	11,2
3	22,5	35,4	28,3	6,0	7,7

Як видно з аналізу отриманих результатів, зміна швидкості обертання та кута нахилу огрудковувача для компенсації впливу коливань вихідного фракційного складу дозволяють з точністю до 1% відновити

вихід фракції 3-6 мм за незначного збільшення кількості дрібниці на виході. Зміна вмісту фракції <3 мм у вихідній шихті в діапазоні ширшому, ніж 63-73%, не може бути компенсована за допомогою застосування даних керуючих впливів (для умов аглофабрики комбінату «Запоріжсталь»).

3.5 Висновки до розділу 3

1. Отримано математичну модель огрудкування агломераційної шихти у вигляді залежностей вмісту фракцій багатофракційної суміші від коефіцієнтів масопереносу, що визначаються вихідним гранулометричним складом і вологістю шихти, а також швидкістю обертання і кутом нахилу огрудковувача, що дозволяє прогнозувати фракційний склад шихти на виході допомогою обчислювальних експериментів, а також кількісний вплив зазначених технологічних параметрів на динаміку процесу.

2. Синтезований на основі пропонованої моделі огрудкування алгоритм визначення часу активної взаємодії часток дозволяє розрахувати час, необхідний для завершення активної стадії процесу огрудкування, в якій швидкість накочування гранул значно перевищує швидкість їх руйнування, і визначити найбільшу кількість фракцій кондиційного розміру (3-10 мм) , яке можна отримати в даних технологічних умовах. Для стандартних умов аглофабрики ПАТ «Запоріжсталь» дані величини мають значення відповідно 130 с та 48 %.

3. Встановлено, що максимальний ступінь обкомкованості матеріалу (вміст фракцій кондиційного розміру становить 55%) забезпечується у разі вмісту дрібної фракції (< 3 мм) у вихідній шихті на рівні 68 %.

4. Визначено, що управління огрудкуванням аглошихти за допомогою зміни швидкості обертання та кута нахилу огрудковувача при стабілізації витрати зволожуючої рідини на рівні, необхідному для спікання, дозволяє компенсувати певному діапазоні коливання вихідного гранулометричного складу шихти без втрат якості спікання.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МОДЕЛІ СТРУКТУРНИХ ЗМІН ОГРУДКОВАНОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ ЙОГО РУСІ ТРАКТОМ ШИХТОПОДАЧІ

4.1 Моделювання структурних змін огрудкованого матеріалу при русі в завантажувальному вузлі агломашини

Аналіз структурних змін обкомкованого матеріалу на ділянці «вихід огрудковувача - аглострічка» раніше виконувався з урахуванням фракційних розсівань [42], проте цей підхід не забезпечує отримання повної картини процесу, т.к. не дозволяє досліджувати масообмін усередині сипкої маси під час її руху.

Отримати адекватний опис даного процесу, що враховує перенос матеріалу між усіма фракціями, дозволяє використання балансового методу. Це створює теоретичні передумови для вибору раціональних режимів роботи технологічного обладнання спікального відділення аглофабрики, які забезпечать поліпшення фізико-механічних властивостей матеріалу, що транспортується, і підвищення стабільності агломераційного процесу.

Гранулометричні склади вихідної, огрудкованої, вивантаженої з промбункера та завантаженої на аглострічку шихти, отримані за результатами експерименту, наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Зміна фракційного складу шихти під час руху завантажувальним трактом агломашини

Місце відбору проби	Фракції шихти, %					
	>10 мм	7-10 мм	5-7 мм	3-5 мм	1,6-3 мм	<1,6 мм
Живильник приймального	8,25	9,04	6,04	12,11	30,13	34,43
Вихід барабана-огрудковувача	19,83	16,35	10,9	21,2	14,81	16,91
Живильник проміжного бункера	11,67	16,26	10,83	26,59	16,16	18,47

Аглострічка	8,2	11,93	7,93	25,4	21,72	24,82

Для дослідження впливу механічних впливів на окремі фракції огрудкованої шихти використовуємо балансовий метод моделювання. Схема моделі взаємодії між фракціями матеріалу на цій ділянці наведена на рис. 4.1.

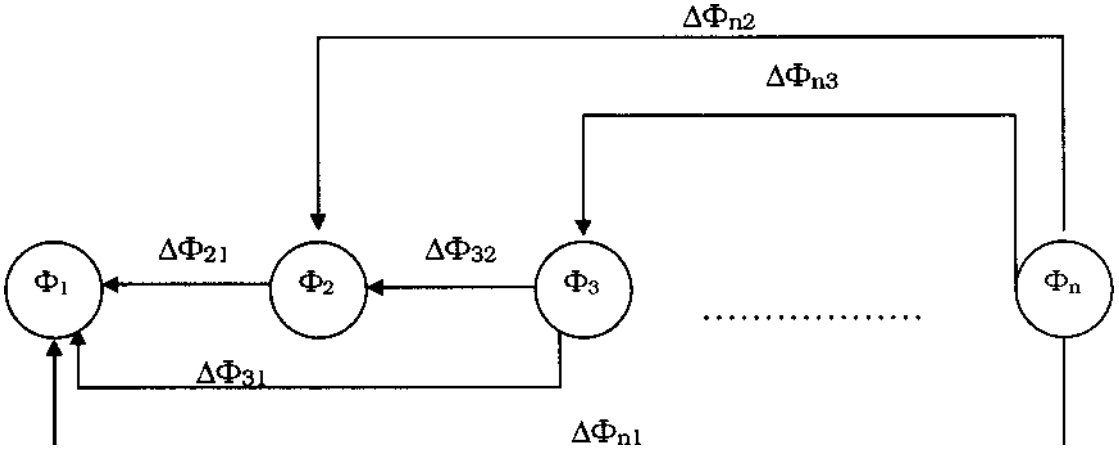


Рисунок 4.1 - Схема моделі масопереносу між фракціями під час руху шихти через завантажувальний вузол агломашини

Зміна фракційного складу матеріалу, розділеного на 6 класів крупності ($Ф_1$ - <1,6 мм; $Ф_2$ - 1,6-3 мм; $Ф_3$ - 3-5 мм; $Ф_4$ - 5-7 мм; $Ф_5$ - 7-10 мм; $Ф_6$ - >10 мм), внаслідок впливу стиральних та ударних навантажень характеризується наступною системою рівнянь:

$$\left.\begin{aligned}
\Phi_1'' &= \Phi_1' + \Delta\Phi_{21} + \Delta\Phi_{31} + \Delta\Phi_{41} + \Delta\Phi_{51} + \Delta\Phi_{61} \\
\Phi_2'' &= \Phi_2' - \Delta\Phi_{21} + \Delta\Phi_{32} + \Delta\Phi_{42} + \Delta\Phi_{52} + \Delta\Phi_{62} \\
\Phi_3'' &= \Phi_3' - \Delta\Phi_{31} - \Delta\Phi_{32} + \Delta\Phi_{43} + \Delta\Phi_{53} + \Delta\Phi_{63} \\
\Phi_4'' &= \Phi_4' - \Delta\Phi_{41} - \Delta\Phi_{42} - \Delta\Phi_{43} + \Delta\Phi_{54} + \Delta\Phi_{64} \\
\Phi_5'' &= \Phi_5' - \Delta\Phi_{51} - \Delta\Phi_{52} - \Delta\Phi_{53} - \Delta\Phi_{54} + \Delta\Phi_{65} \\
\Phi_6'' &= \Phi_6' - \Delta\Phi_{61} - \Delta\Phi_{62} - \Delta\Phi_{63} - \Delta\Phi_{64} - \Delta\Phi_{65}
\end{aligned}\right\} \quad (4.1)$$

де Φ_i' - кількість і-ї фракції в огрудкованої шихті, %;

Φ_i'' - кількість і-ї фракції в шихті, завантаженої на аглострічку, %;

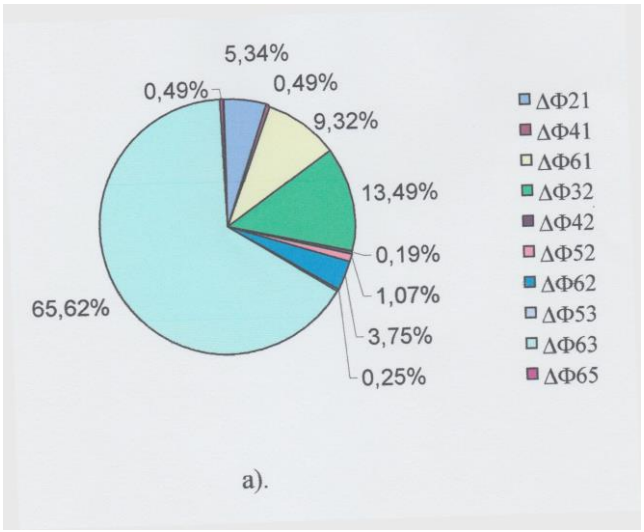
$\Delta\Phi_{ij}'$ - кількість шихти, що перейшла з і-ї фракції в j-ю в результаті впливу стираючих та ударних навантажень.

Оскільки система (4.1) є недовизначеною, її рішення було знайдено з допомогою чисельного методу квазі-Ньютона [39].

Результати моделювання представлені у таблиці 4.2. Відсоткове співвідношення масопереносу між фракціями шихти при русі через промбункер, завантажувальним лотком і в цілому на ділянці «вихід БО - агломашина» показано на рис. 4.2.

Таблиця 4.2 – Моделювання масопереносу між фракціями шихти на різних ділянках тракту шихтоподачі

Напрям масопереносу	При русі через проміжний бункер, %	При русі по лотку, %	На ділянці «вихід огрудковувача-аглострічка», %
$\Delta\Phi_{21}$	0,55	0,10	0,65
$\Delta\Phi_{31}$	0,00	0,89	0,89
$\Delta\Phi_{41}$	0,05	1,35	1,40
$\Delta\Phi_{51}$	0,00	2,23	2,23
$\Delta\Phi_{61}$	0,96	1,77	2,73
$\Delta\Phi_{32}$	1,39	0,89	2,28
$\Delta\Phi_{42}$	0,02	1,56	1,58
$\Delta\Phi_{52}$	0,11	1,86	1,97
$\Delta\Phi_{62}$	0,39	1,36	1,75
$\Delta\Phi_{43}$	0,00	0,00	0,00
$\Delta\Phi_{53}$	0,03	0,24	0,27
$\Delta\Phi_{63}$	6,76	0,35	7,11
$\Delta\Phi_{54}$	0,00	0,00	0,00
$\Delta\Phi_{64}$	0,00	0,00	0,00
$\Delta\Phi_{65}$	0,05	0,00	0,05



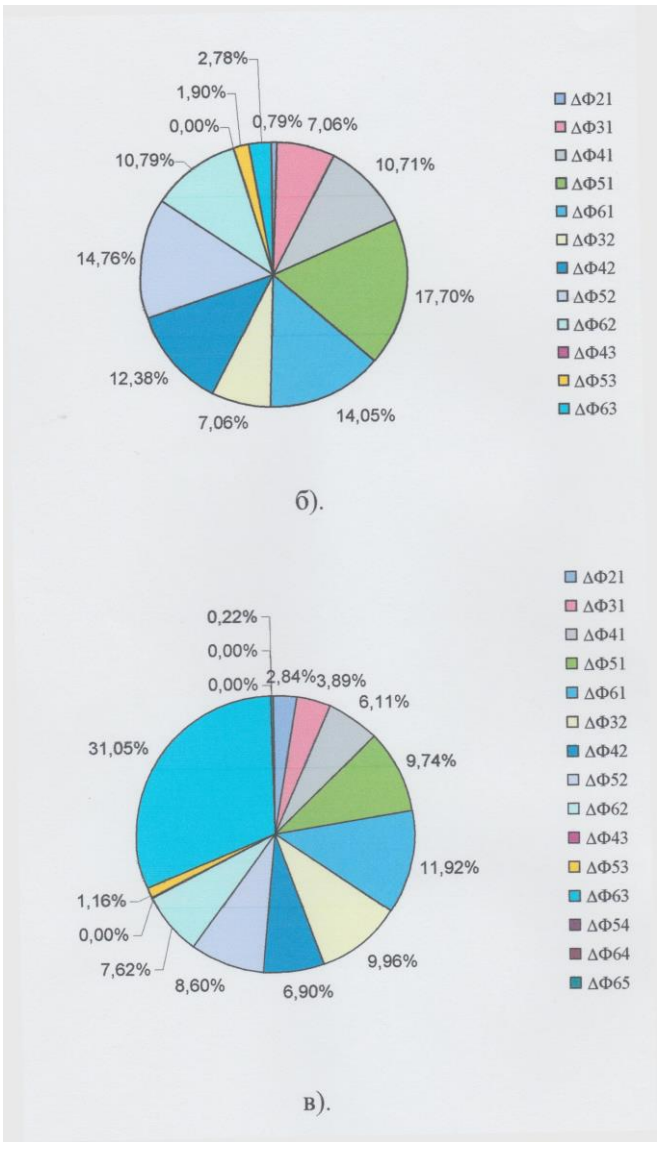


Рисунок 4.2 – Розподіл масопереносу між фракціями шихти при русі через промбункер (а), завантажувальним лотком (б) та ділянки «вихід БО-аглострічка» (в)

Аналіз отриманих результатів показує, що при русі аглошихти через промбункер вона переважно піддається впливу ударних навантажень (фракція >10 мм розколюється на дрібнішу 3-5 мм; цей процес становить 66% загального масопереносу на даній ділянці). Також тут спостерігається перехід матеріалу з фракції 3-5 мм у фракції 1,6-3 мм і <1,6 мм, що пояснюється впливом на цю фракцію навантаження, що стирають. Таким чином, найменшу міцність на даній ділянці має фракція >10 мм.

На ділянці «живильник промбункера - аглострічка» переважають стираючі навантаження на матеріал, що транспортується. Найбільш їм піддаються фракції 5-7 мм (перенесення у фракцію <1,6 мм становить 11%); 7-10 мм (перенесення у фракцію <1,6 мм становить 18%) та >10 мм (перенесення у фракцію <1,6 мм становить 14%).

Загалом під час руху огрудкованого матеріалу трактом завантаження найменшу міцність має фракція >10 мм.

Застосування запропонованого методу для моделювання процесів, що протікають у сипкій масі при її транспортуванні, дозволяє з високою точністю визначати зміну вмісту кожної фракції багатофракційної суміші, що дає можливість опосередковано оцінювати характеристики фракцій міцності за ступенем їх руйнування. Зміна вмісту в шихті фракції <1,6 мм характеризує вплив на її фракційний склад навантажень, що стирають, тоді як зміна кількості фракції 1,6-5 мм в основному залежить від ударних впливів, викликаних падінням сипкої маси в завантажувальному вузлі. Для оцінки ступеня руйнування фракцій використовуємо вираз:

$$П_i = \frac{\sum_{i,j=2}^{n} \Delta Ф_{i,j}}{Ф_i'} \cdot 100\% \qquad (4.2)$$

де $\Delta Ф_{ij}$ - кількість матеріалу, що перейшла із з і-ї фракції в j-ю в результаті проходження сипкої маси через технологічний агрегат, %;

$Ф_i'$ - кількість і-ї фракції в огрудкованій шихті, %.

Значення характеристик міцності фракцій наведені в табл. 4.3, а співвідношення опірності різних фракцій до стираючих і ударних навантажень показано на рис. 4.3.

Таблиця 4.3 - Ступінь руйнування фракцій шихти під час руху у завантажувальному вузлі

Фракція	Ступінь руйнування, %
$Ф_2$	4,39
$Ф_3$	14,95
$Ф_4$	27,34
$Ф_{5ст}$	13,64
$Ф_{5уд}$	13,68
$Ф_{6ст}$	13,77
$Ф_{6уд}$	44,91

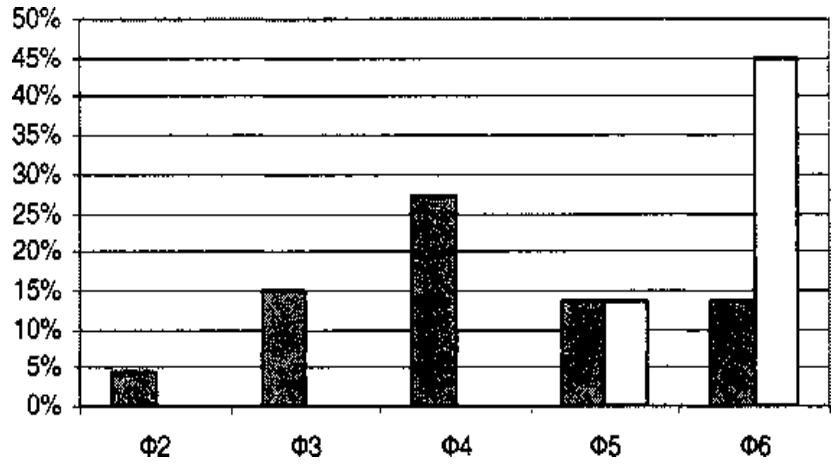


Рисунок 4.3 – Міцнісні характеристики фракцій

Як видно, найбільшому впливу ударних навантажень піддається фракція >10 мм, а стираючих - фракція 5-7 мм. Таким чином, ударні навантаження сприяють стабілізації гранулометричного складу огрудкованого матеріалу, викликаючи переважно руйнування гранул розміром >10 мм, що супроводжується переважно утворенням фракції 3-5 мм. Однією з вимог до транспортування огрудкованої шихти має бути зниження впливу стираючих навантажень, в результаті впливу яких

утворюється фракція <1,6 мм, що істотно знижує газопроникність шару, що спікається.

Таким чином, застосування балансового методу для моделювання механізму змін в огрудкованому матеріалі при його транспортуванні дозволяє з високою точністю описати вплив на нього стираючих та ударних навантажень. Це створює теоретичну базу для побудови алгоритмів оптимального управління агломераційним процесом, метою застосування яких є забезпечення необхідних якісних характеристик шихти та заданої газопроникності шару, що спікається. Результати моделювання масопереносу в сипкій масі при русі через завантажувальний вузол агломашини на аглофабриці комбінату «Запоріжсталь» показують, що найбільше впливу ударних навантажень схильна фракція >10 мм, гранули якої руйнуються переважно до кондиційних розмірів; до стираючих навантажень найбільш схильна фракція 5-7 мм. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що одним із критеріїв управління технологічними агрегатами спікального відділення має бути зниження впливу на огрудкований матеріал стираючих навантажень.

4.2 Синтез алгоритму прогнозування фракційного складу шихти, що вивантажується з проміжного бункера агломашини

Оскільки розроблена модель враховує лише комплексний вплив на огрудкований матеріал стираючих і ударних навантажень, то цікавить дослідження окремого впливу кожної з них. З цією метою було проведено обробку експериментальних даних, отриманих в результаті досліджень.

Зміна гранулометричного складу під впливом різноманітних навантажень, характеризується даними, наведеними в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 - Зміна фракційного складу огрудкованої шихти під час руху через проміжний бункер агломашини (результати лабораторних досліджень)

Характеристика материалу	Фракції агломерационої шихти, мм					
	<1,6	1,6-3	3,0-5,0	5,0-7,0	7,0-10,0	>10
Вихідна шихта, %	63,3	19,2	5,1	3,6	4,5	4,3
Огрудкована шихта, %	34,7	16,3	14,2	16,2	13,5	5,1
Падіння з висоти 2 м	41,5	17,5	12,3	14,2	10,9	3,6
Падіння з висоти 0 м	49,6	20,5	8,2	11,3	7,6	2,8

Результати проведених експериментів дозволяють оцінити вплив на фракційний склад шихти окремо стираючих та ударних навантажень. Під впливом ударних навантажень ($H_п$ =2,0 м) частки матеріалу розколюються на більш міцні складові; модель цього процесу показано на рис. 4.4.

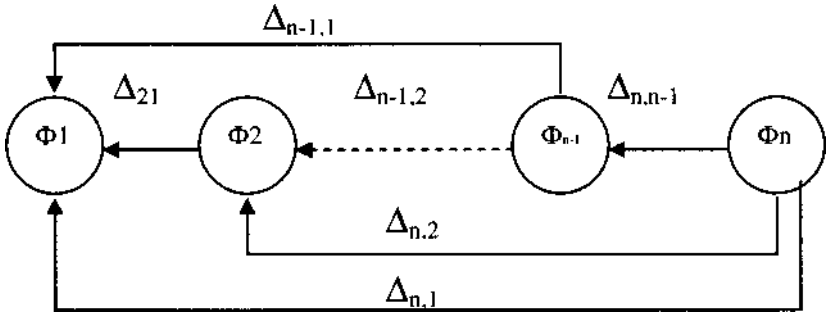


Рисунок 4.4 – Схема моделі зміни фракційного складу шихти під впливом ударних навантажень

Застосувавши для моделювання зміни фракційного складу матеріалу під впливом ударних навантажень балансовий метод, отримуємо систему рівнянь (4.3):

$$\left.\begin{aligned} \Phi_1'' &= \Phi_1' + \Delta\Phi_{21} + \Delta\Phi_{31} + \ldots + \Delta\Phi_{n1} \\ \Phi_2'' &= \Phi_2' - \Delta\Phi_{21} + \Delta\Phi_{32} + \ldots + \Delta\Phi_{n2} \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \Phi_n'' &= \Phi_n' - \Delta\Phi_{n1} - \Delta\Phi_{n2} - \Delta\Phi_{n3} - \ldots - \Delta\Phi_{n,n-1} \end{aligned}\right\} \quad (4.3)$$

де Φ_i' - кількість і-ї фракції в шихті на вході у промбункер, %;

Φ_i'' - кількість і-ї фракції в шихті на виході з промбункеру, %;

$\Delta\Phi_{ij}'$ - кількість шихти, що перейшла з і-ї фракції в j-ю в результаті впливу ударних навантажень.

При рівні заповнення проміжної ємності $H_{сл}$ = 2,0 м завантаження сипкого матеріалу проводилося за відсутності ударних впливів, тому на фракції агломераційної шихти діяли в процесі їх руху та вивантаження тільки навантаження, що стирають. Це зумовило значне збільшення в сипкому матеріалі, що надходить з ємності, вмісту фракції <1,6 мм, при відносно рівномірному зменшенні кількості фракції >3,0 мм. Модель зміни фракційного складу шихти під дією навантажень, що стирають, наведена на рис. 4.5 і описується системою рівнянь (4.4).

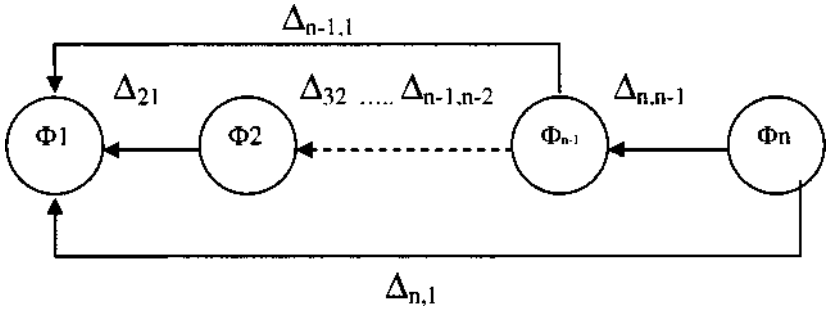


Рисунок 4.5 - Схема моделі зміни фракційного складу шихти під впливом стираючих навантажень

$$\left.\begin{array}{c} \Phi_1'' = \Phi_1' + \Delta\Phi_{21} + \Delta\Phi_{31} + \ldots + \Delta\Phi_{n1} \\ \Phi_2'' = \Phi_2' - \Delta\Phi_{21} + \Delta\Phi_{32} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \Phi_n'' = \Phi_n' - \Delta\Phi_{n1} - \Delta\Phi_{n,n-1} \end{array}\right\} \quad (4.4)$$

Розв’язання систем рівнянь (4.3 та (4.4) для матеріалу, поділеного на 6 класів крупності, було отримано за допомогою методу квазі-Ньютона [39]. Результати моделювання представлені у табл. 4.5. Похибка моделювання становила 1,5 %.

Таблиця 4.5 - Моделювання масопереносу всередині сипкої маси під час руху через проміжний бункер агломашини (у лабораторних умовах)

Напрям масопереносу	Ударні навантаження,	Стираючі навантаження, %	Загальний вплив, %
$\Delta\Phi_{21}$	6,80	5,28	12,08
$\Delta\Phi_{31}$	0,00	1,42	1,42
$\Delta\Phi_{41}$	0,00	0,00	0,00
$\Delta\Phi_{51}$	0,00	5,90	5,90
$\Delta\Phi_{61}$	0,00	2,30	2,30
$\Delta\Phi_{32}$	6,55	0,50	7,05
$\Delta\Phi_{42}$	0,00	0,00	0,00
$\Delta\Phi_{52}$	1,45	0,00	1,45
$\Delta\Phi_{62}$	0,00	0,00	0,00
$\Delta\Phi_{43}$	2,43	4,90	7,33
$\Delta\Phi_{53}$	0,71	0,00	0,71
$\Delta\Phi_{63}$	1,50	0,00	1,50
$\Delta\Phi_{54}$	0,43	0,00	0,43
$\Delta\Phi_{64}$	0,00	0,00	0,00
$\Delta\Phi_{65}$	0,00	0,00	0,00

Для непрямої оцінки опірності фракцій до ударних та стираючих навантажень використовуємо вираз (4.2). Характеристики міцності обкомкованого матеріалу показані на рис. 4.6.



Рисунок 4.6 – Руйнування фракцій огрудкованої шихти під впливом стираючих та ударних навантажень

Як показує аналіз отриманих результатів, найменшою відносною опірністю до навантажень, що стирають, характеризується фракція >10 мм,

максимальної - часточки розміром 3-5 мм. Найбільш схильні до впливу ударних навантажень гранули розміром 3-5 мм, а найбільшою відносною опірністю до цього роду навантажень характеризується фракція 5-7 мм.

Використання запропонованого методу моделювання дозволяє розробити алгоритм прогнозування фракційного складу огрудкованої шихти на виході із проміжного бункера. У виробничих умовах висота стовпа шихтових матеріалів непостійна, що призводить до суттєвого ускладнення механізму взаємодії між часточками в процесі їх руху трактом завантаження шихти на аглострічку. Це визначає необхідність спільного використання для аналізу процесів, що протікають у сипкому середовищі, моделей, що характеризують структурні зміни в сипких матеріалах під дією ударних та стиральних впливів. На основі даних моделей синтезували алгоритм прогнозування фракційного складу матеріалу на виході з проміжного бункера в залежності від висоти заповнення бункера.

Для реалізації запропонованого алгоритму потрібно попереднє проведення описаних вище дослідів для розрахунку масопереносу під дією різноманітних навантажень у даних технологічних умовах. Далі необхідно визначити питомий масоперенос, викликаний окремо ударними і навантаженнями, що стирають, віднесений до висоти проміжного бункера:

$$\Delta\Phi^{уд}{}_{ударij} = \frac{\Delta\Phi_{ударij}}{H_{бунк}}$$

$$\Delta\Phi^{уд}{}_{истij} = \frac{\Delta\Phi_{истij}}{H_{бунк}} \qquad (4.5)$$

де $\Phi^{уд}_{ударij}$ та $\Phi^{уд}_{стирij}$- питомий масоперенос з і-ї фракції j-ої, викликаний відповідно ударними і стираючими навантаженнями, %/м;

$\Phi_{ударij}$ та $\Phi_{стирij}$- абсолютний масоперенос із і-ї фракції в j-ю, викликаний відповідно ударними та стираючими навантаженнями, %;

$Н_{бунк}$ - висота проміжного бункера, м.

Пропонований алгоритм містить такі кроки:

1. Отримання інформації про поточний рівень заповнення бункера: $H_{сл}$, м.

2. Визначення висоти падіння матеріалу:

$$H_{пад} = H_1 + (H_{бунк} - H_{сл})$$

де $H_{пад}$ – висота падіння матеріалу, м;

H_1 - відстань від завантажувального пристрою до верхньої кромки бункера, м.

3. Визначення масопереносу під впливом ударних навантажень:

$$\Delta\Phi_{удар ij} = H_{пад} \cdot \Delta\Phi^{уд}_{удар ij}$$

4. Визначення гранулометричного складу матеріалу при зіткненні з поверхнею стовпа матеріалу в бункері: за рівняннями системи (4.3).

5. Визначення масопереносу під дією стираючих навантажень:

$$\Delta\Phi_{стир ij} = H_{сл} \cdot \Delta\Phi^{уд}_{стир ij}$$

6. Визначення гранулометричного складу матеріалу на виході із проміжного бункера: за рівняннями системи (4.4). Тут як вихідний фракційний склад виступає фракційний склад, визначений в результаті рішення системи (4.3).

В умовах комбінату «Запоріжсталь» висота заповнення проміжних бункерів агломашин коливається від 0,5 до 1,5 м. Відстань від завантажувального пристрою до верхньої кромки бункера становить 2 м, висота бункера 2 м. Дані параметри технологічних агрегатів були використані для моделювання зміни фракційного складу шихтового

матеріалу відповідно до вищеописаного алгоритму. Гранулометричний склад обкомкованої шихти перед завантаженням бункер характеризувався значеннями, представленими в табл. 4.4.

Значення питомого масопереносу, розраховані за формулами (4.5), представлені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 - Питомий масоперенос між фракціями шихти під час проходження промбункера

Напрям масопереносу	Ударні навантаження, %	Стираючі навантаження, %
$\Delta\Phi^{уд}_{21}$	3,40	2,64
$\Delta\Phi^{уд}_{31}$	0,00	0,71
$\Delta\Phi^{уд}_{41}$	0,00	0,00
$\Delta\Phi^{уд}_{51}$	0,00	2,95
$\Delta\Phi^{уд}_{61}$	0,00	1,15
$\Delta\Phi^{уд}_{32}$	3,28	0,25
$\Delta\Phi^{уд}_{42}$	0,00	0,00
$\Delta\Phi^{уд}_{52}$	0,73	0,00
$\Delta\Phi^{уд}_{62}$	0,00	0,00
$\Delta\Phi^{уд}_{43}$	1,22	2,45
$\Delta\Phi^{уд}_{53}$	0,36	0,00
$\Delta\Phi^{уд}_{63}$	0,75	0,00
$\Delta\Phi^{уд}_{54}$	0,22	0,00
$\Delta\Phi^{уд}_{64}$	0,00	0,00
$\Delta\Phi^{уд}_{65}$	0,00	0,00

Гранулометричний склад шихти при зіткненні з поверхнею стовпа матеріалу в бункері, розрахований за рівняннями системи (4.3), наведено в табл. 4.7 та графічно на рис. 4.7.

Таблиця 4.7 - Фракційний склад шихти при зіткненні з поверхнею стовпа матеріалу в бункері

Висота шару, м	Фракційний склад при зіткненні з поверхнею стовпа матеріалу в бункері, %					
	<1,6 мм	1,6-3 мм	3-5 мм	5-7 мм	7-10 мм	>10 мм
0,5	46,6	18,4	10,9	12,7	9	2,5
0,6	46,3	18,4	11	12,8	9	2,6
0,7	45,9	18,3	11	12,9	9,2	2,6
0,8	45,6	18,2	11,2	13	9,4	2,7
0,9	45,2	18,2	11,3	13,1	9,5	2,8
1	44,9	18,1	11,3	13,2	9,6	2,9
1,1	44,6	18	11,4	13,3	9,8	2,9
1,2	44,2	18	11,5	13,4	9,9	3
1,3	43,9	17,9	11,6	13,5	10	3
1,4	43,5	17,8	11,7	13,6	10,1	3,2
1,5	43,2	17,8	11,8	13,7	10,3	3,2



Рисунок 4.7 - Вплив висоти заповнення бункера на фракційний склад шихти при падінні

Отримані результати показують, що за зміни амплітуди коливань рівня матеріалу в бункері 1 м кількість дрібної фракції змінюється не більше 3 %, а кількість кондиційної - менше 1%. Таким чином, ударні навантаження викликають переважно руйнування великих гранул, сприяючи стабілізації фракційного складу обкомкованої шихти.

Гранулометричний склад шихти, що вивантажується з проміжного бункера, розрахований за рівняннями системи (4.4), наведено в табл. 4.8 та графічно на рис. 4.8.

Таблиця 4.8 - Фракційний склад шихти на виході з промбункера

Висота шару, м	Фракційний склад на виході з бункеру, %					
	<1,6 мм	1,6-3 мм	3-5 мм	5-7 мм	7-10 мм	>10 мм
0,5	50,3	17,2	11,6	11,5	7,5	1,9
0,6	50,8	17	11,9	11,3	7,2	1,9
0,7	51,1	16,6	12	11,2	7,1	1,8
0,8	51,6	16,3	12,4	11	7	1,8
0,9	51,9	16	12,6	10,9	6,8	1,8
1	52,4	15,7	12,8	10,8	6,7	1,7
1,1	52,8	15,4	13	10,6	6,6	1,6
1,2	53,1	15,1	13,3	10,5	6,4	1,6
1,3	53,6	14,8	13,5	10,3	6,2	1,5
1,4	53,9	14,5	13,8	10,2	6	1,6
1,5	54,4	14,2	14	10	5,9	1,5

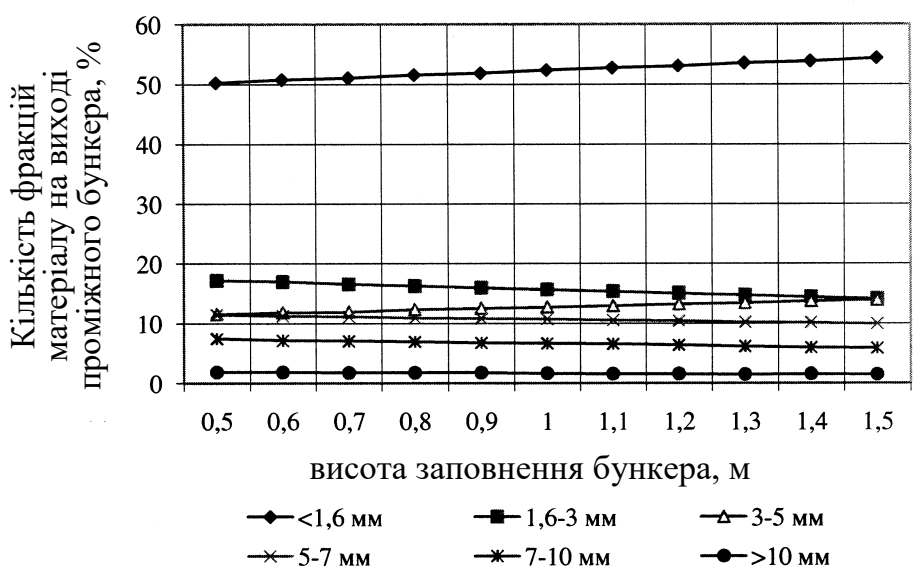


Рисунок 4.8 – Вплив висоти заповнення бункеру на фракційний склад вивантаженої шихти

Як видно, при збільшенні ступеня заповнення бункера зростає кількість дрібної фракції, що пов'язано зі збільшенням площі ділянки впливу стираючих навантажень. При цьому амплітуда коливання рівня

матеріалу у 1 м викликає зміну кількості дрібної фракції на 4%. Загалом після проходження проміжного бункера огрудкована шихта змінює гранулометричний склад у межах 15-20 % за кількістю дрібної фракції та в межах 4 % за кількістю кондиційної фракції розміром 3-5 мм. При виборі оптимального рівня наповнення проміжного бункера потрібно враховувати вплив коливань кількості шихти на стабільність роботи дозатора [7].

Таким чином, розроблений алгоритм дозволяє прогнозувати фракційний склад шихти, яка вивантажується з проміжного бункеру агломашини, та може бути використаний у системі управління характеристиками шару шихти на аглострічці.

4.3 Висновки до розділу 4

1. Отримано математичні моделі зміни фракційного складу огрудкованої шихти під дією ударних та стираючих навантажень під час її руху трактом завантаження на агломашину у вигляді залежностей вмісту фракцій від величини масопереносу.

2. Встановлено, що ударні навантаження сприяють стабілізації гранулометричного складу багатофракційного матеріалу: руйнується у основному фракція >10 мм (ступінь руйнування 45%), що супроводжується переходом матеріалу переважно у фракцію 3-5 мм.

3. Встановлено, що на ділянці «вихід проміжного бункера – аглострічка» переважають стираючі навантаження, які викликають утворення дрібної фракції; найбільшому руйнуванню схильні фракції 3-5 мм та 5-7 мм (ступінь руйнування 20%).

4. Визначено, що що для збереження сформованого при огрудкуванні гранулометричного складу аглошихти може бути забезпечено за рахунок впливу на огрудкований матеріал стираючих навантажень, що є наслдком зменшення висоти заповнення проміжного бункера до 0,6 м.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено новий підхід до вирішення задачі ідентифікації гранулометричних характеристик агломераційної шихти, що дозволяє, на відміну від відомих методів аналізу, враховувати технологічні особливості переробки залізорудних матеріалів.

2. Запропонована методика ідентифікації гранулометричних характеристик агломераційної шихти дозволяє прогнозувати фракційний склад сипкого матеріалу за результатами вимірювання середнього діаметра часток, що становлять його масу.

3. Використання балансового методу для аналізу процесів, що протікають під час руху огрудкованої шихти трактом завантаження на аглострічку, дозволяє уточнити їх механізм та створює теоретичні передумови для вибору раціональних режимів роботи технологічного обладнання аглофабрик.

4. Отримані закономірності масообмінних процесів, що протікають при огрудукванні агломераційної шихти, у вигляді модельних залежностей вмісту фракцій багатофракційної суміші від коефіцієнтів масопереносу, що визначаються вихідним гранулометричним складом та вологістю шихти, а також швидкістю обертання на кутом нахилу огрудковувача.

5. На базі отриманих залежностей розроблено алгоритм визначення часу активної взаємодії часток, який дозволяє розрахувати час, необхідний для завершення активної стадії процесу огрудкування та визначити найбільшу кількість фракції кондиційного матеріалу (3-10 мм), яку можливо отримати у даних технологічних умовах.

6. Встановлено, що коливання фракційного складу вихідної шихти вносять суттєві збурення у процес грануляції. Тому одном з основних шляхів оптимізації управління формуванням гранулометричних характеристик аглошихти є стабілізація фракційного складу шихти, яка

вивантажується з проміжних бункерів. Для цього розроблено алгоритм розрахунку параметрівзавантаження ділянки приймальних бункерів.

7. Встановлено, що на ділянці «вихід проміжного бункера – аглострічка» переважають стираючі навантаження, які викликають утворення дрібної фракції; найбільшому руйнуванню схильні фракції 3-5 мм та 5-7 мм (ступінь руйнування 20%).

8. Визначено, що що для збереження сформованого при огрудкуванні гранулометричного складу аглошихти може бути забезпечено за рахунок впливу на огрудкований матеріал стираючих навантажень, що є наслдком зменшення висоти заповнення проміжного бункера до 0,6 м.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Гранулятори. URL: http://surl.li/tvsudr (дата звернення 10.10.2025 р.)

2. Марюта О. Н., Качан Ю. Г. Автоматичний контроль гранулометричного складу сипких матеріалів. Київ : Вища школа, 1977. 120 с.

3. Пазюк М. Ю., Ніколаєнко А. М., Гранковський В. І., Насонов В. М. Контроль гранулометричного складу огрудкованої шихти. *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* 1981. № 12. С. 4-6.

4. Зінченко Ю. М., Пазюк М. Ю. Вимірювання гранулометричного складу огрудкованої шихти СВЧ-прибором. *Механізація і автоматизація виробництва.* 1985. № 6. С. 28-29.

5. Федоровський М. В., Шанідзе Д. І. Агломерація залізних руд : довідник. Київ : Техніка, 1991. 140 с.

6. Богаєнко І. М., Бурляй І. Ю., Грабовський Г. Г. Розробка та проєктування АСК ТП фабрик огрудкування гірничо-збагачувальних комбінатів : навч.посібник. Київ : НВК «КІА», 2002. 227 с.

7. Пазюк М. Ю., Полещук О. О. Управління потоково-транспортними системами залізорудних матеріалів. Запоріжжя : ЗДІА, 1995. 120 с.

8. Богаєнко І. М., Грабовський Г. Г., Рюмшин М. О. Автоматизація фабрик огрудкування залізних труд та концентратів. Київ : Техніка, 2001. 290 с.

9. Вовк О. О., Чічіянц Г. А. Посібник агломератчика. Київ : Техніка, 1990. 143 с.

10. Биткін В. І., Станішевський А. О., Бутенко М. І. Підвищення якості агломерату. Дніпро : Промінь, 1973. 49 с.

11. Proceedings of the 43-th Ironmaking Conference Chicago. 1984. V. 83. P. 81-99.

12. Коршиков Г.В., Хайков М.А., Буев А.В. Формирование структуры слоя при однослойной и двухслойной загрузке шихты на аглоленту. В сб.

«Теплотехніка та газодинаміка агломераційного процесу». Київ : Наукова думка, 1983. С. 22-25.

13. Сейтни Н., Киниши С., Едзи И. Сегрегация аглошихты при подаче на аглоленту. *Тэцу то хаганэ*. 1980. Т. 66. №4. С. 87.

14. Готовцев А.А., Сальников И.М., Тихонов В.И. Оценка сегрегации агломерационной шихты. В сб.: *Теоретические основы и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке*. Тез. докл. республиканской научно-технической конференции. Днепропетровск, 1980. С. 29-30.

15. Готовцев А. А., Сальников И. М., Тихонов В. И., Колода С. Г. Рациональная загрузка шихты на аглоленту. В сб. *«Теплотехніка та газодинаміка агломераційного процесу»*. Київ : Наукова думка,1983. С. 12-17.

16. Петрушов С.Н., Полухин А.П., Рузанов Л.М. Исследование и совершенствование укладки шихты на аглоленту. *«Теплотехніка та газодинаміка агломераційного процесу»*. Київ : Наукова думка, 1983. С. 29-33.

17. Николаенко А.Н., Гранковский В.И., Погорелов В.Н. Математическая модель усадки слоя шихты в начальный период спекания. *Известия вузов. Черная металлургия*, 1983. №2. С. 9-12.

18. M. Kondoh. Y. Konishi, K. Okabe u aut. Interpritation cinematigne d`essais de chargement a l`echelle 1 dans un haut fonrenean a guculard sans cloche. *Revue de Metallurgie*. 1981. №. 8-9. P. 733-744.

19. Русаков П. Г., Русаков Н. Ф. Описание сегрегации агломерационной шихты и других сыпучих материалов. В кн. “Теория и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке”. Днепропетровск : ДМетИ, 1985. С. 159-160.

20. Готовцев А.А., Сальников И.М., Тихонов В.И. Оценка сегрегации агломерационной шихты. В кн. “Теоретические основы и технология

подготовки металлургического сырья к доменной плавке". Днепропетровск, 1980. С. 29-30.

21. Марюта А.Н., Качан Ю.Г. Автоматический контроль гранулометрического состава сыпучих материалов. Київ : «Вища школа», 1977. – 120 с.

22. Martin G., Blyth C., Tongue H. Researches on the Theory of Fine Grinding. *Trans. Ceramic Soc.*, 2024. №23. P. 61.

23. Andreasen A.H. Zur Kenntnis des Mahlgutes. *Kolloidchemische Beihefte*, 1928, Bd. XXVII H. 6-1, P. 350-390.

24. Heywood H. Calculation of the Specific Surface of a Power. *Prac. Inst. Mechan. Eng*. 1933, №. 125. P. 383-416.

25. Gaudin A.M. An investigation of Crushing Phenomena. *Trans. AIME*. 1926. № LXXIII. P. 253-310.

26. Schuhmann R. Principles of Comminution, Size Distribution and Surface calculation. *Mining Technology*, 1940. №4.

27. Weining A.J. Advances in mineral Processing material balances. *Canadian Metallurgical Qarterly*, 1972. №. 11, №2.

28. Шупов Л.П. Моделирование и расчет на ЭВМ схем обогащения. Москва : «Недра», 1980. 288 с.

29. Форсайд Дж., Молер к. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений. Перевод с англ. 1969. 254 с.

30. Шупов Л.П., Ярусова О.В. Математические методы составления баланса металла на горно-обогатительных комбинатах. Київ: УкрНІІНТІ, 1968. 130 с.

31. Kuchn D.R., Davidson H. Computer Control, II mathematics of Control. *Chemical Engineer Progress*, 1961 Т. 57, №6.

32. Smith H.W., Ichigen N. Computer adjustment of metallurgical balances. *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, 1973 № 737. P. 97-100.

33. Плискановский С. Т., Маковский В. А., Кожух В. Я. АСУ та ОЦ металургійного заводу. Київ : Техніка, 1977. 184 с.

34. Пазюк М. Ю. Масоперенос при грануляції залізорудних матеріалів. *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* 1990. № 4. С. 8-10.

35. Пазюк М. Ю. Моделювання роботи барабаних огрунтовувачів. *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* 1988. № 4. С. 93-97.

36. Рахуба В. О. Моделювання і оптимізація процесу грануляції сипких матеріалів. *XXXII науково-технічна конференція молоді*. Запоріжжя : ВАТ «Запоріжсталь», 2005. С. 13.

37. Рахуба В. О., Пазюк М. Ю. Застосування балансових методів для моделювання структурних змін у сипких матеріалів при грануляції. *X науково-технічна конференція студентів, магістрів, аспірантів та викладачів* ЗДІА. Частина II. Секція «Електроніка, електронні технології та інфломаційні технології». Запоріжжя : ЗДІА, 2005. С. 184-185.

38. Рахуба В. О., Пазюк М. Ю. АСУ ТП грануляції сипких матеріалів з використанням математичної моделі на базі балансового метода. *Академічний вісник Криворіжского територіального відділення МАКНС* : зб.наук.праць. 2006. № 17-18. С. 18-20.

39. Метод Лівенберга-Маркардта. URL: http://surl.li/cjxnxu (дата звернення 20.12.2024 р.).

40. Ренгевич О. В., Кригін Д. О., Клименко Ю. С. Сучасні методи ідентифікації якісних параметрів та механізму огрудкуванню агломераційної шихти. *Металургія* : зб.наук.праць. Запоріжжя : ЗДІА, 2004. №10. С. 23-26.

41. Гранковський В. І., Пазюк М. Ю., Ніколаєнко А. М., Половой П. О. Дослідження впливу фізічний властивостей шихти на початковий період спікання. В сб.: *Теоретические основы и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке*. Тез. докл. республиканской научно-технической конференции. Днепропетровск, 1980. С. 40-41.

42. Пазюк М. Ю., Гранковский В. І., Полещук О. О. Дослідження роботи приймальних бункерів агломашин. *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* 1984. № 4. С. 9-12.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – План обчислювального експерименту по дослідженю впливу керуючих дій на сумарний коефіцієнт масопереносу $K_{1\Sigma}$

Номер досліду	Значення факторів			Значення відгуку, %/с
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	-1	0,01162
2	-1	-1	0	0,01282
3	-1	-1	+1	0,01402
4	-1	-0,33	-1	0,01034
5	-1	-0,33	0	0,01153
6	-1	-0,33	+1	0,01273
7	-1	+0,33	-1	0,00905
8	-1	+0,33	0	0,01025
9	-1	+0,33	+1	0,01144
10	-1	+1	-1	0,00776
11	-1	+1	0	0,00896
12	-1	+1	+1	0,01016
13	-0,5	-1	-1	0,01355
14	-0,5	-1	0	0,01474
15	-0,5	-1	+1	0,01594
16	-0,5	-0,33	-1	0,01226
17	-0,5	-0,33	0	0,01346
18	-0,5	-0,33	+1	0,01466
19	-0,5	+0,33	-1	0,01097
20	-0,5	+0,33	0	0,01217
21	-0,5	+0,33	+1	0,01337
22	-0,5	+1	-1	0,00969
23	-0,5	+1	0	0,01089
24	-0,5	+1	+1	0,01208
25	0	-1	-1	0,01452
26	0	-1	0	0,01571
27	0	-1	+1	0,01691
28	0	-0,33	-1	0,01323
29	0	-0,33	0	0,01443
30	0	-0,33	+1	0,01563
31	0	+0,33	-1	0,01194
32	0	+0,33	0	0,01314
33	0	+0,33	+1	0,01434
34	0	+1	-1	0,01066
35	0	+1	0	0,01186
36	0	+1	+1	0,01305
37	+0,5	-1	-1	0,01453
38	+0,5	-1	0	0,01573

39	+0,5	-1	+1	0,01693
40	+0,5	-0,33	-1	0,0 1325
41	+0,5	-0,33	0	0,01444
42	+0,5	-0,33	+1	0,01564
43	+0,5	+0,33	-1	0,01196
44	+0,5	+0,33	0	0,01316
45	+0,5	+0,33	+1	0,01435
46	+0,5	+1	-1	0,01067
47	+0,5	+1	0	0,01187
48	+0,5	+1	+1	0,01307
49	+1	-1	-1	0,01359
50	+1	-1	0	0,01479
51	+1	-1	+1	0,01599
52	+1	-0,33	-1	0,01231
53	+1	-0,33	0	0,01350
54	+1	-0,33	+1	0,01470
55	+1	+0,33	-1	0,01102
56	+1	+0,33	0	001222
57	+1	+0,33	+1	0,01342
58	+1	+1	-1	0,00974
59	+1	+1	0	0,01093
60	+1	+1	+1	0,01213

Таблиця А.2 – План обчислювального експерименту по дослідженю впливу керуючих дій на сумарний коефіцієнт масопереносу $K_{2\Sigma}$

Номер досліду	Значення факторів			Значення відгуку, %/с
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	-1	0,02888
2	-1	-1	0	0,02937
3	-1	-1	+1	0,02985
4	-1	-0,33	-1	0,02833
5	-1	-0,33	0	0,02882
6	-1	-0,33	+1	0,02931
7	-1	+0,33	-1	0,02779
8	-1	+0,33	0	0,02828
9	-1	+0,33	+1	0,02876
10	-1	+1	-1	0,02724
11	-1	+1	0	0,02773
12	-1	+1	+1	0,02822
13	-0,5	-1	-1	0,03237
14	-0,5	-1	0	0,03286
15	-0,5	-1	+1	0,03334
16	-0,5	-0,33	-1	0,03283

17	-0,5	-0,33	0	0,03231
18	-0,5	-0,33	+1	0,03280
19	-0,5	+0,33	-1	0,03128
20	-0,5	+0,33	0	0,03177
21	-0,5	+0,33	+1	0,03225
22	-0,5	+1	-1	0,03074
23	-0,5	+1	0	0,03122
24	-0,5	+1	+1	0,03171
25	0	-1	-1	0,03567
26	0	-1	0	0,03616
27	0	-1	+1	0,03665
28	0	-0,33	-1	0,03513
29	0	-0,33	0	0,03562
30	0	-0,33	+1	0,03610
31	0	+0,33	-1	0,03458
32	0	+0,33	0	0,03507
33	0	+0,33	+1	0,03556
34	0	+1	-1	0,03404
35	0	+1	0	0,03453
36	0	+1	+1	0,03501
37	+0,5	-1	-1	0,03879
38	+0,5	-1	0	0,03928
39	+0,5	-1	+1	0,03976
40	+0,5	-0,33	-1	0,03825
41	+0,5	-0,33	0	0,03873
42	+0,5	-0,33	+1	0,03922
43	+0,5	+0,33	-1	0,03770
44	+0,5	+0,33	0	0,03819
45	+0,5	+0,33	+1	0,03867
46	+0,5	+1	-1	0,03716
47	+0,5	+1	0	0,03764
48	+0,5	+1	+1	0,03813
49	+1	-1	-1	0,04172
50	+1	-1	0	0,04221
51	+1	-1	+1	0,04269
52	+1	-0,33	-1	0,04117
53	+1	-0,33	0	0,04166
54	+1	-0,33	+1	0,04215
55	+1	+0,33	-1	0,04063
56	+1	+0,33	0	0,04112
57	+1	+0,33	+1	0,04160
58	+1	+1	-1	0,04009
59	+1	+1	0	0,04057
60	+1	+1	+1	0,04106