МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (магістерського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему Удосконалення автоматизованої системи управління спіканням агломераційної шихти на аглострічці

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1743
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно -інтегровані технології та робототехніка_____
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології_____
(назва освітньої програми)
_____А. С. Мних_____
(ініціали та прізвище)

Керівник проф., д.т.н. Пазюк М. Ю._____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент директор ТОВ «Електротехмаш»____
_____Курілець І. А._____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя 2024

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 – другий (магістерський)
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно -інтегровані технології та робототехніка
(код та назва)
Спеціалізація
(код та назва)
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
«06» грудня 2024 року

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

Мниху Антону Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Удосконалення автоматизованої системи управління спіканням агломераційної шихти на аглострічці
керівник роботи Пазюк М. Ю., професор, докт.техн.наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «30» вересня 2024 року № 1483-с
2 Строк подання студентом роботи 05 грудня 2024 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) Дослідження динаміки процесу формування шару аглошихти; дослідження систем завантаження полідисперсної шихти; дослідження газодинамічних характеристик шару полідисперсної шихти; оптимізація структури шару агломераційної шихти з метою стабілізації теплового режиму; вплив структури шару агломераційної шихти на кількість шкідливих викидів в атмосферу
5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): схема агломераційного процесу; схема завантаження шихти прямолінійним лотком; розподіл гранскладу шихти по висоті шару; оптимізація структури шару; результати досліджень; висновки

6 Консультанти розділів роботи

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

7 Дата видачі завдання 27.05. 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження динаміки процесу формування шару аглошихти, підготовленої до теплової обробки	27.05 – 16.06. 2024 р.	виконано
2	Дослідження систем завантаження полідисперсної шихти	17.06 – 14.07 2024 р	виконано
3	Дослідження газодинамічних характеристик шару полідисперсної шихти, підготовленої до спікання	15.07 – 08.09. 2024 р	виконано
4	Оптимізація структури шару агломераційної шихти з метою стабілізації теплового режиму процесу спікання	09.09-13.10. 2024 р	виконано
5	Дослідження впливу теплового режиму процесу спікання на якісні показники агломерату	14.10-03.11. 2024 р	виконано
6	Вплив структури шару агломераційної шихти підготовленої до теплової обробки на кількість шкідливих викидів в атмосферу	04.11-24.11.2024 р.	виконано
7	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю	25.11-05.12. 2024 р	виконано
8	Підготовка доповіді	01.12-09.12. 2024 р	виконано

Студент _____ Антон МНИХ
(підпис) (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Ірина ОВЧИННИКОВА
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Мних А.С. Удосконалення автоматизованої системи управління спіканням агломераційної шихти на аглострічці.

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, 2024.

У роботі виконано комплекс досліджень, спрямованих на розробку і удосконалення підвищення енергоефективності грудкування сипучих матеріалів зі зменшенням витрати твердого палива за рахунок керування сегрегаційними процесами, що дозволяє стабілізувати тепловий режим обробки матеріалу по горизонтах шару при агломерації залізорудних матеріалів.

Отримали подальшого розвитку наукові основи підвищення енергоефективності процесу подрібнення палива. Запропоновано нову схему подрібнення з метою зменшення впливу стираючих навантажень на матеріал, що подрібнюється. Реалізовано математичний опис теплових процесів у стаціонарному шарі моно- та полідисперсних матеріалів з урахуванням внутрішніх джерел енергії.

Ключові слова: агломераційна шихта, залізорудні котуни, газодинамічні характеристики, пористість, завантажувальний лоток, палета, тепло-масообмін, сегрегація, фракційний склад, середній діаметр.

ABSTRACT

Mnykh A.S. Improvement of the automated control system for sintering agglomeration mix on the sintering belt.

Master's qualification work for obtaining higher education in 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, 2024.

The work presents a comprehensive study aimed at developing and improving the energy efficiency of granulating bulk materials with a reduction in solid fuel consumption by managing segregation processes. This allows for stabilization of the thermal processing regime of the material across the layer's horizontal levels during the agglomeration of iron ore materials.

The scientific foundations for enhancing the energy efficiency of the fuel crushing process have been further developed. A new crushing scheme is proposed to reduce the impact of abrasive loads on the material being crushed. A mathematical description of the thermal processes in a stationary layer of mono- and polydisperse materials has been implemented, taking into account internal energy sources.

Keywords: agglomeration mix, iron ore pellets, gas-dynamic characteristics, porosity, loading chute, pallet, heat and mass transfer, segregation, particle size distribution, average diameter.

ЗМІСТ

Вступ…… 7
1 Загальна частина…… 12
1.1 Дослідження динаміки процесу формування шару аглошихти, підготовленої до теплової обробки……... 12
1.2 Дослідження систем завантаження полідисперсної шихти…….. 24
1.3 Використання лотка з сепаратором для завантаження шихти….. 27
1.4 Використання лотка з криволінійною поверхнею……. 31
1.5 Завантаження шихти без використання лотка……... 32
1.6 Використання модифікованого зіставного лотка…….. 34
1.7 Дослідження газодинамічних характеристик шару полідисперсної шихти, підготовленої до спікання…….. 44
2 Експериментальна частина…….. 56
2.1 Оптимізація структури шару агломераційної шихти з метою стабілізації теплового режиму процесу спікання…… 56
2.2 Дослідження впливу теплового режиму процесу спікання на якісні показники агломерату……. 64
2.3 Вплив структури шару агломераційної шихти підготовленої до теплової обробки на кількість шкідливих викидів в атмосферу…… 70
Висновки…… 77
Перелік джерел посилань……. 80

ВСТУП

Актуальність теми. Агломераційні машини конвеєрного типу є дуже складними енергетичними системами, що забезпечують теплову обробку дрібнодисперсних концентратів й представляють один з найбільш енерговитратних етапів аглодоменного переділу. Дослідження показують, що питомі витрати палива у агломераційних машинах вітчизняних промислових підприємств значно вищі ніж цей же показник у західних країнах. Кількість шкідливих викидів у атмосферу також залежить від ефективності роботи агрегатів. Використання сучасних технічних рішень, впровадження раціональних методів підготовки матеріалу, розробка й оптимізація систем виробництва, розподілу й використання енергетичних ресурсів, стабілізація теплового режиму теплової обробки сипучого матеріалу, зменшення питомої витрати палива значною мірою зумовлює конкурентоспроможність продукції, рівень виробництва та його відповідність світовим вимогам.

Якісну й енергоефективну теплову обробку шару сипучого матеріалу на машинах конвеєрного типу можна реалізувати за допомогою керування процесами сегрегації часток у шарі, підготовки твердого палива. Важливе значення для забезпечення бажаного й рівномірного температурного поля у шарі матеріалу мають його газодинамічні характеристики, які обумовлюють ширину й швидкість переміщення високотемпературної зони. Таким чином, необхідність забезпечення оптимального розподілу палива з урахуванням скорочення його питомого вмісту й мінімізації перепаду тиску у шарі матеріалу під час його теплової обробки для стабілізації теплового режиму спікання є важливою науково-практичною проблемою. Скорочення загального споживання твердого палива технологічними агрегатами окрім зниження собівартості продукції дозволить зменшити обсяги шкідливих викидів у атмосферу.

Мета дослідження. Підвищення енергоефективності технологічних процесів згрудкування за рахунок оптимізації формування структури шару сипучого матеріалу, що дозволяє стабілізувати температурний режим обробки й скоротити обсяг споживання твердого палива.

Завдання дослідження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати й узагальнити наукову інформацію щодо сучасних напрямків удосконалення процесів теплообміну при згрудкуванні матеріалів на машинах конвеєрного типу;

2. Теоретично обґрунтувати вплив підсилення сегрегаційних процесів у шарі на вирівнювання теплового режиму згрудкування матеріалу;

3. Розробити методику ідентифікації структури шару шихтових матеріалів, підготовленого до спікання;

4. Встановити дослідним шляхом вплив гранулометричного складу шихти на розподіл твердого палива й хімічних компонентів по горизонтах шару;

5. Розвинути дослідження із вивчення впливу сегрегації класів крупності сипучого матеріалу й швидкості фільтрації продуктів згоряння на газодинамічні характеристики високого шару полідисперсної шихти, підготовленої до спікання;

6. Дослідити динаміку процесів формування шару сипучого матеріалу при використанні завантажувальних пристроїв різноманітних конструкцій;

7. Провести аналіз енергоефективності заходів щодо посилення сегрегаційних процесів у шарі матеріалу за рахунок використання нових завантажувальних вузлів. Шляхом напівпромислового експерименту оцінити потенціал скорочення споживання палива, встановити вплив оптимізації структури шару на кількість шкідливих викидів в атмосферу.

Об'єкт дослідження – сегрегаційні процеси при згрудкуванні сипучих матеріалів у стаціонарних шарах.

Предмет дослідження – вплив процесів сегрегації на енергоефективність й якість згрудкування сипучих матеріалів у стаціонарних шарах.

Методи дослідження.

При виконанні роботи використовувались методи математичного та фізичного моделювання, методи математичної статистики й пасивного експерименту, ситовий метод аналізу гранулометричного складу й параметрів шару згрудкованої шихти, спектральний метод аналізу хімічного складу гранул матеріалу, балансовий метод аналізу теплових процесів.

Наукова новизна отриманих результатів.

Теоретично обґрунтований, підтверджений результатами математичного моделювання й напівпромислового експерименту потенціал підвищення енергоефективності процесів згрудкування залізорудних матеріалів шляхом підсилення сегрегаційних процесів у шарі, що обумовлює збільшення нерівномірності розподілу твердого палива й хімічних компонентів по висоті завантаженого матеріалу, покращення газодинамічних характеристик й стабілізацію теплового режиму обробки останнього.

1. Отримали подальший розвиток наукові основи ідентифікації структури шару сипучого матеріалу, що вперше дозволило у динаміці встановлювати розподіл твердого палива й хімічних компонентів по висоті сформованого шару.

2. Експериментально підтверджено вплив сегрегаційних процесів на структуру шару й стабілізацію температури зони горіння у раціональному діапазоні температур 1280...1340° С при агломерації залізорудних матеріалів.

3. Отримали узагальнення й подальший розвиток теоретичні основи динаміки структуроутворення шару сипучого матеріалу при використанні різноманітних типів завантажувальних пристроїв.

4. Експериментально встановлено значення коефіцієнтів тертя кочення і ковзання по поверхні відкосу шару та лотка залежно від вологості й гранулометричного складу часток матеріалу.

5. Наведено вплив конструктивних характеристик зіскладного завантажувального лотка на формування структури полідисперсного матеріалу з заданими газодинамічними характеристиками й необхідним розподілом твердого палива по висоті шару.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено та впроваджено технологію завантаження матеріалу на базі конструкції зіскладного двоступеневого завантажувального лотка (Патент України на корисну модель №110975)

2. Отримала подальший розвиток методологія ідентифікації структури шару шихтових матеріалів, яка дозволяє в режимі реального часу оцінювати розподіл фракційного складу шихти по горизонтах.

Особистий внесок здобувача. Основні ідеї досліджень, концепція роботи, її положення й принципи розроблені автором самостійно. У дослідженні особливостей металургійних процесів брали участь співробітники ВАТ «Запоріжсталь», що знайшло відображення у спільних публікаціях.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення, результати та висновки наукового дослідження доповідались автором, обговорювались та отримали схвальні відгуки на конференціях. X Міжнародна науково-практична конференція «Перспективные вопросы мировой науки», м. Софія, Болгарія, 2015 р.

Публікації. Основні результати роботи викладені в збірці магістерських робіт і в тезах I Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувач вищої освіти, аспірантів та молодих вчених «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України»

Структура та обсяг магістерської роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, двох розділів, висновків, переліку джерел посилання з 26 найменувань, викладена на 82 сторінках машинописного тексту, включаючи 37 рисунків, 2 таблиць та 11 слайдів ілюстрованого матеріалу презентації.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Дослідження динаміки процесу формування шару аглошихти, підготовленої до теплової обробки

Енергоефективність та продуктивність аглопроцесу значною мірою залежать від теплового режиму спікання шихтових матеріалів, який визначається характером розподілу твердого палива та хімічних компонентів за висотою шару. Останнє залежить від особливостей завантаження та сегрегації фракцій матеріалу за горизонтами шихти, підготовленої до спікання. Завантаження шихти, своєю чергою, залежить від типу завантажувального пристрою, конструктивні особливості якого впливають на процес формування шару матеріалу і, як наслідок, на фракційний склад окремих горизонтів шихти, укладеної на палети. Таким чином, дослідження динаміки процесу формування шару полідисперсного сипучого матеріалу є актуальною науковою та практичною задачею.

Наразі існує понад 20 систем і пристроїв для регулювання та управління подачею і укладкою шихти на агломераційну стрічку. У роботі [1] наведено спосіб завантаження шихти на спікальні візки шляхом використання енергії стисненого повітря. Обробка шихти повітрям під час завантаження призводить до сегрегації частинок за розміром, а також до перерозподілу за висотою шару палива і вапняку. Пневматична система завантаження дозволяє отримати шар шихти з більш пухкою структурою. Однак подібна система значно ускладнює завантажувальний вузол агломашини, ускладнює умови роботи агломератників через підвищену запиленість. Крім того, відбувається підсушування гранул шихти, що збільшує віднесення частинок твердого палива, фракційний склад якого становить близько 0,5 – 1 мм.

Запропонована в роботі [2] заміна нахиленого відбивного листа на грохіт зі змінним перерізом отворів має на меті підвищити ступінь сегрегації шихти. Проте, окрім складності запропонованої конструкції, для працездатності цього завантажувального пристрою потрібне постійне очищення валків через налипання на них частинок шихти. Завантажувальний пристрій такої конструкції придатний для експлуатації лише при виробництві залізорудних окатишів.

Численні модифікації завантажувальних пристроїв наведені у роботах [3, 4, 5, 6]. У них пропонується посилити сегрегацію шихти за допомогою різних пристроїв у вигляді додаткового барабана та завантажувального лотка, додаткового транспортера, який встановлюється замість відбивного листа, барабана після відбивного листа тощо.

Заслуговує на увагу пристрій для посилення сегрегації за висотою, що являє собою підпружинену направляючу балку з закріпленим на ній очисним ножем вигнутої вниз форми. Однак на практиці описані завантажувальні пристрої не застосовуються. Істотним недоліком таких завантажувальних пристроїв є те, що вони мають лише один ступінь свободи. Кут нахилу завантажувального лотка, навіть із модифікаціями, пов’язаний із висотою шару шихти синусоїдальною залежністю. Збільшення висоти шару шихти до 0,40 м призводить до зменшення кута нахилу завантажувального лотка до 38,6º, тоді як кут природного укосу підготовленої до спікання шихти становить 39-45º. Тому регулювати ступінь сегрегації шихти за допомогою таких завантажувальних систем практично неможливо.

Аналіз динаміки сегрегаційних процесів, що відбуваються при формуванні шару шихти внаслідок використання завантажувальних пристроїв різного типу, проводився у роботах [7, 8]. У них закладено основи методики розрахунку розділення фракцій шихтових матеріалів у процесі їх руху по поверхні завантажувального пристрою та укосу шару.

Результати моделювання теплового режиму процесу спікання [9] дозволили зробити висновок, що створення спрямованої сегрегації гранулометричного складу шихти за висотою шару дозволить забезпечити необхідний розподіл палива та хімічних компонентів, тим самим стабілізувати температуру зони горіння. Останнє спрямоване на підвищення продуктивності агломашин за умови скорочення витрат твердого палива та підвищення міцності агломерату.

Формування шару агломерованого матеріалу в виробничих умовах здійснюється за допомогою системи, що складається з вібраційного або барабанного живильника у поєднанні з завантажувальним лотком. Сипучий матеріал, який рухається по поверхні завантажувального лотка і укосу шару під дією гравітаційних сил, являє собою сукупність частинок, форма яких близька до сферичної (рис. 1.1).

Зазначена схема завантаження агломераційної шихти сприяє розшаруванню матеріалу за крупністю. У результаті дрібні частинки переважно зосереджуються у верхніх горизонтах, а великі скочуються до основи формованого шару. Оскільки ступінь розпушення рухомого по лотку сипучого матеріалу значний, особливо при використанні вібраційного живильника, цей потік можна розглядати як сукупність окремих частинок, що досить вільно переміщуються по похилій площині.

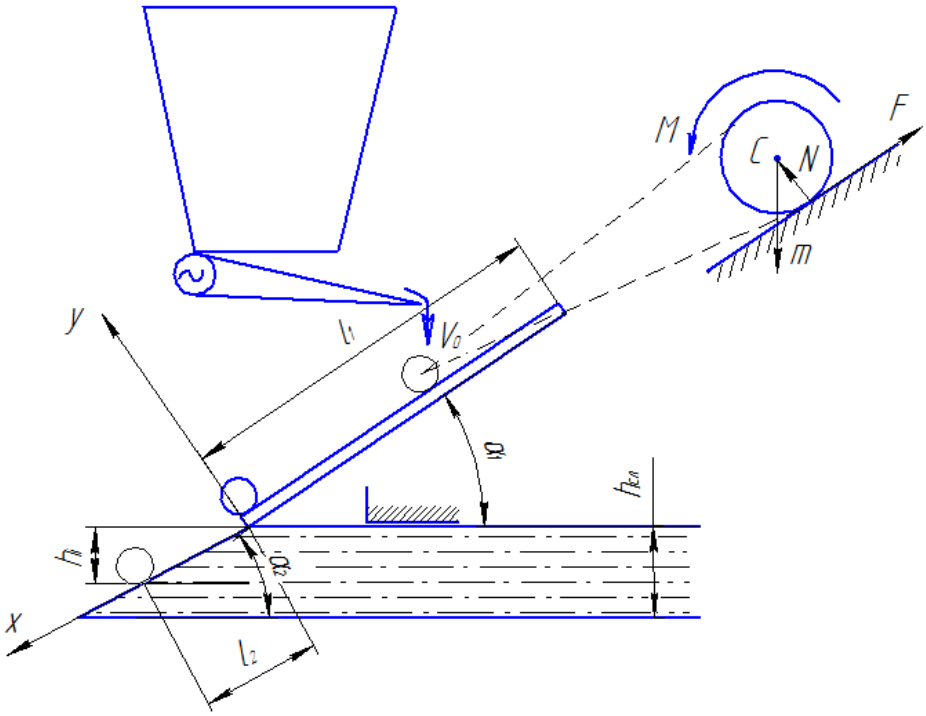


Рисунок 1.1 - Схема завантаження шихти під час використання прямолінійного лотка

Виходячи з того, що окрему частинку шихти з достатнім ступенем наближення розглядатимемо як кулю, що вільно рухається по похилій площині, диференціальне рівняння плоского руху набуде вигляду [7]:

$$\begin{cases} \dfrac{m}{q}\cdot\dfrac{d^2x_c}{dt^2} = m\sin\alpha - F \\ \dfrac{m}{q}\cdot\dfrac{d^2y_c}{dt^2} = m\cos\alpha - N, \\ I_z\cdot\dfrac{d^2\varphi}{dt^2} = F\cdot r - M \end{cases} \qquad (1.1)$$

де: x_c, y_c – координати центру тяжкості частки, м; r – радіус частки, м;

m – вага частки, Н; $N = m\cos\alpha$ – нормальна реакція похилої площини, Н;

F – сила тертя, Н; φ – кут повороту частки, рад; α – кут нахилу лотка, рад;

I_z – момент інерції тіла щодо центральної осі; q – прискорення вільного падіння, м/с²; $M = m\cos\alpha \cdot r \cdot f'$ – момент тертя кочення, Н·м; f' – коефіцієнт тертя кочення частинки по сталевому лотку.

Рух частки може здійснюватися у кількох режимах: кочення, ковзання, кочення зі ковзанням. Розглянемо рух частинки в режимі чистого кочення, так як тільки в цьому режимі відбувається поділ часток різного розміру за швидкістю їх сходу з завантажувального лотка, тим самим забезпечуючи сегрегацію матеріалу за класами крупності.

За умови кочення частинки без ковзання точка її зіткнення з лотком є миттєвим центром швидкостей. Позначивши кутову швидкість частки через ω, отримаємо:

$$V_c = r\omega, \tag{1.2}$$

де V_c – швидкість руху центру частки шихти, м/с.

Звідси:

$$\frac{dx_c}{dt} = r\frac{d\varphi}{dt};$$

чи

$$\frac{d^2x_c}{dt^2} = r\frac{d^2\varphi}{dt^2}.$$

Так як рух часки плаский ($\frac{d^2y_c}{dt^2} = 0$), з системи рівнянь (1.1) знайдемо F:

$$F = m(\mu \sin\alpha_1 + f' \upsilon \cos\alpha_1), \tag{1.3}$$

де μ – коефіцієнт форми частинки для кулі $\mu = \frac{\rho^2}{\rho^2 + r^2} = \frac{2}{7}$ [235]; $\upsilon = 1 - \mu$, для шару $\upsilon = \frac{5}{7}$; ρ – радіус інерції частки, м.

Підставивши (1.3) у рівняння системи (1.1), отримаємо:

$$\frac{d^2 x_c}{dt^2} = q\upsilon(\sin\alpha_1 - f' \cos\alpha_1). \tag{1.4}$$

Проінтегрувавши обидві частини рівняння (5.4), отримаємо миттєву швидкість руху частинки по похилій площині:

$$\frac{dx_c}{dt} = q\upsilon(\sin\alpha_1 - f' \cos\alpha_1)\mathrm{t} + \mathrm{V}_0, \tag{1.5}$$

де V_0 – Початкова швидкість руху частинки, м/с.

Довжина шляху окремої частки становитиме:

$$x_c = \frac{q\upsilon(\sin\alpha_1 - f' \cos\alpha_1)\mathrm{t}^2 + \mathrm{V}_0 t}{2}. \tag{1.6}$$

Знаючи довжину шляху частинки по лотку, $x_c = l_1$, вирішимо рівняння (1.6) відносно t і визначимо час кочення частинки шихти по похилій площині:

$$t = \frac{-2V_0 + \sqrt{4V_0^2 + 8q\upsilon l_1(\sin\alpha_1 - f^{'}\cos\alpha_1)}}{2q\upsilon(\sin\alpha_1 - f^{'}\cos\alpha_1)} . \qquad (1.7)$$

Підставив значення t в (1.5), знайдемо кінцеву швидкість кочення частки по лотку довжиною l_1:

$$V = \sqrt{2ql_1\upsilon(\sin\alpha_1 - f^{'}\cos\alpha_1) + \mathrm{V}_0^2} . \qquad (1.8)$$

Наведений випадок чистого кочення частинки похилої площини може бути розглянутий тільки за умови дотримання умови:

$$m(\mu\sin\alpha + f^{'}\upsilon\cos\alpha) \le \mathrm{m}\, f\cos\alpha ; \qquad (1.9)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання частинки по лотку.

Значення коефіцієнтів $f^{'}$, f отримані експериментально [9, 10], згідно методикам [11, 12].

Дослідні дані щодо визначення коефіцієнта тертя кочення частинки по поверхні завантажувального лотка, представлені на рис.1.2.

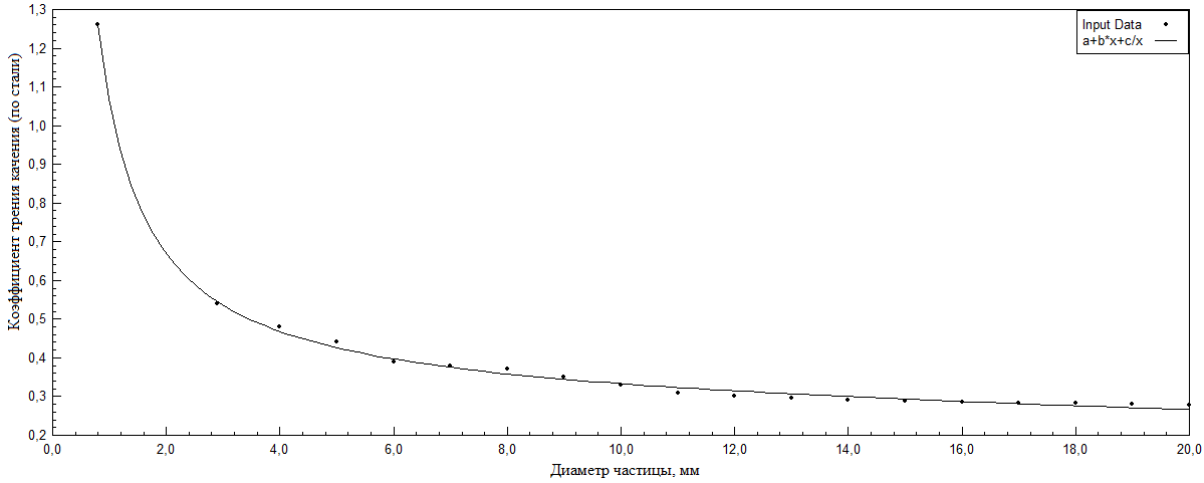


Рисунок 1.2 - Залежність коефіцієнта тертя кочення діаметром частинок шихти

Результати досліджень зміни коефіцієнта тертя ковзання агломераційної шихти по поверхні лотка та укосу шару, залежно від її вологості, представлені на рис. 1.3.

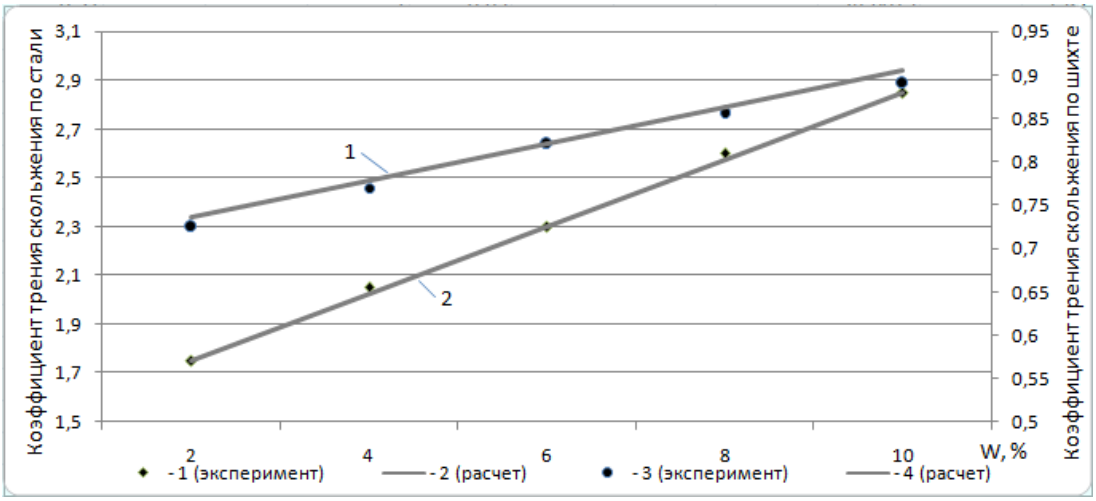


Рисунок 1.3 - Залежність коефіцієнта тертя ковзання шихти по сталі та шихти по шихті від вологості матеріалу

Для визначення коефіцієнта тертя кочення гранул поверхнею маси агломераційної шихти, використана методика, описана в [12]. В результаті проведення експериментів отримано дані, подані на рис. 1.4.

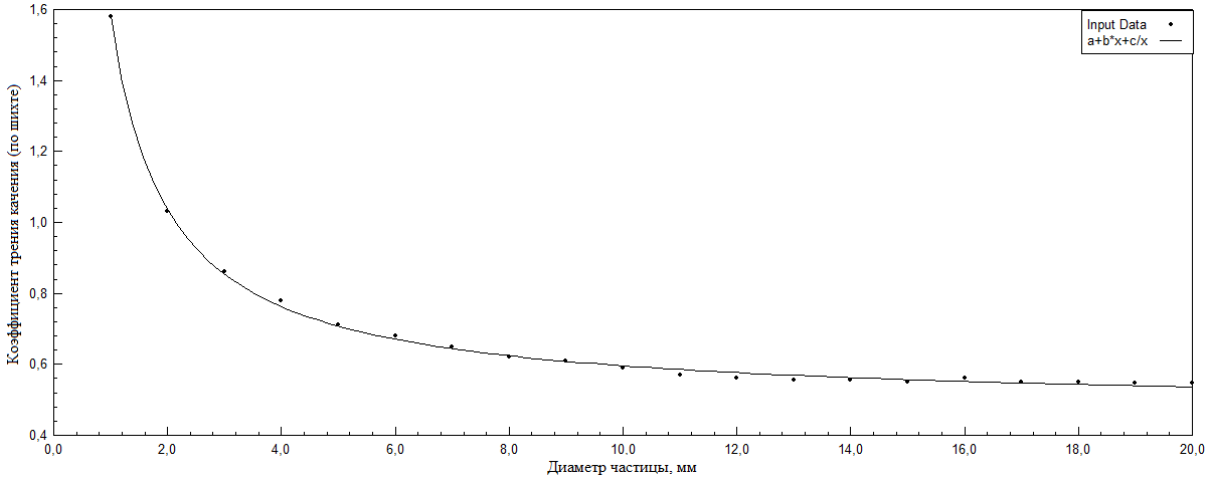


Рисунок 1.4 - Залежність коефіцієнта тертя кочення по шихті від діаметра частки.

Визначивши значення коефіцієнтів $f^{'}$, f, з рівняння (1.9) получим:

$$tg\alpha \le \frac{f - f^{'}\upsilon}{\mu} . \qquad (1.10)$$

У режимі рівноприскореного руху $\frac{d^2x_c}{dt^2} > 0$, тоді з (1.4) получим:

$$f^{'} < tg\alpha . \qquad (1.11)$$

Виходячи з обмежень (5.10) (5.11), можна зробити висновок, що режим чистого кочення кулястої частинки по лотку може мати місце за умови:

$$f^{'} < tg\alpha < \frac{f - f^{'}\upsilon}{\mu} . \qquad (1.12)$$

Якщо $tg\alpha > \frac{f - f'\upsilon}{\mu}$, то кочення частки шихтового матеріалу супроводжується ковзанням, тим самим порушуючи процеси сегрегації в шарі матеріалу, підготовленого до спікання.

Після сходу частинок із завантажувального лотка вони рухатимуться по поверхні укосу шару з кутом нахилу α_2. Для випадку чистого кочення частинки по поверхні завантажувального лотка та укосу шару матеріалу кінцева швидкість її руху складе:

$$V = \sqrt{2ql_2\upsilon(\sin\alpha_2 - f_2'\cos\alpha_2) + 2ql_1\upsilon(\sin\alpha_1 - f_1'\cos\alpha_1) + V_0^2}, \quad (1.13)$$

де l_1, l_2 – шлях пройдений часткою по поверхні лотка та матеріалу, м;

f_1', f_2' – коефіцієнт тертя кочення по поверхні лотка та укосу матеріалу.

Враховуючи, що відстань між краєм робочого органу живильника та поверхнею лотка незначна, можна умовно прийняти $V_0 = 0$. Для визначення розподілу різних фракцій матеріалу по горизонтах необхідно розрахувати довжину шляху, яку проходить *i*-я частка по поверхні укосу шару, що формується. Прийнявши умову, що $V_i = 0$ у момент зупинки окремої частки на поверхні укосу, отримаємо:

$$2ql_2\upsilon(\sin\alpha_2 - f_2'\cos\alpha_2) + 2ql_1\upsilon(\sin\alpha_1 - f_1'\cos\alpha_1) = 0. \quad (1.14)$$

Розвязавши (1.14) відносно l_2, отримаємо шлях, пройдений окремою частинкою по поверхні шару, що формується:

$$l_2 = \frac{l_1(\sin\alpha_1 - f_1^{'}\cos\alpha_1)}{f_2^{'}\cos\alpha_2 - \sin\alpha_2} \quad . \qquad (1.15)$$

Принявши, що $h_i = l_2\cos\alpha_2$, запишемо рівняння, що характеризує розподіл частинок за висотою шару:

$$h_i = \frac{l_1(\sin\alpha_1 - f_1^{'}\cos\alpha_1)\sin\alpha_2}{f_2^{'}\cos\alpha_2 - \sin\alpha_2} \quad . \qquad (1.16)$$

Таким чином, знаючи швидкість сходу *i*-й частинки шихти із завантажувального лотка, яка залежить від її розміру, та відповідного їй коефіцієнта тертя, можна визначити дальність кочення частинки. Результати розрахунків розподілу фракційного складу шихти за висотою шару із застосуванням прямолінійного лотка представлені на рис. 1.5.

Дані про реальний розподіл фракційного складу сипучого матеріалу, крива 2, отримані експериментально, шляхом розсіву проб шихти підготовленої до спікання при завантаженні прямолінійним лотком, спільно з вібраційним та барабанним живильником, агломашини №4 та №2 МК «Запоріжсталь» відповідно.

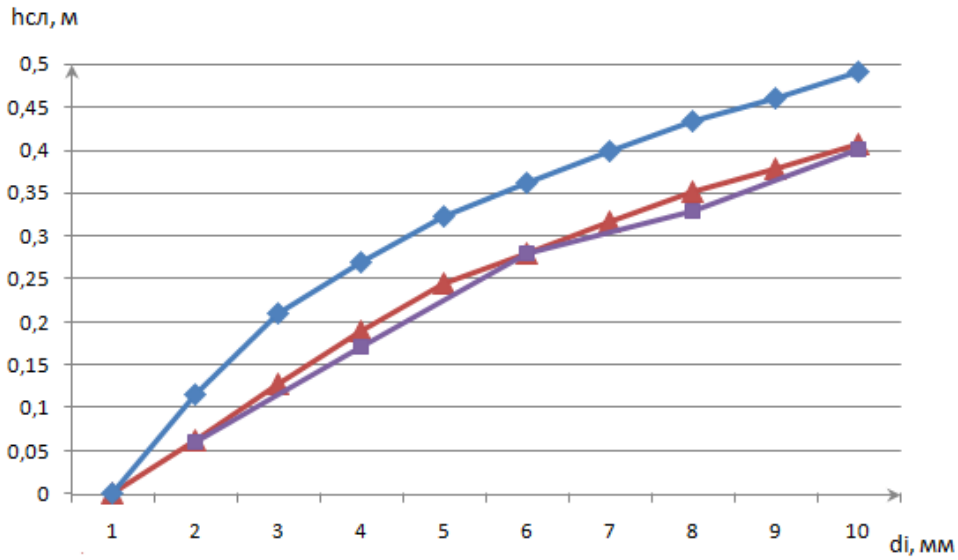


Рисунок 1.5 - Зміна фракційного складу матеріалу за висотою шару

При порівнянні кривих 1 та 2 рис. 1.5, можна зробити висновок про хорошу збіжність експериментальних та розрахункових даних. Кут нахилу завантажувального лотка α_1 для випадку формування шару шихти заввишки 400 мм. 51°. Однак в даний час на комбінаті переходять до спікання шихти у високих шарах до 500 мм. Для формування шару такої висоти, крива 3 рис. 1.5 необхідно збільшити кут нахилу завантажувального лотка до 57°.

Слід зауважити, що за такого вугілля нахилу не дотримується умова (1.12) і режим руху частинки переходить від чистого кочення до кочення зі ковзанням. Останнє не дозволяє забезпечити необхідну сегрегацію класів крупності шихтового матеріалу, і, отже, необхідний розподіл твердого палива в шихті.

Таким чином, необхідно провести подальші дослідження та вибір системи завантаження аглошихти з метою забезпечення максимально

близького до оптимального розподілу класів крупності шихтового матеріалу.

1.2 Дослідження систем завантаження полідисперсної шихти

Питання розробки завантажувальних пристроїв конвеєрних машин присвячено безліч робіт [3, 4, 5, 6-8]. Аналіз динаміки сегрегаційних процесів, що протікають при формуванні шару шихти [13], дозволив зробити висновок, що для розташування дрібних фракцій у верхній частині шару необхідно, щоб їх швидкість при сході з завантажувального лотка, дорівнювала нулю, а великі частинки повинні мати достатню кінетичну енергію, досягнення ними нижніх горизонтів шару. При використанні прямолінійних завантажувальних лотків з постійним кутом нахилу та коефіцієнтом тертя, виконати першу умову неможливо, т.к. кут нахилу лотка повинен бути меншим за кут зовнішнього тертя дрібної фракції, яка не може самостійно переміщатися по його поверхні. До того ж результати розрахунків розподілу фракційного складу шихти при використанні прямолінійного лотка, показали, що для умов формування шару шихти висотою 500 мм і більше застосування такого лотка не дозволяє забезпечити необхідне поділ класів крупності матеріалу по висоті палети.

Для посилення сегрегаційних процесів, що протікають у шарі матеріалу, що завантажується, можна використовувати лоток зі змінним кутом нахилу, що забезпечує попередній розгін частинки з подальшим її гальмуванням на більш пологій ділянці. Останнє дає можливість значну частину поверхні лотка розташувати під кутом великим кутом зовнішнього тертя дрібної фракції шихти, що зменшить її налипання на площину руху, та покращить технологічні характеристики завантажувального вузла.

У роботі [13] представлені система диференціальних рівнянь плоского руху і залежності, що дозволяють розрахувати швидкість руху і

шлях прохідний і-й частинкою по поверхні лотка і укосу шару, що формується. Аналогічно для випадку лотка зі змінним кутом нахилу, рис. 1.6 для режиму чистого кочення на ділянці l_1,швидкість руху частки на ділянці l_2 складе:

$$V_2 = \sqrt{2ql_2\upsilon(\sin\alpha_2 - f_2^{'}\cos\alpha_2) + \mathrm{V}_1^2}\,, \qquad (1.17)$$

де q - прискорення вільного падіння, м/с²; $f^{'}_2$ - коефіцієнт тертя кочення частинки по сталевому лотку; υ - коефіцієнт форми частки для кулі $\upsilon = \frac{5}{7}$.

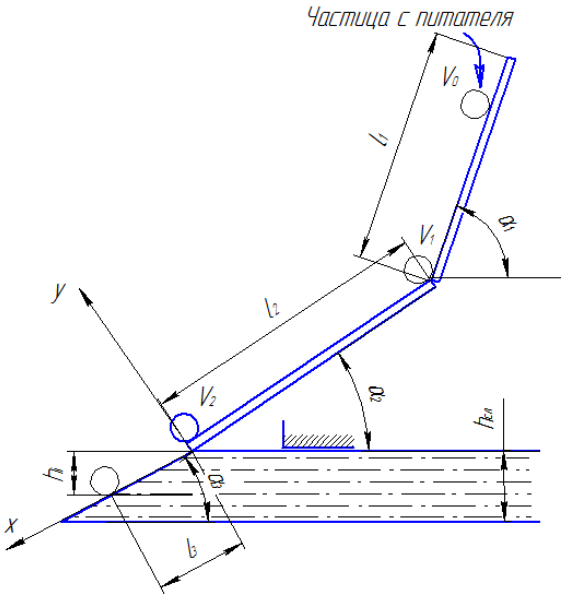


Рисунок 1.6 - Схема руху частинки по лотку зі змінним кутом нахилу

Виходячи з того, що початкову швидкість руху матеріалу на ділянці l_1 можна умовно прийняти близькою нулю ($V_0 = 0$), та кінцева швидкість

руху *i*-й частки в момент її зупинки на поверхні укосу також дорівнює $V_i = 0$, получим:

$$2ql_3\upsilon(\sin\alpha_3 - f_3^{'}\cos\alpha_3) + 2ql_2\upsilon(\sin\alpha_2 - f_2^{'}\cos\alpha_2) + 2ql_1\upsilon(\sin\alpha_1 - f_1^{'}\cos\alpha_1) \quad (1.18)$$

Вирішивши (1.18) щодо l_3 можна розрахувати шлях, пройдений окремою частинкою по укосу шару, що формується, після її сходу з поверхні лотка:

$$l_3 = \frac{l_2(\sin\alpha_2 - f_2^{'}\cos\alpha_2) + l_1(\sin\alpha_1 - f_1^{'}\cos\alpha_1)}{f_3^{'}\cos\alpha_3 - \sin\alpha_3} . \quad (1.19)$$

Для виведення рівняння, що характеризує розподіл фракцій матеріалу по висоті шару, приймемо $h_i = l_3\cos\alpha_3$, звідки:

$$h_i = \frac{(l_2(\sin\alpha_2 - f_2^{'}\cos\alpha_2) + l_1(\sin\alpha_1 - f_1^{'}\cos\alpha_1))\cos_3}{f_3^{'}\cos\alpha_3 - \sin\alpha_3} . \quad (1.20)$$

Для забезпечення необхідного рівня сегрегації швидкість сходу дрібної фракції з другого ступеня завантажувального лотка повинна становити $V_2 = 0$. Таким чином, із рівняння (1.19), довжина шляху, що проходить дрібною фракцією, повинна становити $l_3 = 0$.

В результаті розрахунків визначено конструктивні характеристики лотка із змінним кутом нахилу робочих поверхонь, які склали: $l_1 =$ 0,6 м,

l_2 =0,4 м и α_1 =56°, α_2 =43°, відповідно. Завантажувальний лоток з такими характеристиками дозволяє забезпечити найкращу, для даної конструкції лотка, сегрегацію матеріалу. Отриманий розподіл фракційного складу шихти подано на рис. 1.10, крива 1.

1.3 Використання лотка з сепаратором для завантаження шихти

Підвищити сегрегацію маси матеріалу, що завантажується, можна шляхом поділу її на окремі фракції, які потім укласти на задані горизонти шару, що формується. Зазначений поділ може бути досягнутий при використанні лотка з прямолінійною верхньою ділянкою і закругленим нижнім рис. 1.7.

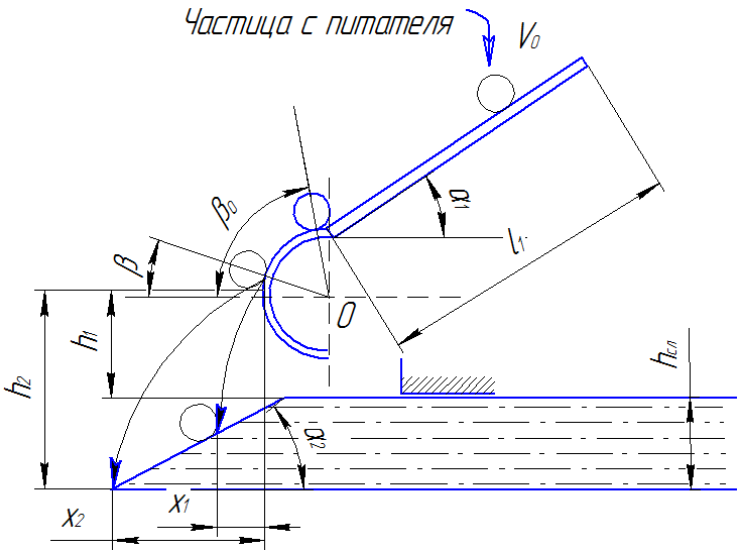


Рисунок 1.7 - Схема руху частинки по лотку із сепаратором

На прямолінійній ділянці, частинки досягають певної швидкості скочування, яка залежить від їх фізико-хімічних характеристик, а нижня ділянка, буде виконувати функцію сепаратора, за рахунок чого частинки

переходитимуть на повітряну ділянку траєкторії, тим самим знижуючи їхню взаємодію.

Рух частки у повітрі опишемо системою рівнянь:

$$\begin{cases} \dfrac{d^2x}{dt^2} = 0 \\ \dfrac{d^2y}{dt^2} = -q \end{cases}, \qquad (1.21)$$

де h - відстань від точки відриву частинки до поверхні укосу шару, м.

Початкові умови руху: $t = 0;\ x = 0;\ y = h$.

Представимо вектор швидкості руху частки у повітрі у вигляді двох векторів:

$$\begin{cases} V_x = V\cos\beta \\ V_y = -V\sin\beta \end{cases}. \qquad (1.22)$$

Після інтегрування рівняння (1.21) та визначення постійних інтегрування, запишемо:

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = V\cos\beta \\ \dfrac{dy}{dt} = -V\sin\beta - qt \end{cases}. \qquad (1.23)$$

Інтегруючи (5.23), та визначивши постійні інтегрування, отримаємо координати частки в момент її падіння на аглострічку:

$$\begin{cases} x = Vt\cos\beta \\ y = -Vt\sin\beta - \dfrac{qt^2}{2} + h \end{cases}. \qquad (1.24)$$

Виразивши t з першого рівняння системи (1.24) і підставивши на друге, отримаємо:

$$y = -\frac{q}{2V^2\cos^2\beta}x^2 - xtg\beta + h. \qquad (1.25)$$

У момент падіння частки на аглострічку, $y = 0$. Вирішивши (1.25) відносно x, визначимо дальність польоту частки:

$$x = -\frac{\sin\beta V^2\cos\beta}{q} + \frac{V^3}{Rq^2}\sqrt{\sin^2\beta V^2 + 2qh}, \qquad (1.26)$$

де R-радіус кола сепаратора, м.

Розрахунок швидкості скочування частинки по криволінійній поверхні нижньої ділянки, реалізуємо, використавши теорему про збільшення кінетичної енергії тіла, що рухається в диференціальній формі:

$$d\left(\frac{mV^2}{2}\right) = \left(mq\sin\beta - mqf'\cos\beta - f'\frac{mV^2}{2}\right)ds, \qquad (1.27)$$

де m - маса частки, кг.

Швидкість руху частинки та кут її відхилення від вертикалі відраховується щодо зовнішньої системи координат. При скочуванні частка рухається у бік, що збігається з напрямком відліку кута β, звідси $ds = Rd\beta$. Приймемо $V_i^2 = y$ та отримаємо лінійне диференціальне рівняння з правою частиною:

$$\frac{dy}{d\beta} + 2f^{'}y = 2qR\left(-f^{'}\cos\beta + \sin\beta\right). \qquad (1.28)$$

Загальне рішення цього рівняння має вигляд:

$$y = ce^{-2f^{'}\beta} - \frac{6f^{'}qR}{1+4f}\sin\beta + 2qR\frac{(1-2f)\cos\beta}{1+4f}. \qquad (1.29)$$

Визначивши значення постійної інтеграції c, та прийнявши, що $\beta = \beta_0$, $y = y_0$, де $y_0 = f(\alpha_1, f^{'}, \mathrm{e}) = \mathrm{V}_i$, запишемо рішення рівняння (1.27):

$$V_i = \sqrt{\frac{2qR}{1+4f}\left((1+2f)\cos\beta - 3f^{'}\sin\beta\right) + \left(V_i^2 + \frac{2qR}{1+4f}\left(3f^{'}\sin\beta_0 - (1-2f)\cos\beta_0\right)\right)\frac{e^{2f^{'}\beta_0}}{e^{2f^{'}\beta}}}. \qquad (1.28)$$

Розподіл фракційного складу шихти при використанні лотка із сепаратором, з параметрами $R = 0{,}35$ м, $\beta_0 = 72{,}5°$, $\beta = 34°$, представлені на рис. 1.10, крива 2.

1.4 Використання лотка з криволінійною поверхнею

Завантаження полідисперсних матеріалів на палети агломашини можна проводити лотком з криволінійною поверхнею рис. 1.8, що забезпечує попередній розгін частинок шихти, з подальшим їх гальмуванням на більш пологій ділянці.

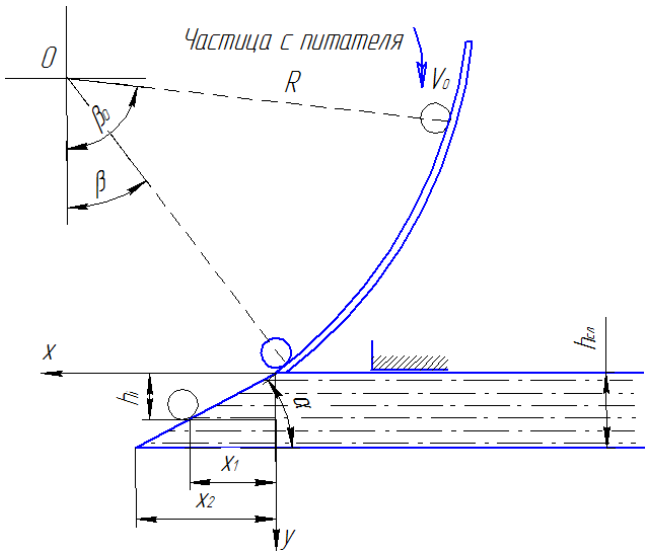


Рисунок 1.8 - Схема руху частинки по лотку з криволінійною поверхнею

Для розрахунку швидкості руху частинки по криволінійній поверхні лотка використовуємо (1.27). Так як при скочуванні, тіло рухається у бік протилежний напряму відліку кута β, то $ds = -Rd\beta$. Приймемо, що $V_i^2 = y$, тоді в результаті перетворень отримуємо:

$$\frac{dy}{d\beta} - 2f'y = 2qR\left(f'\cos\beta - \sin\beta\right). \qquad (1.29)$$

Розв'язання цього рівняння дасть швидкість руху *i*-ї частки:

$$V_i = \sqrt{\frac{2qR}{1+4f}\left(\begin{array}{l}\left(3f^{'}\sin\beta+\left(1-2f\right)\cos\beta\right)- \\ -\left(3f^{'}\sin\beta_0+\left(1-2f\right)\cos\beta_0\right)\dfrac{e^{2f^{'}\beta}}{e^{2f^{'}\beta_0}}\end{array}\right)}. \qquad (1.30)$$

Аналіз (1.30) показує, що крім конструктивних параметрів завантажувального лотка ($R=1{,}2$ м; $\beta_0=72{,}5°$; $\beta=41°$) умови руху частинки на його поверхні залежать від коефіцієнта тертя кочення $f^{'}$. Таким чином, при русі фракцій шихти по лотку відбуватиметься поділ їх кінцевих швидкостей. V_i , а, отже, і сегрегація матеріалу по висоті шару, що формується, крива 3, рис. 1.10.

1.5 Завантаження шихти без використання лотка

У разі завантаження шихти виключно живильником, без використання лотка, мал. 5.9 швидкість частки в момент її падіння на поверхню шару складе:

$$V_n = \sqrt{2qh}\,. \qquad (1.31)$$

Таким чином:

$$V_к = \sqrt{2ql\upsilon(\sin\alpha - f^{'}\cos\alpha)+\mathrm{V}_n^2}\,. \qquad (1.32)$$

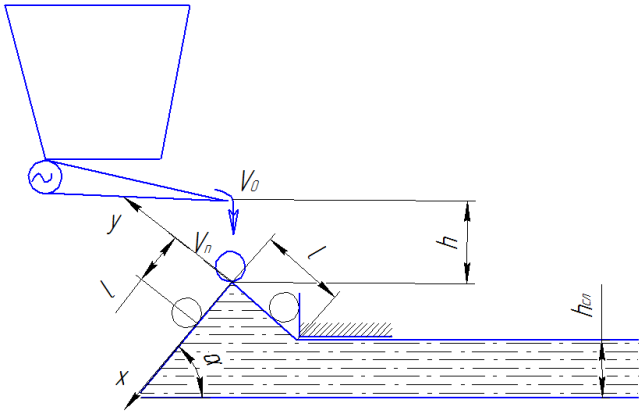


Рисунок 1.9 - Схема руху частки без використання завантажувального лотка

Прийнявши, що кінцева швидкість частки $V_к$ дорівнює нулю, в момент її зупинки на укосі шару, знайдемо шлях пройдений *i*-ю частинкою матеріалу.

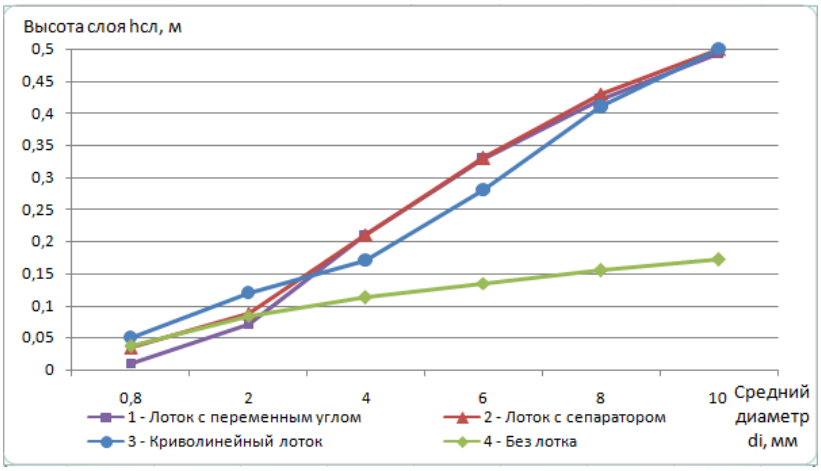


Рисунок 1.10 - Розподілення фракційного складу шихти за висотою шару

Як видно з рис. 1.10, крива 4, завантаження шихти у такий спосіб не забезпечує поділ класів крупності матеріалу по висоті шару, у зв'язку з тим, що частинки не набувають достатньої кінетичної енергії для переміщення у відповідний горизонт шару.

1.6 Використання модифікованого зіставного лотка

Розглянуті закономірності руху полідисперсного матеріалу по складній поверхні використані для розрахунку параметрів складеного завантажувального лотка, рис. 1.11 для використання спільно з вібраційним живильником для умов агломашини №1 МК «Запоріжсталь».

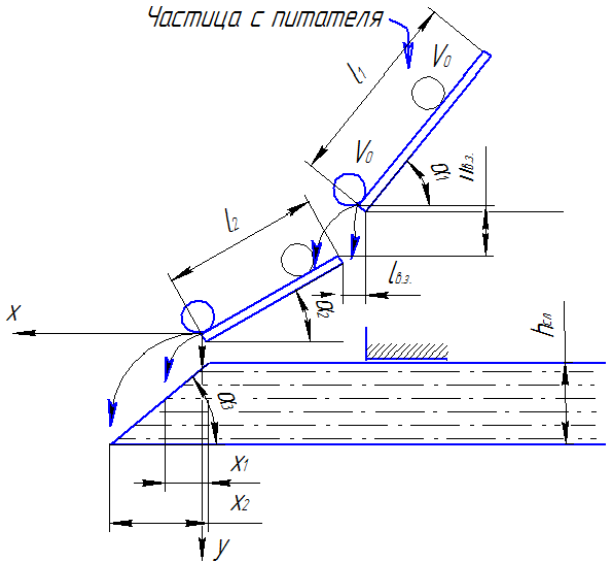


Рисунок 1.11 - Схема руху частинки по зіставному завантажувальному лотку

Основною особливістю даного лотка є наявність повітряного зазору між поверхнями руху, що дозволяє у зв'язку з малою кінетичною енергією дрібних фракцій, переважно концентрувати їх у верхніх горизонтах, як потрібно, за рахунок їх зсипання в повітряний зазор, що виконує роль сепаратора.

Швидкість руху частинок по поверхні лотка, пропорційна їх розмірам та фізико-механічним властивостям. За умови чистого кочення без ковзання частинки по поверхні завантажувального лотка кінцеву швидкість її руху виразимо у вигляді:

$$V_к = \sqrt{2ql_1\upsilon(\sin\alpha_1 - f_1^{'}\cos\alpha_1) + \mathrm{V}_0^2}\,, \qquad (1.33)$$

де q - прискорення вільного падіння, м/с²; $f^{'}_1$ - коефіцієнт тертя кочення частинки по сталевому лотку; υ - коефіцієнт форми частки; l_1 - довжина першої секції лотка, м; α_1 - кут нахилу лотка, °; V_0 - початкова швидкість руху частинки по поверхні лотка, м/с.

Якщо кочення частинки по поверхні лотка відбувається зі ковзанням, то $V_к = const$, отже, кінцева швидкість залежить від розміру фракцій матеріалу і такий режим руху забезпечує поділ класів крупності шихти.

Сила тяжіння, що діє на частинку, що відривається від нижньої кромки першої секції лотка, забезпечує переміщення останньої за час падіння t_i, з висоти $h_{в.з.}$, на відстань $l_{в.з.}$.

Час падіння частки t_i пов'язано зі швидкістю падіння наступною залежністю:

$$h_{в.з.} = V_n t_i + \frac{qt_i^2}{2}\,, \qquad (1.34)$$

де $V_n = V_к \sin\alpha_1$, м/с.

Вирішивши (1.34) відносно t_i, отримаємо:

$$t_i^2 + 2\frac{V_n}{q}t_i - 2\frac{h_{в.з.}}{q} = 0\,. \qquad (1.35)$$

Візьмемо дійсний корінь, що відповідає реальним умовам руху частки. Тоді:

$$t_i = -\frac{V_n}{q} + \sqrt{\left(\frac{V_n}{q}\right)^2 + 2\frac{h_{в.з.}}{q}} \,. \qquad (1.36)$$

Взявши опір повітряного середовища, на ділянці $l_{в.з.}$ близьким до нуля, які не надають істотного впливу на час польоту частки, запишемо:

$$V_n t_i = l_{в.з.} \text{, чи } t_i = \frac{l_{в.з.}}{V_к \cos\alpha_1} \,. \qquad (1.37)$$

Підставивши (5.37) у (5.36), отримаємо:

$$\frac{l_{в.з.}}{V_к \cos\alpha_1} = -\frac{V_к \sin\alpha_1}{q} + \sqrt{\left(\frac{V_к \sin\alpha_1}{q}\right)^2 + 2\frac{h_{в.з.}}{q}} \,. \qquad (1.38)$$

Вирішивши (1.38) відносно $V_к$, визначимо значення мінімальної швидкості частинки, що забезпечує її переліт через поперечний зазор складеного лотка, за його заданої величини.

$$V_{к_\min} = \sqrt{\frac{l_{в.з.}^2 q}{2\left(h_{в.з.}\cos^2\alpha_1 - l_{в.з.}\sin\alpha_1\right)}} \,. \qquad (1.39)$$

Дослідження впливу $h_{в.з.}$ та $l_{в.з.}$ на мінімальну швидкість частинки, що забезпечує її переліт через поперечний проміжок лотка, представлені на рис. 1.12, 1.13.

Максимально допустиму висоту зазору $h_{в.з.}$, що забезпечує переліт частки при заданому значенні $V_к$, опишемо залежністю:

$$h_{в.з._max} = \frac{l_{в.з.}^2 q + 2 l_{в.з.} \sin\alpha_1 V_к^2}{2 V_к^2 \cos\alpha_1} . \qquad (1.40)$$

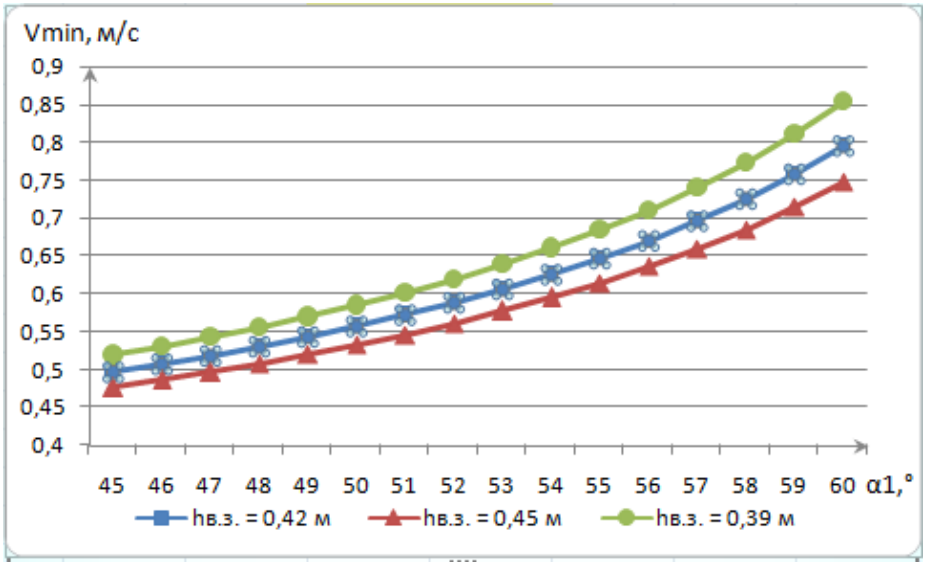


Рисунок 1.12 - Вплив $h_{в.з.}$ на мінімальну швидкість частки

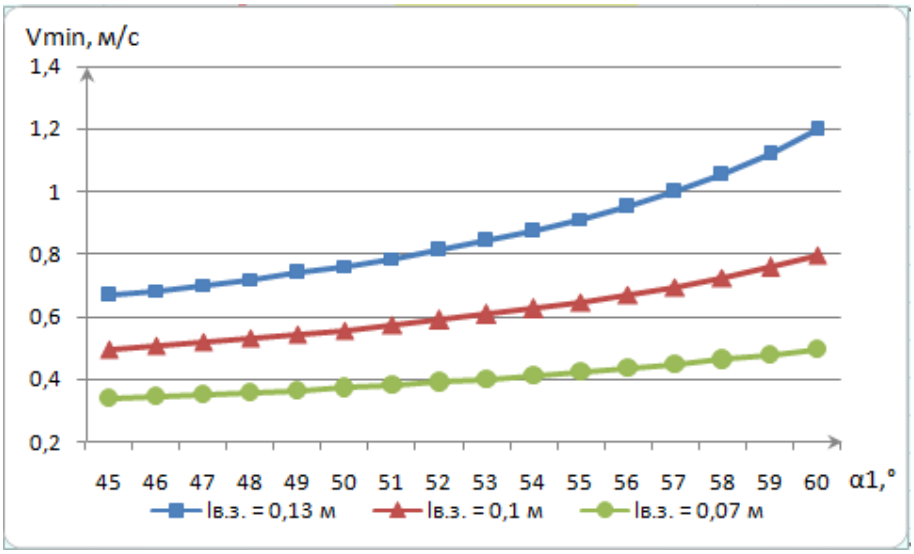


Рисунок 1.13 - Вплив $l_{в.з.}$ на мінімальну швидкість частки

Поперечний зазор на поверхні завантажувального лотка виконуватиме функцію сепаратора фракційного складу полідисперсного матеріалу лише у випадку, коли швидкість руху частинок $V_к$ визначатиметься їх розміром. Ця умова виконується лише за чистого кочення гранул шихти на поверхні лотка. У разі стаціонарного положення частин складеного завантажувального лотка: $\alpha_1 = const$; $l_{в.з.} = const$; $h_{в.з.} = const$; $V_0 = 0$, можна визначити граничне значення коефіцієнта тертя кочення *i*-ї частки, що забезпечує її переліт через повітряний зазор.

$$f'_1 = \frac{V_0^2 + l_1 \sin\alpha_1 - \dfrac{l_{в.з.}^2 q}{2\left(h_{в.з.} \cos^2\alpha_1 - l_{в.з.} \sin\alpha_1\right)}}{l_1 \cos\alpha_1}. \qquad (1.41)$$

Швидкість сходу частинки з другого ступеня завантажувального лотка, визначимо з виразу:

$$V_c = \sqrt{2ql_2\upsilon(\sin\alpha_2 - f_2^{'}\cos\alpha_2) + \mathrm{V}_к^2}\ . \qquad (1.42)$$

Згідно з отриманими рівняннями, керувати рухом завантажуваного матеріалу по зіскладному завантажувальному лотку, можна шляхом зміни ширини та висоти поперечного повітряного зазору $h_{в.з.}$, $l_{в.з.}$, довжина шляху розгону частки l_1, l_2 та кута нахилу поверхонь розгону α_1, α_2.

Для забезпечення заданого розподілу фракцій матеріалу по висоті шару необхідно, щоб окремі частинки, що надходять на поверхню укосу, мали певну швидкість руху, обумовлену їх фізико-механічними характеристиками:

$$V_{ci} = \sqrt{\frac{2qh_i\upsilon\left(f_3^{'}\cos\alpha_3 - \sin\alpha_3\right)}{\sin\alpha_3}}\ , \qquad (1.43)$$

де h_i - задане положення *i*-ї частинки у шарі щодо його поверхні, м; α_3 - кут нахилу укосу шару, град; $f_3^{'}$ - коефіцієнт тертя кочення по поверхні укосу шару.

Дрібні фракції (0,5-1 мм) агломераційної шихти не повинні перелітати повітряний зазор між першою і другою секціями складеного лотка, що забезпечує їхнє переважне скупчення на поверхні шару, що формується. У процесі руху матеріалу повітрям, значно знижується взаємодія між окремими частинками, складовими його масу. В результаті досягається якісніший поділ його по фракціях, ніж при безпосередньому переході частинок шихти з площини завантажувального лотка на укіс шару.

Після сходу частинок із завантажувального лотка, вони рухатимуться в повітрі параболічною траєкторією:

$$y_i = x_i tg\alpha_1 + \frac{qx_i^2}{2V_c^2 \cos^2 \alpha}, \qquad (1.44)$$

де y_i, x_i - переміщення *i*-ї частинки певного розміру щодо осей координат, м.

Вирішивши останнє рівняння щодо x_i, получим:

$$x_i = \frac{V_c^2 \sin^2 \alpha_1}{2q} \sqrt{1 + \frac{2qy_i}{V_c^2 \sin^2 \alpha_1}}.$$

Таким чином, знаючи швидкість сходу *i*-ї частинки шихти з завантажувального лотка, яка залежить від її розміру, і відповідного коефіцієнта тертя, можна визначити дальність польоту частинки. Розрахунковий розподіл фракційного складу матеріалу, при використанні прямолінійного та складеного завантажувального лотка, наведено на рис. 1.14.

Різні фракції сипкого матеріалу, що досягають нижньої кромки лотка, рухаються по ньому єдиним потоком, що обумовлює певне зниження ступеня їх поділу за рахунок захоплення великими частинками дрібніших і примусового перенесення останніх в нижні горизонти шару, що формується. Виключити це явище можна за рахунок повного поділу траєкторії руху фракцій агломераційної шихти в повітряному зазорі складного лотка [14].

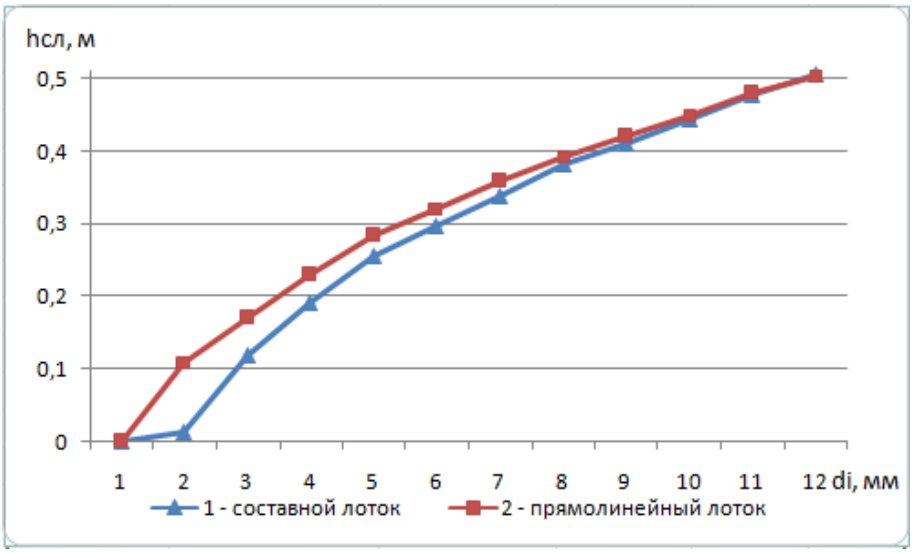


Рисунок 1.14 - Розрахунковий розподіл фракційного складу за висотою шару

Як видно, в результаті використання лотка наведеної конструкції, дрібні частинки не перелітають повітряний зазор, що забезпечує їх переважне скупчення на поверхні шару. У процесі руху матеріалу повітрям значно знижується взаємодія між окремими частинками, складовими його масу. В результаті досягається якісніший його поділ по фракціях, крива 1, ніж при безпосередньому переході частинок з площини прямолінійного лотка на поверхню укосу, крива 2, рис. 1.14.

Конструкція лотка передбачає можливість зміни кутів нахилу обох поверхонь, що, в свою чергу, впливатиме на швидкість сходу частинок, а також ширину і висоту повітряного зазору, тим самим забезпечуючи широкий спектр впливів, що управляють, на динаміку формування шару. В результаті розрахунку конструктивних характеристик лотка, що дозволяють забезпечити максимально близький до необхідного розподілу гранулометричного складу, отримані результати, представлені на рис. 1.15.

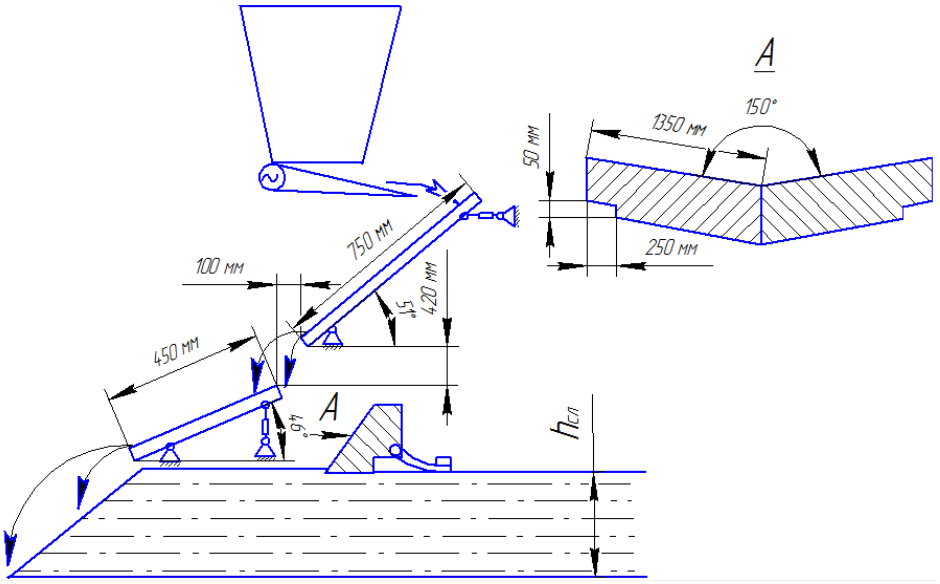


Рисунок 1.15 - Конструктивні характеристики модифікованого складного лотка

Вибрана в результаті розрахунків довжина 750 мм та кут нахилу 51° першої секції забезпечують рух фракцій матеріалу в режимі чистого кочення. У свою чергу фракції (-1, 1-3 мм), не набувають достатньої кінетичної енергії для перельоту через повітряний зазор. Довжина 450 мм та кут нахилу 46° другий секції забезпечують гальмування та необхідне розподіл грансостава по висоті шару.

Отриманий розрахунковим шляхом розподіл фракційного складу матеріалу по горизонтах шару, рис. 1.16 свідчить про те, що застосування складеного лотка дозволяє максимально наблизитися до необхідної сегрегації фракцій, тим самим забезпечити необхідний розподіл палива, що дозволить стабілізувати тепловий режим спікання.

У роботі [9] встановлено, що прибортові зони палет потребують підвищеної концентрації палива, з метою забезпечення рівномірного спікання шару агломерату по ширині, у зв'язку з присмоктуванням приладів повітря і втратою тепла через стінки спікальних візків.

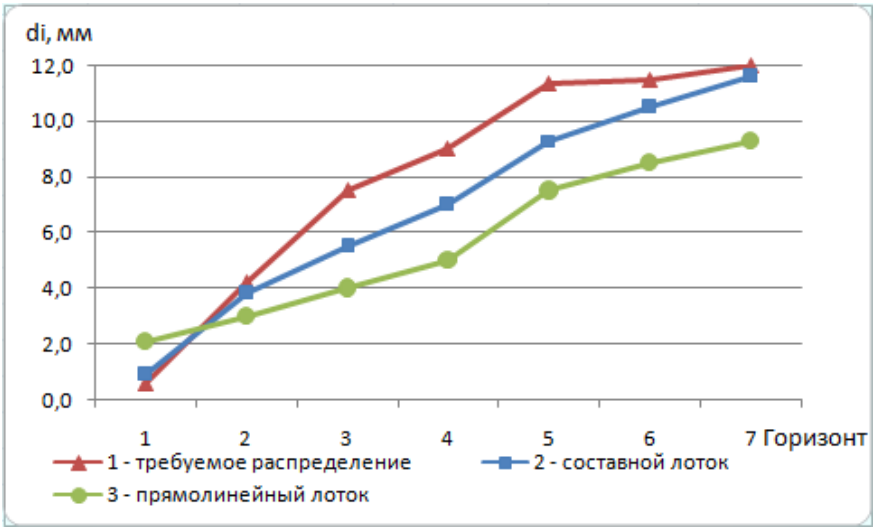


Рисунок 1.16 - Зміна середнього діаметра матеріалу по горизонтах шару

Відомо [15], для усунення впливу приладових підсмоктування застосування двоступінчастого складеного лотка, що складається з прямолінійного лотка і стрілоподібного другого ступеня. У цій роботі пропонується застосування, спільно зі складовим завантажувальним лотком, зазначеної стрілоподібної секції, рис. 1.15. Використання останньої, поряд з усуненням вище зазначених підсмоктування повітря, дозволить підвищити концентрацію палива в прибортових зонах.

Конструкція стрілоподібного ступеня передбачає наявність двох щілин по краях секції, ширина яких обрана на підставі даних, отриманих при дослідженні газопроникності шихти по ширині палети, де зона прососів повітря становила 250-300 мм від стінок випікальних візків. Стрілоподібна форма другого ступеня забезпечує перенесення частини шихти у бік розвантажувальних щілин. Шихта, виходячи через щілини, формує потовщення 250 мм уздовж бортів на 50 мм вище за основний шар шихти (400-500 мм). Ущільнення бічних потовщень шару шихти до заданої висоти забезпечується гладилкою з тиском 0,01-0,02 МПа.

Результати наведених досліджень динаміки процесу формування шару полідисперсної шихти дозволили визначити тип та конструктивні характеристики лотка, що забезпечує максимально близьке до необхідного розподілу гранулометричного складу залізорудної шихти для умов МК «Запоріжсталь».

Досвід використання складеного лотка [14] свідчить про ефективність застосування. Таким чином необхідно провести активні експерименти з метою визначення впливу роботи запропонованого лотка на продуктивність процесу агломерації.

1.7 Дослідження газодинамічних характеристик шару полідисперсної шихти, підготовленої до спікання

З теорії агломераційного процесу відомо, що для забезпечення успішного спікання шихти необхідно організувати інтенсивне надходження повітря до зони горіння. Мінімальна швидкість фільтрації повітря через шар, при якій можливе перебіг реакції горіння твердого палива та утворення рідкої фази, повинна становити не менше 0,15-0,2 $м^3/м^2 \cdot с$.

Агломераційна шихта відноситься до сипучих матеріалів, що складаються з окремих частинок, що контактують один з одним, між якими знаходяться міжкускові канали або пори. Прийнято вважати, що газ у шарі сипучого матеріалу або обтікає окремі частинки, або рухається по звивистих, змінного перерізу, каналах.

Враховуючи складність та різноманіття характеристик стаціонарного шару полідисперсного матеріалу, для дослідження процесів, що протікають у ньому, доцільно останній розглядати як однорідну масу на якійсь кінцевій ділянці та використовувати узагальнені характеристики, такі як порізність, питома поверхня, коефіцієнт газодинамічного опору.

Газопроникність є здатність елементарного шару з одиничною поверхнею всмоктування і висотою пропускати через себе ту чи іншу кількість газу в одиницю часу, при певному початковому розрідженні під шаром [16].

Дослідженням газодинаміки агломераційного шару присвячено фундаментальну роботу Коротича В.І., Пузанова В.П. [17]. Авторами отримано двочленне рівняння напору, основою якого покладено рівняння Дарсі-Вейсбаха і коефіцієнт газодинамічного опору. Викладена методика використана для кількісного аналізу газодинамічного опору різних зон шару шихти з різним фракційним складом.

За даними Коршикова В.Г. [18], втрата напору газу шарі пропорційна змісту в шихті дрібних класів -0,5 мм. Збільшення масової частки цієї фракції від 8 до 24% супроводжується збільшенням перепаду тиску ΔP з 10 до 40 кПа. На це значення зростає втрата напору при зменшенні середньогармонічного діаметра гранул частинок шихти з 4,5 до 3,25 мм.

Діяльність [19] Фролов Ю.А. запропонував спрощене рівняння для розрахунку втрат напору газу у шарі шихти. Однак, для його використання необхідне проведення трудомістких експериментів з метою визначення емпіричних коефіцієнтів, що враховують опір всього шару, та встановлення середніх процесів за процес параметрів газового потоку.

Залежність визначення втрат напору від висоти шару, запропонована Петрушовым С.Н. [2], дозволяє врахувати вплив усадки шару, часткового руйнування гранул, нерівномірності шару, вміст концентрату в шихті на газодинаміку процесу. Автором встановлено відсоткове співвідношення впливу кожної складової на газодинамічний опір шару.

Значна кількість робіт присвячена встановленню впливу сегрегації на газодинаміку шару, що агломерується. Результати переважної більшості досліджень показують, що сегрегація класів крупності шихти позитивно впливає на структуру та газопроникність шару [20, 21]. Лише деякі

дослідники відзначають шкідливий вплив сегрегації на розподіл тепла та палива у шарі, а також на його газодинаміку [22]. У своїх дослідах автори спостерігали переоплавлення поверхні шару у зв'язку з різким збільшенням вмісту твердого палива. У свою чергу велика кількість розплаву, тим більше в умовах застосування зовнішнього нагріву, істотно знижувало газопроникність шару.

У роботах [24, 23] зазначено, що при створенні спрямованої сегрегації гранскладу шихти по висоті шару забезпечується підвищення міцності агломерату та збільшення продуктивності агломашин при одночасному скороченні витрати твердого палива.

Таким чином, можна зробити висновок, що газодинамічний опір шару значно впливає на продуктивність агломераційного процесу і залежить від гранулометричного складу сирої шихти, що укладається на палети, її сегрегації по висоті шару, від типу застосовуваного завантажувального пристрою. У зв'язку з тим, що вітчизняні металургійні підприємства переходять на спікання шихти у високих шарах 500 мм і більше, дослідження газодинамічних характеристик полідисперсної шару шихти є актуальним науковим завданням для контролю та управління роботою агломераційних машин.

До основних факторів, що впливають на газопроникність шару сипких матеріалів, відноситься температура, що впливає на основні параметри газового потоку - об'єм, щільність, в'язкість. Виходячи з того, що для визначення втрат тиску в масі сипких полідисперсних матеріалів шар шихти розбивали на ділянки, дані шари приймалися як однорідні ізотермічні.

Найбільш важливою газодинамічною характеристикою пористого шару є його опір, який складається з опору тертя та місцевих опорів. Частка місцевих опорів по відношенню до загального значно вища, а при Re>2000, перевищує 95%, тому втрати в пористому шарі ΔP, визначалися виходячи з

розрахунку місцевих опорів під час руху газу каналами. Для опису втрат тиску в шарі використана інтерпретація загального для всіх сипких матеріалів рівняння Дарсі-Вейсбаха, що описує канальний перебіг газу за наявності тертя в каналі:

$$\Delta R = {}_{сл}\frac{\omega^2}{2}\rho\left(1T+\beta\right), \tag{1.45}$$

де ω - швидкість газового потоку, м/с; ρ - щільність газового потоку, кг/м³; β - коефіцієнт об'ємного розширення газу (0,003661 K^{-1}); T - температура газу, К; $K_{сл}$ - коефіцієнт, що комплексно враховує вплив невизначеності форм і розмірів пір.

$$K_{сл} = 4\psi_{сл}\frac{H}{d_э}, \tag{1.46}$$

де:$\psi_{сл}$ - коефіцієнт газодинамічного опору, (Па·м·с²)/кг; H - висота шару, м; $d_э$ - еквівалентний діаметр пор, м.

При розрахунках втрат тиску в реальних умовах використано експериментальні значення $\psi_{сл}$. Останні отримані за умов лабораторії комбінату МК «Запоріжсталь». Досвідчена установка являє собою запальну чашу у вигляді усіченої піраміди розміром 0,5х0,5х1,2 м, товщина стінок 3 мм, заповненої полідисперсною шихтою, що лежить на колосникових гратах і ексгаустера, що створює розрядження під шаром.

Попередньо шихта розсіювалася на фракції розміром: -3, 3-5, 5-8 та +8 мм. Спочатку досліди проводилися як із чистими фракціями, так і з комбінованими попарно. На наступному етапі комбінувалися всі 4 фракції, їх склад у суміші задавався, виходячи з того, що визначальною при обчисленні опору є фракція -3 мм. Її кількість щодо маси всієї суміші змінювалося з 10 до 60%. Зміна інших складових суміші представлена у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Зміст фракцій полідисперсної шихти

	Фракції, %				
№	Ф1(-3, мм)	Ф2(3-5, мм)	Ф3(5-8, мм)	Ф4(+8, мм)	dср, мм
1	10	30	30	30	6,3
2	20	20	30	30	6,05
3	25	25	25	25	5,5
4	30	30	30	10	4,6
5	40	25	25	10	4,225
6	50	20	20	10	3,85
7	60	20	10	10	3,35

Під час проведення експериментів фільтруюче середовище (повітря $T = 20°C$) проходила в спекательную чашу, просасываясь сквозь слой шихты сверху вниз и по газоходу, через эксгаустер выбрасывалась в атмосферу. В процессе работы контролировалась скорость фильтрации среды при помощи анемометра и потери давления в слое для каждого режима эксгаустера. На основе полученных данных рассчитан критерий Рейнольдса и соответствующие ему коэффициенты сопротивления слоя $\psi_{сл}$

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega \cdot d_э}{\upsilon(T)}, \qquad (1.47)$$

де υ -кінематична в'язкість повітря, м²/с,

$$d_э = \mu \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} d_{ср}, \qquad (1.48)$$

де μ - коефіцієнт форми частинок шихти (для кулі μ=2/3); $d_{ср}$ - середній діаметр частинок шихти, м; ε - порізність шару, яка в залежності від типу укладання може бути описана рівнянням Сліхтера:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6(1-\cos\gamma)\sqrt{1+2\cos\gamma}}, \qquad (1.49)$$

де γ - кут між прямими, що проходять через центи кулястих частинок, град.

Коефіцієнт газодинамічного опору шару $\psi_{сл}$, відповідний числу Re, обчислювався згідно з формулою:

$$\psi_{сл} = \frac{\Delta P d_э}{2H\omega^2\rho(1+\beta T)}. \qquad (1.50)$$

Результати досліджень зведені у графіку критеріальних залежностей $\psi_{сл} = f(\mathrm{Re})$ для сумішей шихти різного фракційного складу, рис. 1.17, 1.18.

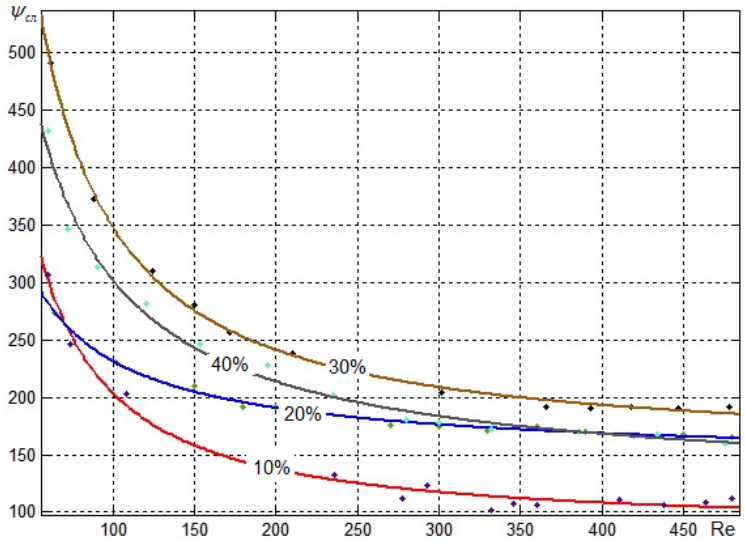


Рисунок 1.17 - Залежність $\psi_{сл} = f(\mathrm{Re})$ для сумішей, що містять 10 - 40% фракції -3 мм

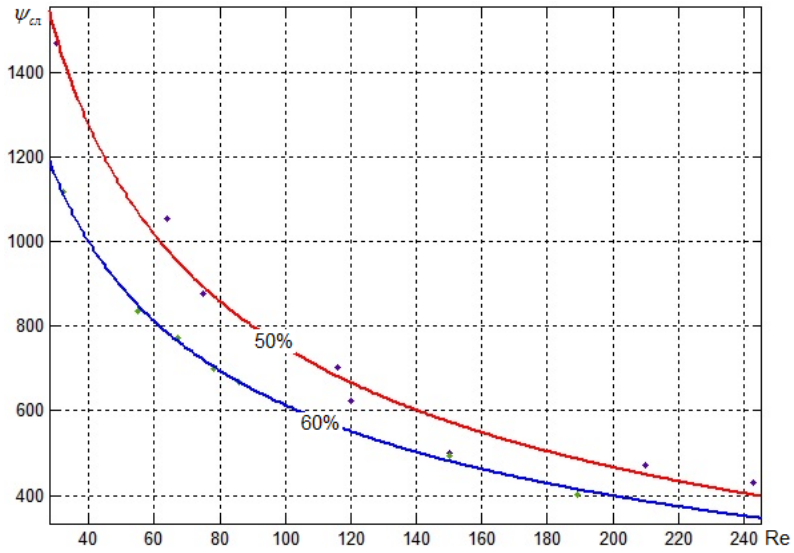


Рисунок 1.18 - Залежність $\psi_{сл} = f(\mathrm{Re})$ для сумішей, що містять 50 і 60% фракції -3 мм

В результатах досліджень [25] отримано необхідний розподіл фракційного складу шихтових матеріалів, підготовлених до спікання у шарі заввишки 500 мм. Результати розрахунків газодинамічного опору горизонтам даного шару наведено на рис. 1.19, 1.20.

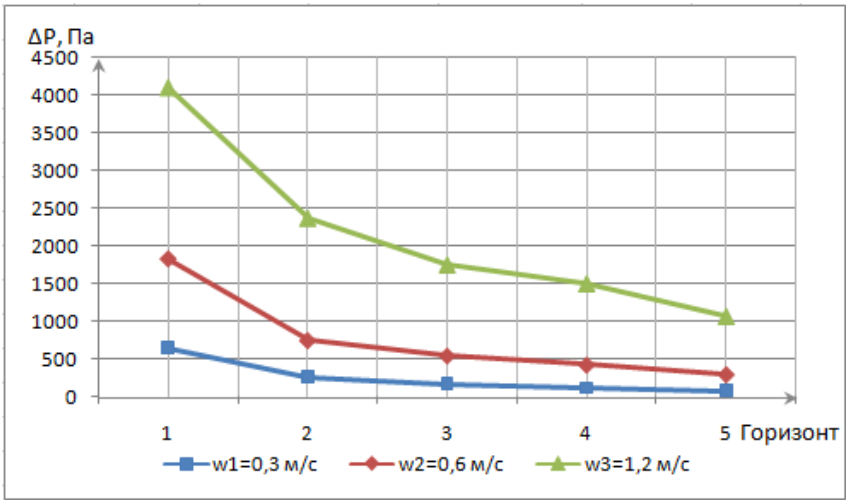


Рисунок 1.19 - Вплив швидкості фільтрації газу на втрати тиску в горизонті

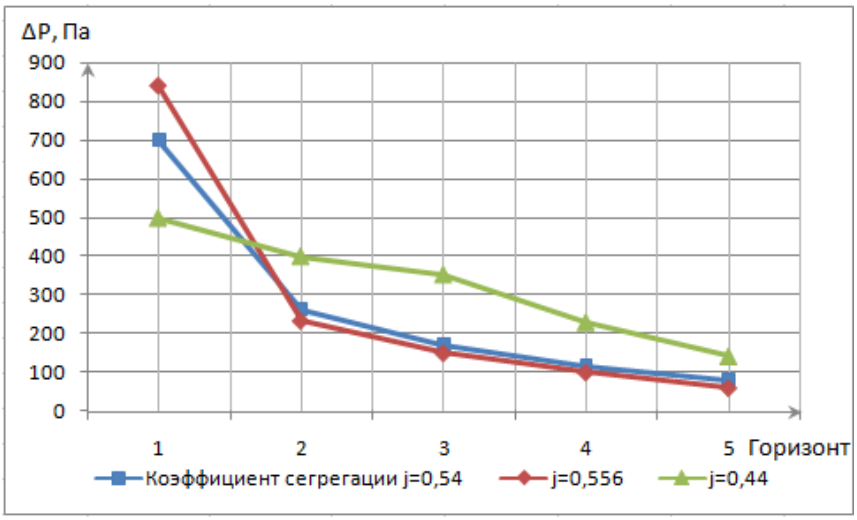


Рисунок 1.20 - Вплив сегрегації на втрати тиску в горизонті

Аналіз отриманих результатів показав, що нарівні з сегрегацією гранул по висоті, суттєвий вплив на газодинаміку шару надає швидкість руху повітря та фракційний склад вихідної шихти.

Слід зазначити, що значний перепад тиску у верхньому горизонті шару, спричинений підвищеною концентрацією (60-80%) дрібнодисперсної (-3 мм) окомкованої шихти, характерний для сирого шару без впливу зовнішнього джерела теплоти. При запаленні горном твердого палива у

шарі шихти, у ній, з допомогою випаровування вологи, інтенсифікуються процеси порообразования, що тягне у себе зниження газодинамічного опору верхнього горизонту до 0,55 – 0,60 кПа.

Особливий інтерес представляє визначення газодинамічних характеристик колосників. Опір колосників визначається їх станом та формою. Під станом розуміється ступінь засмічення колосника частинками та шматочками шихти. Так, дослідження, проведені [19], показали, що при реальних параметрах газу у вільній від матеріалу решітці втрати тиску становлять 40 ... 70 Па, а в робочих умовах аглофабрик цей показник становить 0,11 ... 0,47 кПа. При залипанні колосника дрібницею втрати тиску зростають і сягають 0,9…1,0 кПа.

Форма колосників впливає наступним чином: опір ромбічних колосників на 20...30% менше, ніж прямокутних, а найбільший опір має напівкруглі у верхній частині грати: втрати тиску в них досягають 3 кПа.

На агломераційних машинах комбінату МК «Запоріжсталь» палети обладнані колосниками прямокутної форми конструкції, що самоочищається. Це дозволило забезпечити втрати напору в колосниковому полі лише на рівні 0,20…0,35 кПа.

У зв'язку з вищевикладеним, необхідно мати на увазі, що величина втрат тиску в випічному візку відображає газодинамічний стан шару з певною часткою похибки. Значення коефіцієнта опору шару, визначеного цього значення втрат тиску, буде завищено на 20…30 %.

Для обліку впливу на газодинаміку спікання шару таких факторів, як усадка шару, часткове руйнування гранул і т.д., використана наступна залежність [2]:

$$\Delta P_{сум} = \Delta P \cdot H + \Delta P_1 \left(H - 1 \right) + \Delta P_2 \left(H - 2 \right)^2 + \Delta P_3 \left(H - 3 \right)^3 + G \cdot H \text{ , (1.51)}$$

де ΔP_1 - опір за рахунок усадки (0,01-0,05), кПа; ΔP_2 -опір, що виникає при частковому руйнуванні гранул (0,01-0,03), кПа; ΔP_3 - опір, що враховує нерівномірність зміни структури шару за висотою (0,03), кПа; G - коефіцієнт, що характеризує кількість дрібної фракції (-3 мм) в шихті (при 20% дрібноти G=0, при 30% - G=1 и т.д.).

Таким чином, загальний газодинамічний опір шару, що спікається, висотою 500 мм, змінюється в залежності від швидкості фільтрації повітря і фракційного складу шихти, і представлено на рис. 1.21, 1.22.

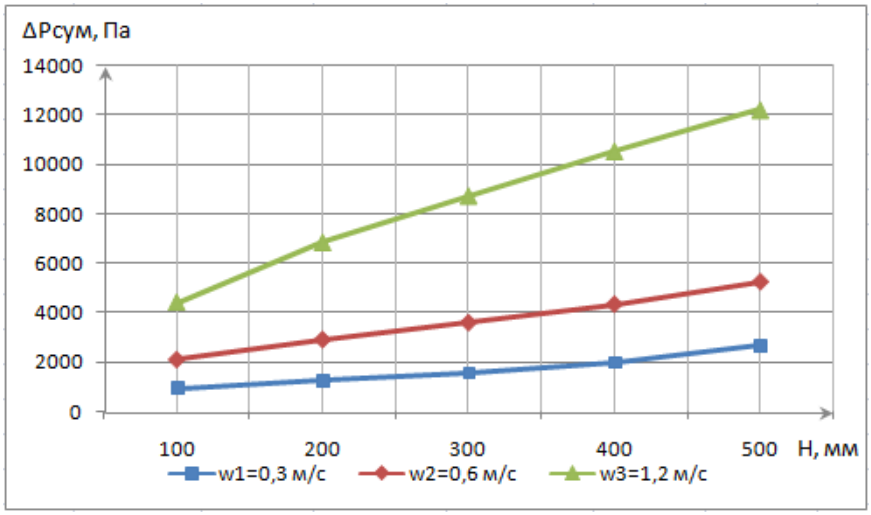


Рисунок 1.21 - Зміна перепаду тиску від швидкості фільтрації повітря

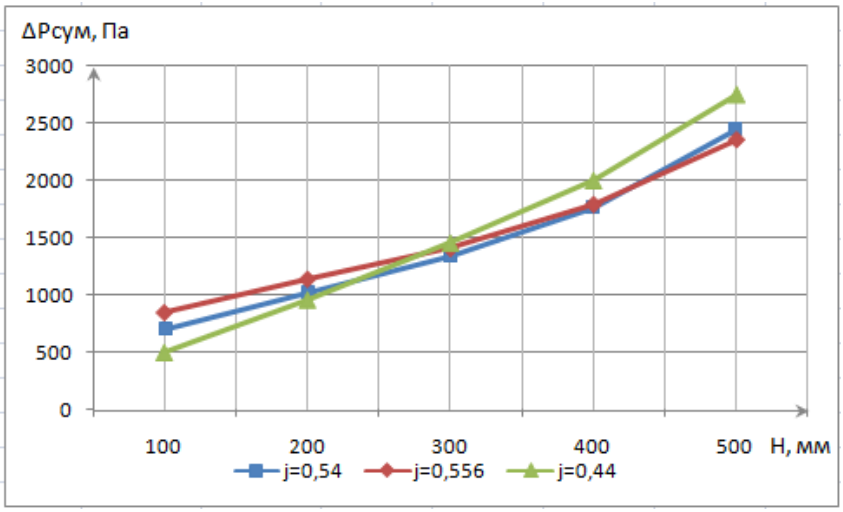


Рисунок 1.22 - Зміна загального опору шару від сегрегації шихти

Виходячи з результатів досліджень, можна зробити висновок, що збільшення швидкості фільтрації повітря через шар шихти, що спікається, прямопропорційно збільшує газодинамічний опір шару і, як наслідок, перевантажує тягодутьевое обладнання агломераційної машини і збільшує витрату електроенергії.

Вплив сегрегації не однозначний. При низькому значенні коефіцієнта сегрегації простежується мінімальне падіння ΔP у верхньому обрії 0-100 мм. Однак слід врахувати, що при такому розподілі фракційного складу не забезпечується необхідний вміст твердого палива у верхніх шарах шихти, і як наслідок порушення теплового режиму спікання. При високому значенні j початковий ΔP у верхньому горизонті найбільший, за рахунок концентрації там дрібної фракції, що є основним носієм твердого палива, що дозволяє досягти необхідної температури спікання, а збільшення вмісту великих фракцій шихти в нижніх горизонтах знижує загальні втрати тиску в шарі.

Проведені дослідження дозволили встановити залежність $\psi_{сл} = f(\mathrm{Re})$ від фракційного складу шихти, визначити втрати тиску у шарі заввишки 500 мм залежно від швидкості фільтрації повітря та сегрегації

шихтових матеріалів за висотою. Відзначено, що збільшення швидкості фільтрації повітря від 0,3 до 1,2 м/с збільшує газодинамічний опір шару в 5 разів, а посилення сегрегаційних процесів у шарі позитивно впливає як на тепловий режим спікання, так і на газодинаміку шару.

Результати досліджень створюють передумови до постановки оптимізаційної задачі з розробкою алгоритму управління завантажувальним пристроєм агломашини з метою формування шару шихти з мінімальним ΔP та необхідним розподілом твердого палива за висотою спікального візка.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Оптимізація структури шару агломераційної шихти з метою стабілізації теплового режиму процесу спікання

Ефективність роботи конвеєрних машин значною мірою залежить від удосконалення технологій шихтопідготовки, обгортування та завантаження шихти на палети агломашини, що обумовлює формування шару матеріалу із заданими характеристиками. Останнє забезпечується за рахунок використання завантажувальних пристроїв різної конструкції. У свою чергу, ефективне управління формуванням шару шихти забезпечується лише у разі взаємозв'язку газодинамічних характеристик шару матеріалу та теплового режиму спікання із продуктивністю процесу.

Досвід експлуатації вітчизняних та зарубіжних конвеєрних машин показав, що відсутність зазначених вище взаємозв'язків призводить до того, що коригування структури шару шихти, підготовленої до спікання, відбувається через значний інтервал часу після зміни теплового режиму та газодинамічного стану шару.

Відсутність контролю структурних характеристик матеріалу на палетах агломашини не дозволяє оперативно аналізувати зміну розподілу хімкомпонентів та газодинаміки шару шихти та, отже, оперативно коригувати режим завантаження.

Підвищення продуктивності агломераційних машин кондиційної фракції можна домогтися, по-перше, за рахунок забезпечення заданого розподілу хімічного і гранулометричного складів по висоті шару, що покликане вирівняти тепловий режим спікання агломерату, а по-друге, за рахунок зниження газодинамічного опору шару шихти. Таким чином, при завантаженні матеріалу на спікальні візки необхідно комплексно враховувати вплив сегрегації гранул та газодинаміки сформованого шару.

Дослідження газодинамічних характеристик шару шихти за різних умов формування його структури дозволили зробити висновок, що втрати тиску у верхніх горизонтах шару, зі структурою оптимальною з точки зору розподілу твердого палива за висотою, більшою ніж для вихідного матеріалу. Тому, з цієї позиції, доцільно зниження сегрегації фракцій по висоті шару, що формується.

З іншого боку слід зазначити, що сегрегаційні процеси, що впливають на розподіл палива по висоті шару, переважають вплив на металургійні властивості агломерату в порівнянні з газопроникністю. Таким чином, як критерій оптимальності необхідно вибрати максимальну відповідність оптимальному розподілу твердого палива по висоті спального візка, з метою забезпечення стабілізації теплового режиму спікання агломерату, з урахуванням зниження втрат тиску в шарі.

Постановку задачі оптимізації подаємо у вигляді:

$$\begin{cases} C_{расч}(h) \to C_{опт}(h); \\ \sum \Delta P \to \min. \end{cases}$$

При обмеженнях:

$$\begin{cases} \Phi_i + \Phi_{i+1} + \ldots + \Phi_n = \Phi_\Sigma; \\ d_i \Phi_i + d_{i+1} \Phi_{i+1} + \ldots + d_n \Phi_n = d_{ср} \Phi_\Sigma; \\ \alpha_{\min} \le \alpha_i \le \alpha_{\max}; \\ C_{\min} \le C_i \le C_{\max}; \\ \sum \Delta P_{\min_раб} \le \sum \Delta P \le \sum \Delta P_{\max_раб}. \end{cases}$$

де $C_{расч}(h)$, $C_{опт}(h)$ - розрахунковий та оптимальний вміст палива в шарі, %; $\sum \Delta P$ - сумарні втрати тиску у шарі, Па; Φ_i - вміст і-ї фракції, %; d_i - середній діаметр і-ї фракції, мм; $d_{ср}$-середній діаметр частинок шару, мм; α_i - кут нахилу лотка, град; C_i- вміст палива в горизонті, %; $\sum \Delta P_{\min_раб}, \sum \Delta P_{\max_раб}$ - діапазон робочого перепаду тиску, Па.

Розроблений алгоритм оптимізації структури шару агломераційної шихти наведено на рис. 2.1.

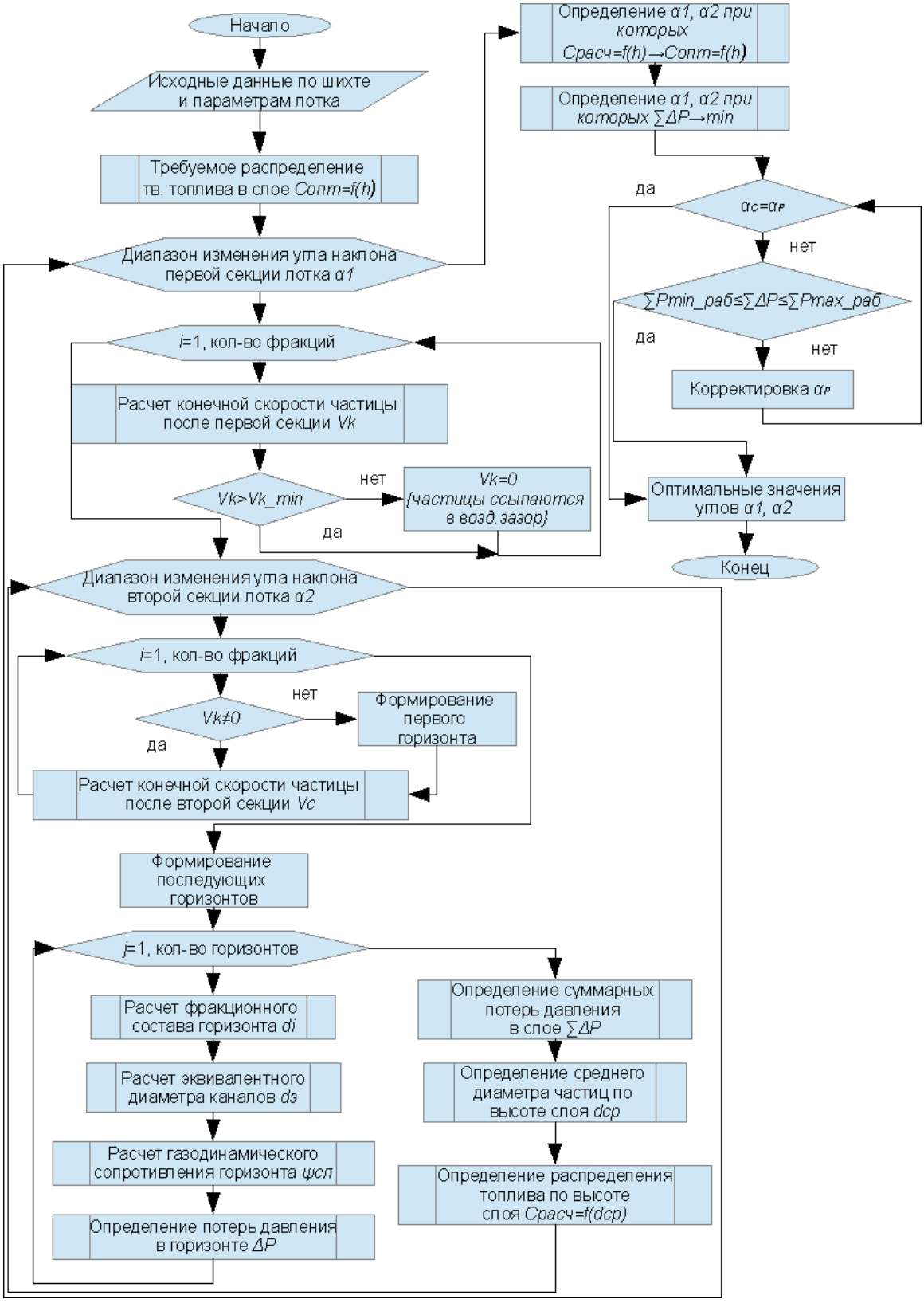


Рисунок 2.1 - Алгоритм розрахунку управляючих впливів на завантажувальний пристрій з метою оптимізації структури шару агломераційної шихти

Вихідними даними для розрахунку режиму роботи завантажувального вузла є параметри шихтових матеріалів - фракційний склад, хімічний склад, вміст палива, так само задаються параметри вузла завантаження - довжини секцій лотка, діапазон варіювання їх кута нахилу, висота і ширина повітряного зазору. На наступному етапі визначається оптимальний розподіл твердого палива по висоті шару.

Оптимізація умов формування структури шару шихти, зводиться до розрахунку величини впливу, що управляє (в найбільш поширеному випадку - кути нахилу завантажувального лотка), що забезпечує задану сегрегацію матеріалу, тобто. необхідний розподіл палива та газодинаміку шару.

Після завдання вихідних даних та необхідного розподілу твердого палива організовується зовнішній цикл зі зміни кута нахилу першої секції завантажувального лотка α_{1i}. Усередині даного циклу проводиться розрахунок кінцевих швидкостей V_k для кожної із фракцій вихідної шихти. Частинки, кінцева швидкість яких відповідає умові $V_k > V_{\min}$, формують верхній горизонт шару, зсипаючись у повітряний зазор, решта частинок переходить на другий лоток з кутом нахилу α_{2i} (в алгоритмі організовано відповідну перевірку).

На наступному етапі створюється внутрішній цикл зміни кута нахилу другої секції завантажувального лотка α_{2i}. Усередині якого розраховуються швидкості сходу частинок з його поверхні V_c. Виходячи з отриманих даних про швидкості руху частинок при відповідних кутах

нахилу α_{1i}, α_{2i}, провадиться розрахунок фракційного складу горизонтів шару.

Визначення втрат тиску в горизонтах провадиться на підставі попереднього розрахунку еквівалентного діаметра каналів та коефіцієнта газодинамічного опору. Після розрахунку параметрів по всіх горизонтах здійснюється розрахунок сумарних втрат тиску в шарі, зміни середнього діаметра частинок та розподілу твердого палива за його висотою.

По завершенню внутрішнього (по α_2) та зовнішнього (по α_1) циклів отримуємо двовимірні масиви даних у вигляді залежностей $C_{расч} = f(\alpha_1, \alpha_2)$ та $\sum \Delta P = f(\alpha_1, \alpha_2)$. Дані масиви даних обробляються з метою визначення α_1, α_2 при яких забезпечується найкращий збіг розрахункового та оптимального розподілу твердого палива, а також мінімальні втрати тиску по висоті шару. Далі з урахуванням пріоритетності необхідного розподілу палива вибираються кути нахилу секцій завантажувального пристрою, що забезпечують оптимальну структуру агломераційної шару шихти.

Програмну реалізацію представленого алгоритму здійснено мовою програмування Object Pascal. Лістинг програми наведено у додатку З цієї дисертації.

Виходячи з того, що кути нахилу секцій лотка варіювалися в діапазоні α_1(45÷58°), α_2(45÷60º), отримано 224 комбінації розташування поверхонь завантажувального вузла, що забезпечують відповідний розподіл палива. Найбільш наочні результати розрахунків розподілу палива у шарі при заданих кутах нахилу секцій лотка представлені на рис. 2.2.

З отриманих результатів видно, що при низьких кутах нахилу сегрегаційні процеси в шарі протікають слабо, за рахунок того, що великі

частинки не набувають достатньої кінетичної енергії для їхньої концентрації в нижніх горизонтах шару.

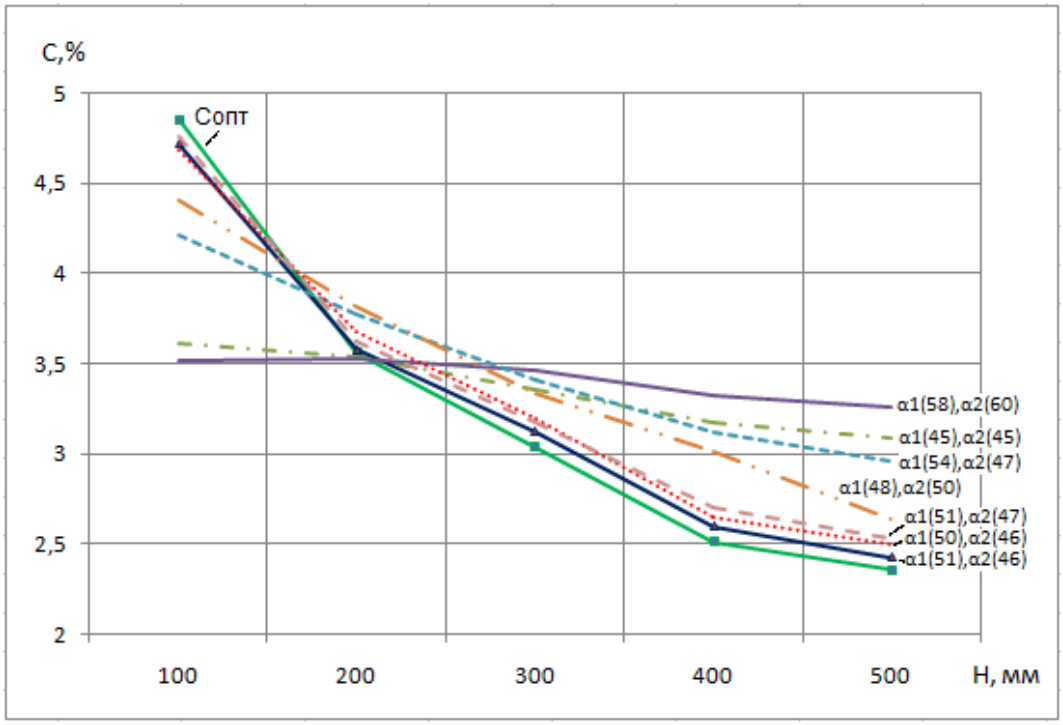


Рисунок 2.2 - Результати розрахунків розподілу палива у шарі

У свою чергу, великі значення кутів нахилу лотків, спричиняють рух частинок шихти в режимі ковзання, що так само згубно позначається на сегрегації класів крупності частинок і як наслідок, спостерігається практично рівномірний розподіл палива по висоті шару. Найкраща відповідність оптимальному розподілу палива забезпечується при значеннях кутів нахилу завантажувального пристрою α_1 (51°), α_2 (46°).

Результати розрахунків втрат тиску в шарі при використанні всіх комбінацій кутів нахилу секцій завантажувального лотка представлені на рис. 2.3, 2.4.

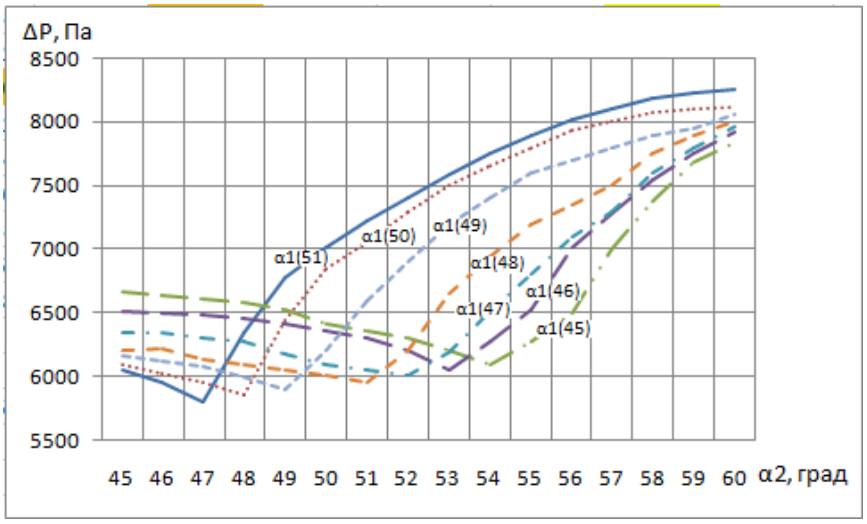


Рисунок 2.3 - Втрати тиску у шарі при зміні α_1 (45÷51º)

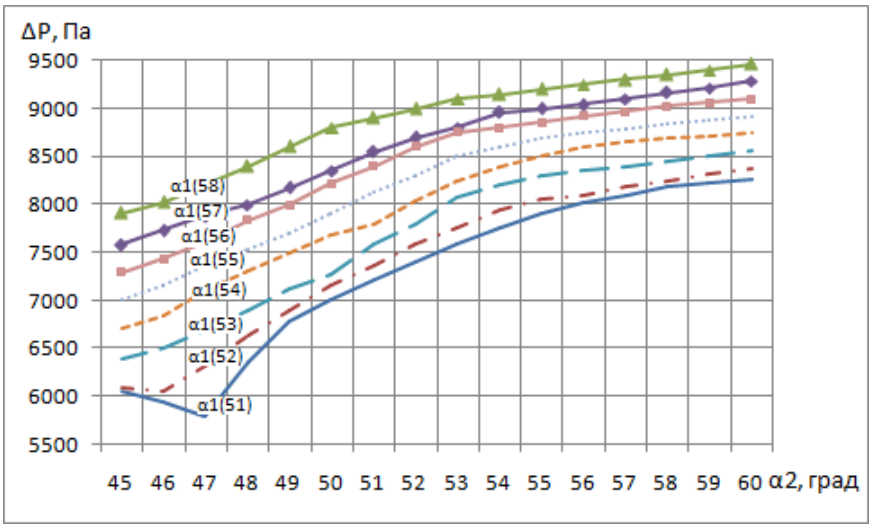


Рисунок 2.4 - Втрати тиску у шарі при зміні α_1 (51÷58º)

Виходячи з результатів розрахунків, можна зробити висновок, що мінімальні втрати тиску в шарі забезпечуються при комбінації кутів нахилу складеного завантажувального лотка α_1 (51º), α_2 (47°). Також очевидно, що подальше збільшення кутів нахилу секцій лотка погіршує сегрегаційні процеси в шарі і, отже, його газодинаміку. Останнє викликано тим, що середні та великі частинки, що рухаються з високими швидкостями,

захоплюють у нижні горизонти дрібні фракції, внаслідок чого ущільнюється структура завантажуваного шару.

Таким чином, розроблений алгоритм управління завантажувальним пристроєм агломашини з метою формування оптимальної структури шару шихти підготовленої до спікання, дозволив встановити оптимальні значення кутів нахилу секцій складеного завантажувального лотка 51º і 47° відповідно, що забезпечують найкращу відповідність необхідному розподілу твердого палива агломераційної шихти.

2.2 Дослідження впливу теплового режиму процесу спікання на якісні показники агломерату

Аналіз ефективності запропонованих заходів щодо посилення сегрегаційних процесів у шарі завантажуваного матеріалу, за рахунок використання завантажувального лотка запропонованої конструкції, проведений методом активного експерименту, на «Дослідній установці аглоцеху для спікання агломерату» МК «Запоріжсталь», рис.2.5.



Рисунок 2.5. - Дослідна установка аглоцеху для спікання агломерату

Агломераційна шихта, склад якої наведено в табл.1.2, зволожувалася до 8,5% і обкомковувалася в лабораторному окомкователе, рис. 5.33 діаметром 0,8 м. Окомкована шихта розсіювалася на фракції +12 мм, 12-8 мм, 8-5 мм, 5-3 мм, 3-1 мм, -1 мм, якими в певній послідовності, рис. 2.6 заповнювалася спікальна чаша.



Рисунок 2.6 - Лабораторный окомкователь

Таблиця 2.1 - Компонентний склад шихти для умов МК "Запоріжсталь".

№	Компонент	кг/т	%
1	Концентрат	478	47,8
2	Аглоруда	282	28,2
3	Вапняк	129	12,9
4	Вапно	21	2,1
5	Шлам	15	1,5
6	Пил колошник	13	1,3
7	Відсів агломерату	29	2,9
8	Шлак металургійний	8	0,8
9	Паливо	33	3,3

Заповнення чаші проводилося згідно з розрахунковою залежністю зміни середнього діаметра частинок шихти по горизонтах шару за умови

використання складеного завантажувального лотка, представленої на рис. 2.7.

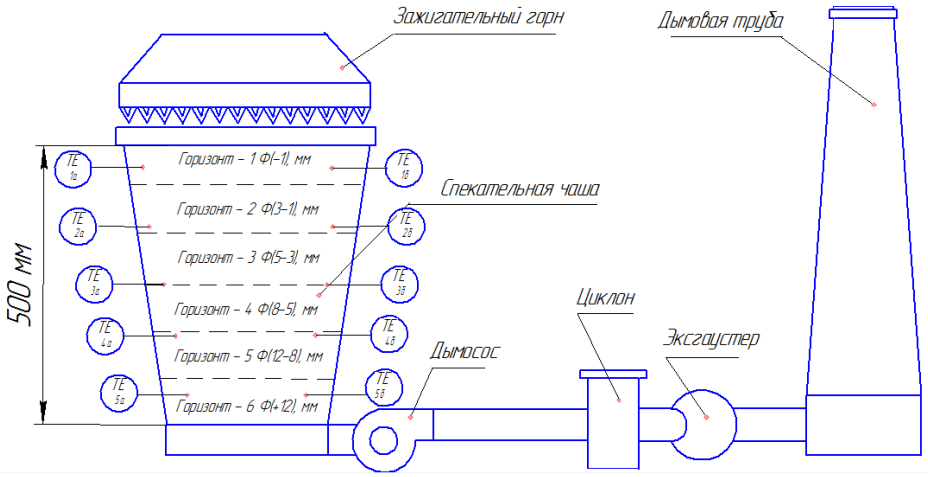


Рисунок 2.7. - Схема лабораторної установки ТЕ – термопара

Розподіл палива та основності, при зазначеному способі завантаження наведено на рис. 2.8. Загальний вміст палива в шихті становив 3,3% і закономірність його розподілу максимально наближена до результатів теоретичного розрахунку оптимального розподілу твердого палива по горизонтах шару.

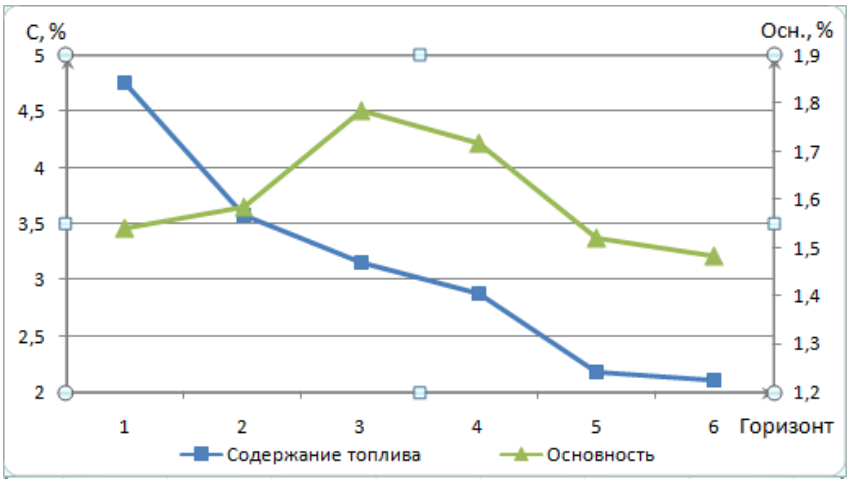


Рисунок 2.8. - Розподіл палива та основності у шарі

Висота шару матеріалу, що завантажується, становила 500 мм, що відповідає умовам роботи агломашини №1 підприємства. Запалювання

шихти проводилося протягом однієї хвилини, питома витрата повітря і газу відповідала умовам роботи горна агломашини. Температура запалення шихти становила приблизно 1250-1300 ° С. Під час спікання шихти безперервно проводилася реєстрація температури відхідних газів і розрідження під шаром, що спікається.

Вимірювання температури зони горіння проводилося групою термопар за п'ятьма горизонтами, результати представлені на рис. 2.9.

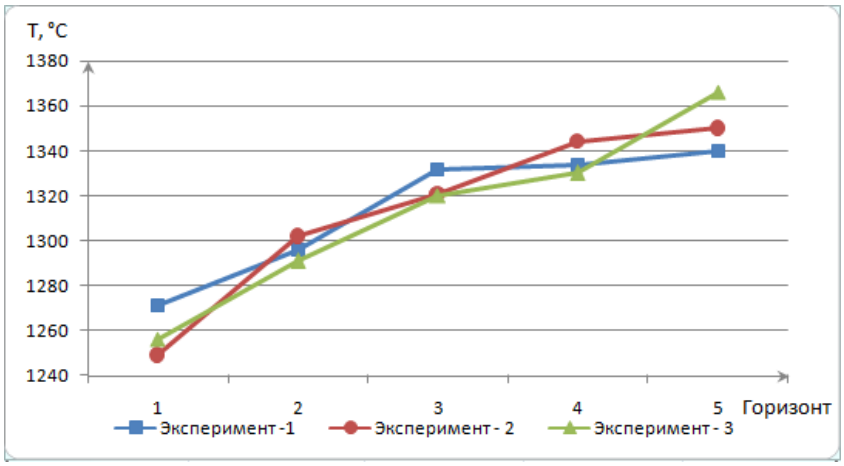


Рисунок 2.9. - Зміна температури зони горіння

З отриманих результатів видно, що по горизонтах шару вдалося досягти стабілізації температури в діапазоні 1250-1360 °С, що дозволило виключити переоплавлення нижніх і недопек верхніх горизонтів шихти, що спікається, і тим самим підвищити вихід придатного.

Після закінчення процесу спікання готовий агломерат перевірявся на міцність та відповідність стандартам якості підприємства, згідно з СТП 8.2-05-03. Випробування на механічну міцність проводилися в барабані, що обертається, рис. 2.10.



Рисунок 2.10 - Лабораторний барабан



Рисунок 2.11 - Велика щекова дробарка

Попередньо проба масою 15 кг і крупністю 5-40 мм, додрібнювалася у великій щоковій дробарці, рис. 2.11, з наступним розсіюванням на ситі з осередками розміром 5 мм і потім завантажувалася в барабан.

Випробування агломерату полягало у обертанні проби протягом 8 хвилин у барабані (ДСТУ 3200-95) зі швидкістю (25±1) об/хв., після чого випробовувана проба агломерату піддавалася розсіву на ситах з осередками 5,0 і 0,5 мм. Отримані при розсіві фракції +5 мм, 5-0,5 мм, -0,5 мм зважувалися з точність 0,1% від маси проби, що випробовується. Результати випробувань агломерату на механічну міцність наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 - Результати випробувань агломерату на механічну міцність, лабораторія МК «Запоріжсталь»

№	Середній діаметр частинок di, мм						dcp	j	Фракції агломерату після барабану, %	
	Висота шіру, мм									
	50	140	230	320	410	500				
	Ф1 (-1)	Ф2 (1-3)	Ф3 (3-5)	Ф4 (5-8)	Ф5 (8-12)	Ф6 (+12)			Ф(-0,5 мм)	Ф(+5 мм)
1	0,9	3	5,2	7,1	9,8	12	6,33	0,562	7,2	70,9
2	1,1	3,2	5,1	7	9,6	12,2	6,37	0,572	6,9	73,3
3	0,8	3	5,6	7,3	10	11,9	6,43	0,55	7,4	71,4
Базовий агломерат									7,46	68,83

$$j = \frac{h_{ср}}{h_{сл}}, \qquad (2.1)$$

де $h_{ср}$ - становище умовної частки з діаметром $d_{ср}$ у шарі щодо рівня засипу, м ; $h_{сл}$ - висота шару шихти, м.

Виходячи з наведених вище результатів, зроблено висновок, що запропонована модернізація вузла завантаження агломераційної машини за рахунок використання складеного завантажувального лотка забезпечує більш нерівномірний, порівняно з поточним, розподіл твердого палива в шарі. Запропоновані закономірності розподілу палива, при спіканні шихти у високих шарах, 500 мм і більше дозволяють стабілізувати тепловий режим процесу спікання. Останнє досягається за рахунок зосередження палива, в основному, у верхній половині шару 61,6%, що усуває дефіцит тепла у верхніх та його надлишок у нижніх горизонтах, тим самим впливаючи на продуктивність процесу.

Результати експериментів, дозволили зробити висновок, що при використанні завантажувального лотка запропонованої конструкції (патент України №110975) покращуються сегрегаційні процеси в шарі, кількість фракції -3 мм у верхніх горизонтах шару (0-100 мм) збільшилася з 54,3 % до 59 ,6% проти діючою для підприємства схемою завантаження. Середній вміст палива на цих горизонтах зріс з 3,8 %, при використанні схеми барабанний живильник – завантажувальний лоток, та 4,4 % при схемі вібраційний живильник – завантажувальний лоток, до 4,76 %, за умови скорочення загального вмісту твердого палива в шихті з 3,6-3,8% до 3,3%.

Результати випробувань свідчать, що стабілізація теплового режиму процесу спікання дозволила підвищити механічну міцність та вихід придатного на 4,22 %. Отримане скорочення споживання коксика за збереження якісних показників процесу спікання потенційно дозволить

економити до 547,12 тис. грн. на рік із шести агломашин, для умов аглофабрики підприємства, що підтверджено розрахунком техніко-економічного обґрунтування, затвердженого керівництвом комбінату.

2.3 Вплив структури шару агломераційної шихти підготовленої до теплової обробки на кількість шкідливих викидів в атмосферу

Одним із основних джерел забруднення атмосфери підприємствами чорної металургії є агломераційне виробництво. Середньорічна величина шкідливих викидів у повітряний басейн у відсотковому співвідношенні від загальних викидів становить: по сірчаному газу SO_2 (46,7%), по монооксиду вуглецю CO (54,5%), по оксидам азоту NO_x (20,4%), за викидами пилу (16,8%) [27].

Утворення пилу в агловиробництві відбувається на всіх етапах процесу, з моменту шихтопідготовки до гуркотіння спеку при перевантаженні, транспортуванні та спіканні шихтових матеріалів. Основний обсяг виділення шкідливих речовин, що викидаються в атмосферу, до складу яких входять SO_2, CO, NO_x, спостерігається на етапі спікання аглошихти.

У зв'язку зі зростанням забруднення навколишнього середовища промисловістю та збільшенням штрафів для підприємств за викиди шкідливих речовин, що позначається на собівартості продукції, актуальним стає питання розробки заходів, спрямованих на скорочення пилогазових викидів при агломерації.

Питанням визначення величини та скорочення обсягів викидів, залежно від умов технологічного процесу та конструкції агломераційної машини, присвячено низку робіт. Такими вченими, як Андоньєв С.М., Толочко О.І. та ін [28, 29], запропоновані залежності для наближеного розрахунку вмісту в агломераційних газах сірчистого ангідриду та оксидів вуглецю, а також ряд технічних рішень щодо очищення газів.

У роботі [30], проведено дослідження щодо встановлення впливу швидкості фільтрації повітря та крупності частинок палива на обсяги виділення CO_2 при агломерації.

У роботі [31], запропоновано методику розрахунку складу аглогазів на виході із зони горіння, наведено результати розрахунків для низки агломераційних фабрик СНД. Слід зазначити, що при застосуванні зазначеної методики, як і для використання залежностей, представлених у [32], потрібна наявність значної кількості експериментальних даних з технологічного об'єкта, що ускладнює їх практичне застосування.

Автором, в роботі [33] встановлено, що в умовах, що склалися роботи агломераційного виробництва, основний вплив на кількість шкідливих сполук, що утворюються в процесі спікання, надають такі фактори як: висота шару і витрата палива на спікання. На підставі лабораторних досліджень зроблено висновок, що обсяг виділення шкідливих речовин залежить від теплового режиму процесу спікання, а загальна кількість викидів – від окислювально-відновних процесів, що протікають в агломераційному шарі. Встановлено, що збільшення висоти шару, що спікається, і скорочення споживання твердого палива позитивно впливають на зниження викидів шкідливих сполук.

Результати вивчення шкідливих викидів при агломерації, представлені в [34], свідчать, що скорочення викидів можна досягти при радикальному скороченні споживання твердого палива на процес спікання шихти. Таким чином, чим менше спалюється палива, тим менше утворюється продуктів горіння, що видаляються в атмосферу.

Метою дослідження є визначення питомих викидів шкідливих газів по висоті шару, що спікається, за умови формування необхідної структури шихтового матеріалу, підготовленого до спікання.

Переважний вплив на умови протікання агломераційного процесу та якісні характеристики агломерату має структура підготовленого до спікання

шару залізорудного матеріалу та закономірності розподілу за його висотою палива та хімічних компонентів.

Посилення сегрегаційних процесів у шарі шихтового матеріалу, що завантажується при використанні складового завантажувального лотка, дозволило забезпечити збільшення нерівномірності розподілу твердого палива та окремих хімічних компонентів по шару. Знаючи зміну середнього діаметра частинок шихти по висоті спального візка, рис. 2.12, на підставі функціональних залежностей, отриманих у [9], можна розрахувати вміст твердого палива та хімічних компонентів у горизонтах шару шихти.

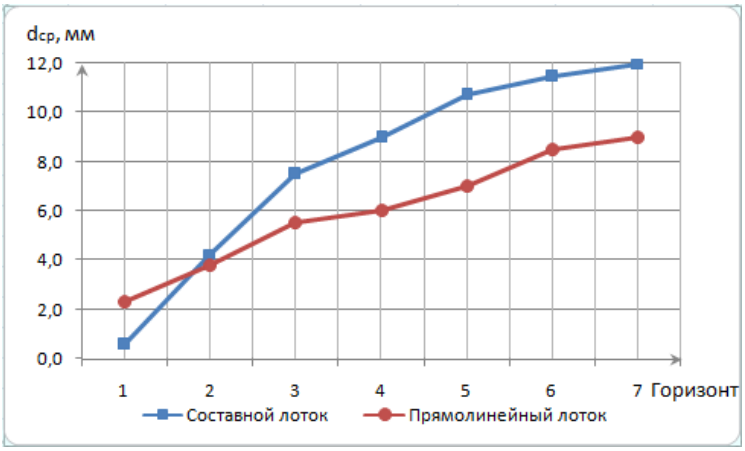


Рисунок 2.12 - Зміна середнього діаметра частинок шихти по горизонтах шару при використанні для завантаження прямолінійного та складного лотків

Таким чином, на підставі залежностей [27], можна реалізувати наближений розрахунок кількості шкідливих викидів агломераційного виробництва при стандартному, з використанням вібраційного живильника і відбивного листа (прямолінійного лотка), і запропонованому, з використанням вібраційного живильника і складового лотка, способах завантаження шихт.

Загальна кількість продуктів горіння, що утворюється при агломерації шихти, можна визначити з рівняння [27]:

$$V_{Г} = \frac{100}{21}\left(C_{ш} - C_{а} - C_{п}\right)\frac{n \cdot 0,5 \cdot 22,4}{\mu_{C}} \cdot \frac{2+\alpha}{1+\alpha}, \qquad (2.2)$$

де $C_{ш}$ - кількість вуглецю в шихті, кг; $C_{а}$ - кількість вуглецю в агломераті, кг; $C_{п}$ - кількість вуглецю, віднесена пилом, кг; n - коефіцієнт надлишку повітря; α - відношення процентних змістів *CO CO* й CO_2 в газі, залежить від витрати палива; μ_{C} - молекулярна маса вуглецю, кг/моль

Слід зазначити, що кількість пального вуглецю $C_{ш}$, за рахунок посилення сегрегації при запропонованому способі завантаження вдалося скоротити з 3,6-3,8% до 3,3%.

Для наближеного визначення питомих викидів окису вуглецю та вуглекислого газу з точністю до 15-20% скористаємося формулами [27]:

$$V_{CO} = \chi_{CO}\left(C_{ш} - C_{п} - C_{а}\right)\frac{\mu_{CO}}{\mu_{C}}, \qquad (2.3)$$

$$V_{CO_2} = \chi_{CO_2}\left(C_{ш} - C_{п} - C_{а}\right)\frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{C}}, \qquad (2.4)$$

де μ_{CO}, μ_{CO_2} - молекулярні маси окису вуглецю та вуглекислого газу відповідно, кг/моль; χ_{CO}, χ_{CO_2} - частка вуглецю, що перейшов у *CO* и CO_2;

$$\chi_{CO} = \frac{1}{1+\alpha}; \quad \chi_{CO_2} = \frac{\alpha}{1+\alpha}.$$

У процесі спікання агломерату сірка перетворюється на газ із шихти як сірчистого ангідриду. Вигоряння сірки при агломерації та ступінь знесірювання шихти залежить від мінералогічного складу сировини та вмісту твердого палива в шихті. Сегрегація шихтових матеріалів по висоті шару, також має важливий вплив на кількість викидів SO_2. На підставі [13] встановлено, що зміст *S*, як і *C*, у дрібних фракціях вище, ніж у більших. За рахунок переважної концентрації дрібних фракцій у верхніх горизонтах шару, при спіканні аглошихти, ступінь обезсірювання знижуватиметься, через підвищений вміст тут твердого палива. В результаті, в зоні горіння збільшується кількість залізистих та силікатних розплавів, у яких розчиняється велика кількість *FeS*.

Зміст сірчистого ангідриду в агломераційних газах, з точністю до 10-15%, можна розрахувати за формулою [27]:

$$V_{SO_2} = 2\left(S_{ш} - S_{а} - S_{п}\right), \qquad (2.5)$$

де $S_{ш}$ - сера шихти, кг/т агломерата;$S_{а}$ - сера агломерату, кг/т агломерата; $S_{п}$ - сірка, що захоплюється пилом, кг/т агломерату

Результати розрахунків виділення *CO* йи SO_2 по висоті спекаемого шару, при використанні прямолінійного та складеного лотків для завантаження шихти, представлені на рис. 2.13, 2.14.

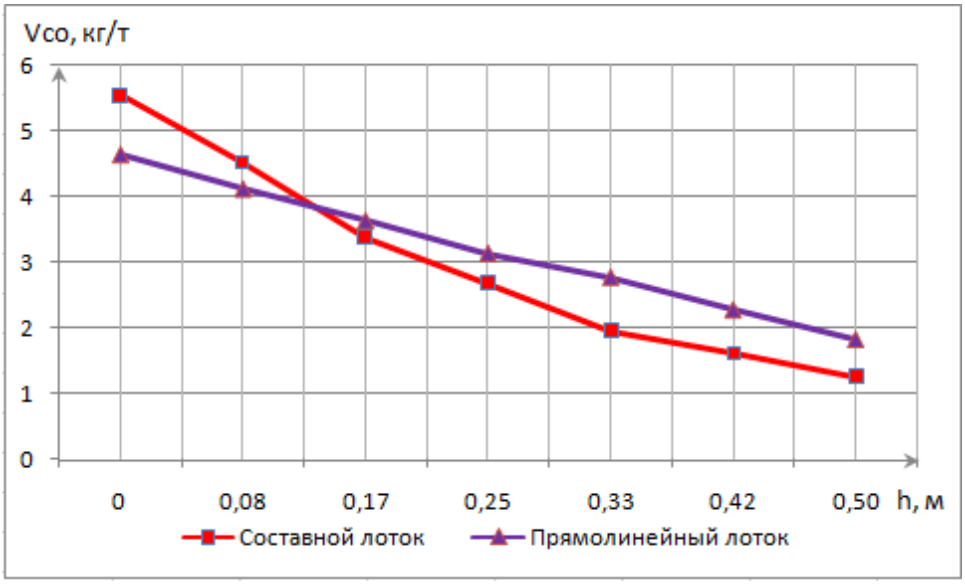


Рисунок 2.13 - Питомі викиди CO за висотою шару

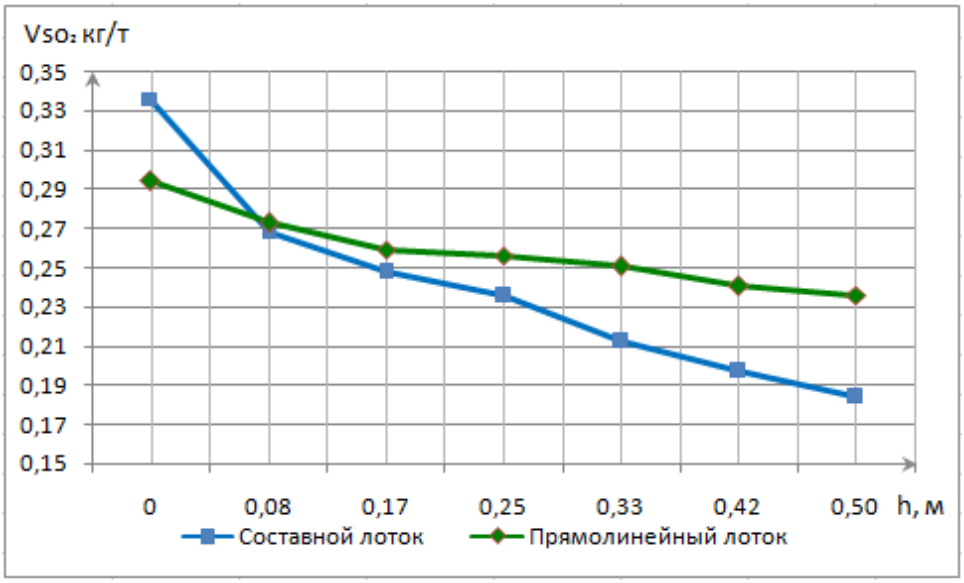


Рисунок 2.14 - Питомі викиди SO_2 за висотою шару

З представлених графіків видно, що на початкових етапах спікання, за рахунок концентрації у верхніх горизонтах шару дрібних фракцій шихти, останнє необхідне забезпечення необхідного температурного режиму спікання, спостерігається найбільше утворення шкідливих сполук, з подальшим їх скороченням при русі зони горіння до колосників.

Загальні викиди *CO*, CO_2 й SO_2 за шаром представлені на рис. 2.15.

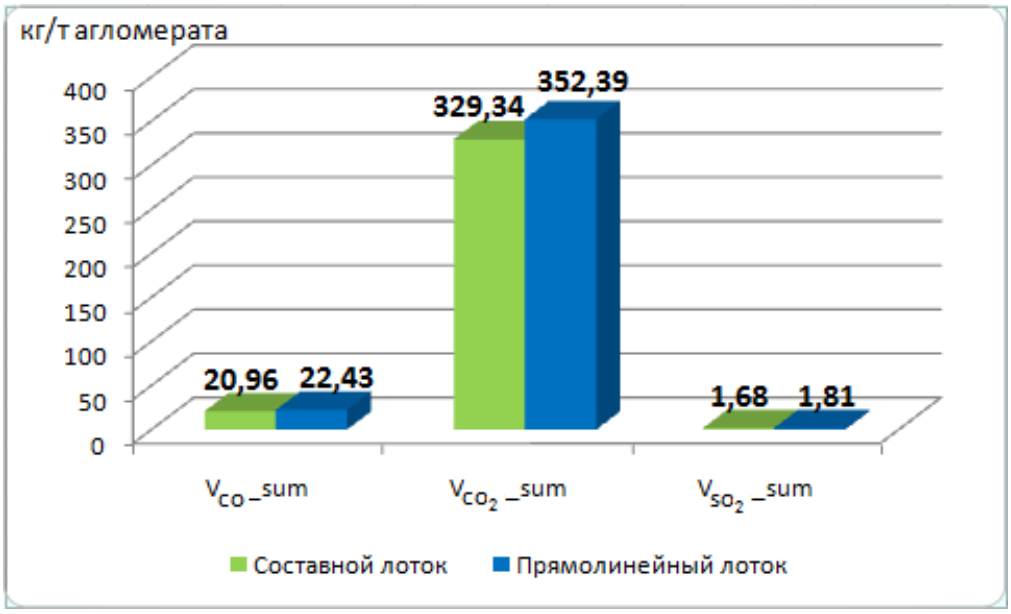


Рисунок 2.15 - Загальна кількість викидів шкідливих газів при використанні різних завантажувальних вузлів

Наведені у роботі розрахунки викидів шкідливих речовин (*CO*, CO_2, SO_2) агломераційного виробництва, дозволяють зробити висновок про позитивний вплив сегрегації на скорочення кількості газовиділень. Формування структури шару шихти, підготовленої до спікання з використанням складеного завантажувального лотка, дозволяє забезпечити посилення сегрегаційних процесів у шарі із загальним скороченням вмісту палива у шихті з 3,6-3,8% до 3,3%. При цьому викиди *CO* скорочуються на 6,55% (відн.), CO_2 на 6,54% (відн.) и SO_2 на 7,18% (відн).

Співвідношення обсягів CO:CO_2 у відпрацьованих газах за рахунок збільшення повноти згоряння вуглецю та загального скорочення його вмісту вдалося знизити з 0,63651% до 0,63642%.

ВИСНОВКИ

В роботі розвинуто методологію розрахунку конструктивних характеристик завантажувальних вузлів та оптимального розподілу фізико-хімічних компонентів матеріалу, що забезпечує стабілізацію теплового режиму термообробки.

1. Запропоновано методику дослідження динаміки процесу формування шару полідисперсного сипучого матеріалу, підготовленого до спікання. Розглянуто випадок завантаження шихти системами вібраційний живильник – прямолінійний лоток та барабанний живильник – прямолінійний лоток. Встановлено, що рух частинок матеріалу має відбуватися як чистого кочення. Останнє зумовлено тим, що у цьому режимі відбувається поділ часток різного розміру за швидкістю їх сходу із завантажувального лотка, цим забезпечуючи сегрегацію матеріалу за класами крупності. Отримано обмеження, що визначають режим руху частинок шихти завантажувального лотка.

Встановлено, що прямолінійний лоток не підходить для умов спікання агломераційної шихти у високих шарах, що створює необхідність вибору типу завантажувального пристрою, здатного забезпечити необхідну сегрегацію фракцій матеріалу.

2. Визначено значення коефіцієнтів тертя кочення та ковзання по сталі та шихті. Використання зазначених коефіцієнтів, у складі рівнянь характеризуючих розподіл частинок по висоті шару, що формується, дозволяє аналізувати вплив на формування шару полідисперсних матеріалів таких параметрів, як фізико-механічні властивості шихти, кут нахилу і довжина завантажувального лотка.

Досліджено динаміку процесу формування шару полідисперсного сипучого матеріалу при використанні різних вузлів завантаження, у комплекті з вібраційним живильником. Встановлено діапазон зміни параметрів лотків, що розглядаються, для їх ефективної роботи.

3. Зроблено висновок, що застосування складеного завантажувального лотка є найбільш ефективним для забезпечення необхідного розподілу фракцій матеріалу, і, як наслідок, необхідного розподілу твердого палива по горизонтах шихти підготовленої до спікання, що обумовлює можливість стабілізації теплового режиму процесу спікання. Запропоновано модифікацію складеного завантажувального лотка з додатковою стрілоподібною секцією (патент України №110975), покликаною знизити вплив приладових прососів повітря на тепловий режим спікання. Визначено конструктивні характеристики завантажувального вузла.

4. Встановлено зміну коефіцієнта газодинамічного опору від фракційного складу полідисперсної шихти Визначено втрати тиску у шарі заввишки 500 мм залежно від швидкості фільтрації повітря та сегрегації шихтових матеріалів за висотою. Встановлено, що збільшення швидкості фільтрації повітря від 0,3 до 1,2 м/с збільшує газодинамічний опір шару в 5 разів, а посилення сегрегаційних процесів у шарі позитивно впливає як на тепловий режим спікання, так і на газодинаміку шару.

5. Розроблено алгоритм управління завантажувальним пристроєм агломашини з формування оптимальної структури шару шихти підготовленої до спікання.

Результати розрахунків дозволили встановити оптимальні значення кутів нахилу секцій складеного завантажувального лотка α_1 (51°), α_2 (47°), що забезпечують найкращу відповідність оптимальному розподілу твердого палива та зниження втрат тиску по висоті шару агломераційної шихти.

6. Аналіз результатів активного експерименту зі спікання агломерату дозволив зробити висновок, що при використанні завантажувального лотка запропонованої конструкції покращуються сегрегаційні процеси в шарі, кількість фракції -3 мм у верхніх горизонтах шару (0-100 мм) збільшилася з 54,3 % до 59, 6% порівняно з схемою завантаження, що діє на підприємстві. Середній вміст палива на цих горизонтах зріс з 3,8 %, при використанні схеми

барабанний живильник – завантажувальний лоток, та 4,4 % при схемі вібраційний живильник – завантажувальний лоток, до 4,76 %, за умови скорочення загального вмісту твердого палива в шихті з 3,6-3,8% до 3,3%.

Результати випробувань свідчать, що стабілізація теплового режиму процесу спікання дозволила підвищити механічну міцність та вихід придатного на 4,22 %. Отримане скорочення споживання коксику за збереження якісних показників процесу спікання потенційно дозволить економити до 45 млн. грн. на рік із шести агломашин, для умов аглофабрики підприємства.

7. Запропонований підхід до формування структури шару шихти з використанням зіскладного завантажувального лотка, за рахунок загального скороченням споживання палива дозволив зменшити викиди у атмосферу по CO на 6,55 % (відн.), CO_2 на 6,54% (відн.) та SO_2 на 7,18% (відн).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Бережной, Н. Н. Анализ способов и систем загрузки агломерационных и обжиговых машин конвеерного типа. *Вісник КрНУ (збірник наукових праць)*. 2012. №32. С. 44-47.

2. Безверхий И. В. Разработка мероприятий для увеличения сегрегации агломерационной шихты при ее загрузке на аглоленту. *Международная научно-техническая конференция «Университетская наука 2010»*. Тезисы докладов. Том 1. Мариуполь, 2010. С. 40-42.

3. Петрушов С.Н. Формирование структуры агломерационного слоя шихты. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1998. №8. С. 21-24.

4. Крижевский А. З. Влияние гранулометрического состава спекаемой шихты на расход агломерационного топлива. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1992. №1. С. 4-6.

5. Maki Takeshi. Study for evaluation and optimization of iron ore granulation with consideration of dynamics and particle conditions. *ISJJ Int*. 2009. 49. #5. P.631-636.

6. Пазюк М. Ю. Влияние условий загрузки на формирование структуры слоя шихты. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1985. №6. С.133-136.

7. Пазюк М. Ю. Управление процессом формирования слоя агломерационной шихты. *Изв. вузов. Черная металлургия.* 1985. №10. С.131-134.

8. Мных А. С. Определение оптимального распределения твердого топлива в слое загружаемой шихты для выравнивания теплового режима агломерационного процесса. *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика (збірник наукових праць).* 2014. вып. 6. С. 69-79.

9. Мних А. С. Дослідження факторів, що впливають на формування шару полідисперсних залізорудних матеріалів. *Металургія (наукові праці Запорізької державної інженерної академії).* 2014. вип.1(31). С. 19-23.

10. Пазюк М. Ю. Особенности формирования слоя полидисперсных сыпучих материало. *Известия вузов. Черная металлургия.* 1983. № 10. С. 13-16.

11. Зенков, Р. Л. Бункерные устройства [Текст] / Р. Л. Зенков, Г. П. Гринкевич, В. С. Исаев. – М.: Машиностроение. – 1977. – 219 с. – Библиогр. : с. 214-216.

12. Мных, А. С. Исследование динамики процесса формирования слоя аглошихты подготовленной к тепловой обработке [Текст]/ А.С. Мных // ТАРП – 2015. №2/1 (22). – С. 39-42.

13. Сальников, И. М. Составной загрузочный лоток агломашины [Текст] / И. М. Сальников, М. Ю. Пазюк, Ю. Д. Гузь// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1990. -№10. – С.5-7.

14. Пат 42105 Україна, МПК F 27 B 21/06, C 22 B 1/16 (2009.01) Завантажувальний пристрій конвеєрної агломераційної машини/ Овчинникова І. А., Міщенко І. М., Ілюхін О. Я., Овчинников О. В. (Україна); заявник та патентотримач Запорізький нац. техн. Університет. - Заявл. 05.01.2009; опубл. 25.06.2009, Бюл. №12.

15. Авдеенко А.А. Оперативное определение газодинамического сопротивления слоя агломерационной машины / А.А. Авдеенко, Ю.Г. Клейн // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1998. - №12. – С.6-10.

16. Коротич, В. И. Газодинамика агломерационного процесса [Текст] / В. И. Коротич, В.П. Пузанов – М.: Металлургия, 1969. – 206 с.

17. Druet I. Medelisation de la segregation granulometrigue lors du chargement des chalnes d’aggregation/ I. Druet // Revue metallurgie. – 1984. - №2. – P. 89-99.

18. Фролов Ю.А. Анализ газодинамической работы агломерационных машин [Текст]/ Ю.А. Фролов // Сталь. 2005. №6. С. 42-51.

19. Петрушов, С. Н. Исследование и совершенствование укладки шихты на агломашину [Текст] / С.Н. Петрушов, А.П. Полухин, Л.М. Рузанов// Сб. «Теплотехника и газодинамика агломерационного процесса». Киев : Наукова думка. 1983. С. 29-33.

20. Matsumura T. Development of new feeding equipment for controlling charge segregation of sinter feed / T. Matsumura, S. Amano, H. Asahara.// Current Advances in Materials and Processes. 1999. №4. P 766. Яп.

21. Фролов, Ю. А. Исследование сегрегации агломерационных шихт [Текст] / Ю.А. Фролов, С.Г. Братчиков, Е.Е. Заславский и др.// Сталь. 1974. №10. С. 882-888.

22. Nakano M. Sintercake Structure Offering High Productivity and High Yield / M. Nakano, T. Kawaquchi, S. Kasama. // ICSTI Ironmaking Conference Proceedings. 1996. P.1283 - 1290. Англ.

23. Пазюк, М. Ю. Исследование сегрегации топлива в слое шихты [Текст] / М.Ю. Пазюк, В.И. Гранковский// Изв. вызов. Черная металлургия. 1982. №12. С. 6-8.

24. Мных А. С. К вопросу стабилизации теплового режима спекания аглошихты при использовании составного загрузочного лотка. *Сборник трудов ДГТУ (технические науки).* 2015. Вып. 1(26). С. 156-161.

25. Андоньев, С.М. Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии. Харьков : Металлургия, 1998. 246 с.

26. Бережной, Н. Н. Вредные выбросы при агломерации железорудных концентратов на ГОКах Кривбасса. *Вестник КрНУ.* 2006. № 2. С. 300–309.