

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний політехнічний університет

МНИХ АНТОН СЕРГІЙОВИЧ

УДК 669.162.1

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ
ЗГРУДКУВАННЯ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ
СЕГРЕГАЦІЇ У СТАЦІОНАРНИХ ШАРАХ**

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового степеня
доктора технічних наук

Запоріжжя - 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Запорізькій державній інженерній академії.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Яковлєва Ірина Геннадіївна,
Запорізька державна інженерна академія,
завідувач кафедри теплоенергетики.

Офіційні
опоненти: доктор технічних наук, професор
Губинський Михайло Володимирович,
Національна металургійна академія України,
завідувач кафедри промислової теплоенергетики;

доктор технічних наук, професор
Павленко Анатолій Михайлович,
Полтавський національний технічний університет,
завідувач кафедри теплогазопостачання,
вентиляції та теплоенергетики;

доктор технічних наук, професор
Ганжа Антон Миколайович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри теплотехніки та
енергоефективних технологій.

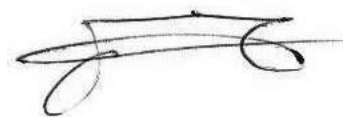
Захист дисертації відбудеться «12» січня 2017 р. о 12-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.04 Одеського національного політехнічного університету за адресою: ОНПУ, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, +38 (048) 705-83-01.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: ОНПУ, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044

Автореферат розіслано «26» листопада 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 41.052.04,

доктор технічних наук, професор Баласанян Г.А.



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Агломераційні й випальні 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 та випальних 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.

Актуальними є питання дослідження закономірностей й процесів, що протікають у шарі при його підготовці до теплової обробки й розробці технічних рішень, які спрямовані на забезпечення бажаної структурно-хімічної неоднорідності матеріалу й покращення газодинамічних характеристик шару.

Таким чином, комплексне вирішення проблеми енергозбереження, методів й засобів підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів за рахунок зниження витрати твердого палива, підвищення якості теплової обробки матеріалу й зменшення обсягів шкідливих викидів у атмосферу завдяки керуванню процесами сегрегації часток у шарі, підготовки твердого палива, формуванню структури шару із заданими газодинамічними характеристиками визначають актуальність розвитку наукових основ теплотехнічних процесів згрудкування сипучих матеріалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами и темами.

Результати роботи спрямовані на вирішення завдань, встановлених у «Концепції Державної цільової науково-технічної програми розвитку й реформування гірничо-металургійного комплексу України на період до 2020 року», у галузевих й регіональних програмах підвищення енергоефективності й зниження споживання енергоресурсів. Базовою для дисертаційної роботи є НДР «Наукове обґрунтування й розробка ефективних тепло- масообмінних процесів у інноваційних металургійних технологіях» (№ держ. рег. 0115U003176), де автор дисертації є відповідальним виконавцем.

Дослідження, результати яких наведені у роботі, проводились на основі двосторонніх договорів щодо науково-технічного співробітництва: № 20/2013/1065 від 08.05.2013 з ВАТ «Запоріжсталь» й №12-1с/2015 від 15.04.2015 з ПАТ «Запорізький абразивний комбінат».

Мета і завдання 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.

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 для підвищення якості продукту й продуктивності, зниження витрати палива й обсягів шкідливих викидів, що утворюються під час горіння;

2. Розробити математичну модель сполучених процесів газодинаміки, тепло- масообміну й горіння палива у шарі з урахуванням тепловиділення хімічних реакцій й змінних теплофізичних властивостей матеріалу під час теплової обробки;

3. Дослідити комплексний вплив фізичних величин (температура, вологість, крупність) на значення коефіцієнта теплопровідності шару матеріалу. Встановити закономірності зміни коефіцієнта тепловіддачі від сегрегаційних процесів у шарі;

4. Теоретично обґрунтувати вплив підсилення сегрегаційних процесів у шарі на вирівнювання теплового режиму згрудкування матеріалу, розробити методику ідентифікації структури шару шихтових матеріалів, підготовленого до спікання;

5. Встановити дослідним шляхом вплив гранулометричного складу шихти на розподіл твердого палива й хімічних компонентів по горизонтах шару, вивчити особливості фізико-хімічних процесів при протіканні екзо- й ендотермічних реакцій у шарі залізородних й бокситових матеріалів залежно від його гранулометричної неоднорідності;

6. Розробити принципи організації раціональної підготовки твердого палива для агломераційного процесу на базі вивчення механізмів подрібнення матеріалу у чотиривалковій дробарці;

7. На основі математичного моделювання провести чисельні дослідження з метою встановлення оптимального розподілу твердого палива для процесів агломерації залізорудних й бокситових матеріалів для стабілізації теплового режиму спікання, встановити закономірності необхідного розподілу фракційного складу матеріалу;

8. З метою стабілізації температурно-часового режиму обробки залізорудних котунів, провести дослідження із встановлення кількості теплоти, що необхідна для випалу котунів заданого розміру, встановити потрібний час й розподіл крупності котунів по горизонтах шару;

9. 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;

10. Дослідити динаміку процесів формування шару сипучого матеріалу при використанні завантажувальних пристроїв різноманітних конструкцій, що впливає на розподіл твердого палива й хімічних компонентів по горизонтах, встановити характеристики руху часток по поверхні лотка та відкосу шару. Розробити та впровадити технології завантаження матеріалу на базі раціональних конструкцій завантажувальних пристроїв для процесів агломерації залізорудної та бокситової шихт й процесу випалу залізорудних котунів;

11. З метою стабілізації теплового режиму процесу термообробки з урахуванням мінімізації обсягів споживання твердого палива й покращення газодинамічних характеристик шару розробити алгоритм оптимізації структури шару сипучого матеріалу;

12. Провести аналіз енергоефективності заходів щодо підсилення 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 – теплофізичні процеси при згрудкуванні сипучих матеріалів у стаціонарних шарах.

Предмет дослідження – вплив процесів тепло- масообміну, газодинаміки й 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 й бокситових 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. Проаналізовано хімічний склад гранул полідисперсних шихтових матеріалів підготовлених до спікання, встановлено функціональні залежності вмісту твердого палива й хімічних компонентів у залізорудних й бокситових матеріалах залежно від розміру гранул, що дозволило скласти тепловий баланс енергетичної системи.

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 й 1290...1380° С при агломерації бокситів, що забезпечує утворення дрібнопористого, легковідновлюваного агломерату з достатньою міцністю.

3. Вперше отримано залежності, що характеризують розподіл потужності джерел теплової енергії (горіння палива, ендо- та екзотермічні реакції при спіканні й т.д.) по висоті й ширині шару, що дозволило встановити раціональний розподіл твердого палива, тим самим забезпечуючи стабілізацію максимальної температури зони горіння. Встановлено процентне співвідношення складових джерел теплової енергії процесу спікання.

4. Отримали подальший розвиток дослідження спрямовані на стабілізацію температурно-часового режиму випалу котунів, встановлено залежності, які характеризують питомі енерговитрати на випал котунів у залежності від їх діаметру. На основі цих залежностей встановлено тривалість теплової обробки й раціональний розподіл крупності котунів по горизонтах шару.

5. Встановлено комплексний вплив фізико-хімічних параметрів (температура, вологість, крупність) на коефіцієнт теплопровідності сипучого матеріалу. Запропоновано використання середньозваженого коефіцієнта теплопровідності, встановлено його чисельні значення залежно від інтервалу варіювання ступеня впливу r_i вказаних параметрів.

6. Встановлено закономірності зміни коефіцієнта тепловіддачі по висоті шару від ступеня розділення класів крупності сипучого матеріалу, що обумовлено типом завантажувальної системи, яка використовується. При завантаженні залізорудного матеріалу вібраційним живильником, відбувається ослаблення зв'язків між частками сипучого матеріалу, що підсилює сегрегаційні процеси у шарі, коефіцієнт α_v у даному випадку змінюється по функції близькій до експоненціальної у межах 2800...9500 Вт/(м³·К). При використанні барабанного живильника, сегрегаційні процеси не значні, в результаті спостерігається монотонне зменшення величини коефіцієнта, для випадку залізорудного матеріалу, діапазон зміни α_v склав 3300...4800

Вт/(м³·К), а бокситів 5900...7200 Вт/(м³·К). Останнє зв'язано з більшим розміром часток бокситового матеріалу.

7. Набули подальшого розвитку наукові основи механізму подрібнення твердого палива у чотиривалковій дробарці з метою підвищення енергоефективності процесу. Встановлено вплив стискаючих й стираючих навантажень на вихід кондиційної фракції 0,5...3,0 мм. Отримано залежності, які характеризують інтенсивність виходу кондиційної фракції й раціональної продуктивності дробарки при подрібненні антрацитового штибу й коксової дрібноти. Отримано функціональні залежності часу вигорання кондиційної фракції від діаметру часток палива.

8. Отримали узагальнення й подальший розвиток теоретичні основи динаміки структуроутворення шару сипучого матеріалу при використанні різноманітних типів завантажувальних пристроїв. Експериментально встановлено значення коефіцієнтів тертя кочення і ковзання по поверхні відкосу шару та лотка залежно від вологості й гранулометричного складу часток матеріалу. 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), який забезпечує утворення структури шару з максимально близьким до оптимального розподілом твердого палива по висоті й ширині палети з метою стабілізації температурного режиму спікання. Лоток доповнено стрілоподібною секцією з метою зменшення впливу виявлених прибортових підсосів повітря й підвищення концентрації твердого палива в цих зонах. Розрахунок економічного ефекту, що очікується в умовах ВАТ «Запоріжсталь», свідчить, що обсяг виробництва від впровадження збільшиться з 5872,9 тис. т/рік до 5902,64 тис. т/рік, вихід придатного – на 4,22% при зниженні питомої витрати палива на 9,81...15,14%. Загальний економічний ефект склав до 45 млн. грн./рік з шести агломашин для умов аглофабрики підприємства (станом цін на енергоносії на 09.2016 р.).

2. Розроблено та впроваджено технології завантаження на базі конструкцій завантажувальних вузлів для процесів агломерації бокситової шихти в умовах ПАТ «Запорізький абразивний комбінат» та випалу залізородних котунів (Патент України на корисну модель №104024), для умов ЦГОК м. Кривий-Ріг. Розроблено методику розрахунку конструктивних характеристик завантажувальних вузлів, яка дозволяє забезпечити формування структури матеріалу підготовленого до термообробки з заданими газодинамічними характеристиками й необхідним розподілом фізико-хімічних компонентів.

3. Розроблено методологію розрахунку продуктивності чотиривалкової дробарки для вирішення завдання раціоналізації процесу подрібнення твердого

палива, з метою збільшення виходу кондиційної фракції (0,5-3 мм). Запропоновано нову схему подрібнення, яка ліквідує шкідливе подрібнення кондиційної фракції палива зі зменшенням частки стираючих навантажень при подрібненні.

4. Отримала подальший розвиток методологія ідентифікації структури шару шихтових матеріалів, яка дозволяє в режимі реального часу оцінювати розподіл фракційного складу шихти по горизонтах. Останнє знімає необхідність проведення ситового аналізу й підвищує оперативність генерації корегуючих впливів на завантажувальний вузол конвеєрної машини.

5. Розроблено комплексну математичну модель теплового режиму згрудкування сипучих матеріалів, яка базується на методі кінцевих елементів, з урахуванням сегрегаційних процесів у шарі й змінних теплофізичних властивості матеріалу, яка дозволяє здійснювати розрахунок температурного поля по горизонтах шару й сформулювати рекомендації щодо необхідного розподілу твердого палива й хімічних компонентів по висоті палети конвеєрної машини.

6. Розроблено алгоритм й програмне забезпечення для вирішення завдання оптимізації структури шару агломераційної шихти. За допомогою програми й математичного моделювання здійснено розрахунок кутів нахилу завантажувальних площин зі складного лотка, що дозволило забезпечити максимально близьке до необхідного розподілення твердого палива по горизонтах й зниження газодинамічного спротиву шару матеріалу.

Наукові розробки по стабілізації теплового режиму процесу спікання залізорудних й бокситових матеріалів знайшли відображення у патентах України на корисні моделі № 104024 й №110975, а також прийняті до використання ВАТ «Запоріжсталь» та ПАТ «Запорізький абразивний комбінат». Проектні рішення щодо усунення нерівномірної теплової обробки залізорудних котунів використані Асоціацією «ЕНЕРГОИНТЕХ». Розробки, наведені у дисертації, використані у навчальному процесі кафедр металургії, енергоефективності енергозабезпечення, теплоенергетики й автоматизованого керування технологічними процесами Запорізької державної інженерної академії.

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», ПАТ «Запоріжабразив», що знайшло відображення у спільних публікаціях. У наукових працях автора, що опубліковані у співавторстві особистий внесок здобувача полягає у: [5] проведенні досліджень з вивчення сегрегаційних процесів у шарі полідисперсної агломераційної шихти; [2, 6] розробці методології ідентифікації гранулометричного складу шихти у динаміці; [23] проведенні експериментів по встановленню газодинамічних характеристик шару полідисперсної шихти; [26] у розробці рішень з підвищення енергоефективності процесу підготовки твердого палива; [37] у встановленні закономірностей зміни коефіцієнта тепловіддачі по висоті

шару; [3] розробці й проведенні експерименту зі встановлення хімічного складу гранул шихти; [11] отриманні експериментальних даних з метою встановлення адекватності моделі; [12] розробці методики розрахунку фракційного складу шару сипучого матеріалу; [15] розрахунку конструктивних характеристик модифікованого зіскладного завантажувального лотка; [24] розробці алгоритму оптимізації структури шару сипучого матеріалу; [27] розрахунку обсягів скорочення шкідливих викидів у атмосферу за рахунок зниження споживання палива; [1] розробці методики й проведенні досліджень щодо оцінки ефективності згрудкування шихти.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення, результати та висновки наукового дослідження доповідались автором, обговорювались та отримали схвальні відгуки на наукових семінарах кафедр ТЕ, АУТП та МЧМ ЗДІА, м. Запоріжжя, 2014-2015 рр.; на Придніпровському науковому семінарі «Технічна теплофізика, промислова теплоенергетика й теплотехніка», м. Дніпропетровськ, 2015-2016 рр.; на міжнародних конференціях, семінарах, симпозіумах, форумах, взагалі прийнято участі у 10 конференціях, у тому числі:

проведених в Україні – Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальные вопросы энергоэффективности горно-металлургического производства», м. Кривий-Ріг, 2015 р.; Всеукраїнська науково-практична конференція «Проблемы энергоресурсосбережения в промышленном регионе. Наука и практика», м. Маріупіль, 2015 р.; Міжнародна науково-технічна конференція «Фундаментальные и прикладные проблемы современных технологий», м. Тернопіль, 2015 р.; IV Міжнародна науково-практична конференція «Проектирование предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения, защиты окружающей природной среды», м. Харків, 2015 р.

проведених у країнах Європейського Союзу – XI Міжнародна науково-практична конференція «Новости научной мысли - 2015», м. Прага, Чехія, 2015 р.; X Міжнародна науково-практична конференція «Перспективные вопросы мировой науки», м. Софія, Болгарія, 2015 р.

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 39 наукових праць, з яких 27 статей у спеціалізованих наукових виданнях України і в наукових періодичних іноземних виданнях (з них: 12 - одноосібні), 10 статей у наукових періодичних виданнях, які мають індекс цитування у міжнародних наукометричних базах, 2 патенти України на корисну модель, 10 тез доповідей, з них: 2 роботи у матеріалах й трудах закордонних міжнародних конференцій (одноосібні), 2 роботи у матеріалах міжнародних конференцій в Україні (одноосібні).

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури й 8 додатків. Основний матеріал викладено на 309 сторінках машинописного тексту з урахуванням 112 малюнків й 29 таблиць. Бібліографія містить 263 найменування робіт й наведена на 30 сторінках. Загальний обсяг роботи складає 354 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та завдання, об'єкт, предмет й методи дослідження, розкрито наукову новизну й практичне значення отриманих результатів. Наведено інформацію щодо публікації результатів дисертаційних досліджень, особистий внесок здобувача у співавторстві, апробацію результатів роботи, зв'язок дисертації з бюджетною тематикою науково-дослідних робіт.

У першому розділі вирішено перше завдання, наведено аналіз літературних джерел щодо сучасного стану процесів теплової обробки сипучих матеріалів у масштабі вітчизняної та світової практики, представлено огляд напрямків удосконалення роботи машин конвеєрного типу.

Вагомий внесок у розвиток процесів тепло- масообміну й газодинаміки при тепловій обробці сипучого матеріалу внесли представники світової та української наукових шкіл, видатні вчені: Г. Вендеборн, Е. Войс, В.Я. Міллер, А.М. Парфенов, А.А. Сігов, С.В. Базилевич, Е.Ф. Вегман, С.Н. Петрушов, М.Ю. Пазюк та багато інших. Велика роль у розвитку теорії складного теплообміну у шарових процесах належить таким вченим: Н.А. Глінков, Б.І. Кітаєв, В.Н. Тимофєєв, В.Г. Лісієнко, Е.Н. Гольдфарб та інші.

Особливістю сучасного етапу розвитку процесів згрудкування є те, що поряд з проблемами інтенсифікації теплообміну, підвищення швидкості спікання й продуктивності, все більш актуальними є питання економічної складової процесу – енергоефективності, якості спікання й котунів, екології виробництва.

Виділено основні завдання розвитку теорії теплової обробки стаціонарних шарів сипучих матеріалів: скорочення обсягів використання енергетичних ресурсів, зокрема твердого палива, з метою зниження собівартості продукції; дослідження умов завантаження матеріалу й сегрегаційних процесів в ньому, з метою покращення газодинамічних характеристик високих шарів й зменшення навантаження на тягодутьове обладнання конвеєрних машин; отримання продукції високої якості з урахуванням зниження рівня шкідливих викидів й мінімального негативного впливу на навколишнє середовище.

Основними підходами до вирішення завдань з удосконалення процесів згрудкування (зниження питомої витрати палива) є застосування багатошарового завантаження сипучого матеріалу, спікання шихти у підвищеному шарі, попереднє підігрівання шихти, підвищення вертикальної швидкості теплової обробки. Лімітованою ланкою підвищення продуктивності процесів згрудкування є покращення якості агломерату при підвищенні швидкості спікання. Висока швидкість переміщення зони горіння тісно пов'язана з інтенсивністю теплообміну між шихтою й газами, що рухаються й теплотою горіння палива. Формування структури агломерату визначає його найважливіші якості – міцність й відновлюваність.

Відмічено, що інтенсивність протікання теплових процесів у високотемпературній зоні агломерованого матеріалу залежить від кількості

повітря, що надходить у шар. Останнє залежить від його газодинамічного опору, тобто від структури шару сипучого матеріалу. Газопроникність шару, що спікається, можна суттєво покращити, якщо під час завантаження шихти на конвеєрну машину збільшити співвідношення найбільших й найменших часток зверху вниз, тобто збільшити значення коефіцієнта сегрегації. Наведені у літературі результати досліджень свідчать щодо можливості підвищення газопроникності агломераційної шихти за рахунок сегрегації на 20%.

Сегрегація матеріалу за хімічним складом при завантаженні на конвеєрну машину зі збільшенням вмісту палива у горі шару позитивно впливає на розподіл теплоти по горизонтах матеріалу. У працях японських дослідників встановлено, що сегрегація бажана при відсутності комбінованого нагрівання шихти тому, що призводить до стабілізації теплового режиму процесу спікання. При комбінованому нагріванні, коли витрати палива зменшуються на 10%, його перерозподіл призводить до нестачі теплоти у нижніх горизонтах шару.

У першому розділі наведено огляд наукових праць щодо інтенсифікації випалу стаціонарного шару залізорудних котунів. Багаточисельні теоретичні й експериментальні роботи свідчать, що кінетика випалу котунів багато в чому визначається властивостями залізорудних концентратів, якістю сирих котунів, але головним чином залежить від температурно-часових умов випалу.

Результати розрахункових, експериментальних досліджень й практика роботи випальних машин конвеєрного типу свідчать, що навіть в умовах оптимальних параметрів теплоносія, висоти шару котунів й розміру зон випальної машини при звичайному способі випалу з використанням перехресної схеми теплообміну, неможливо повністю усунути нерівномірність нагрівання шару по всій висоті. Недостатня температура випалу й обмежена тривалість витримки не забезпечують повного закінчення процесів термозміцнення котунів нижніх горизонтів. Тому котуни цієї частини шару мають гірші якісні показники.

Проведено огляд літератури стосовно питань щодо утворення шкідливих речовин при згрудкуванні сипучих матеріалів. Розглянуто методи зниження викидів. Встановлено, що кардинальним фактором скорочення викидів CO , є зменшення витрати твердого палива й зменшення частки використання його дрібних фракцій на процес спікання.

На основі аналізу літературних джерел зроблено висновок, що здебільшого на якісні показники агломерату впливає структура підготовленого до спікання шару сипучого матеріалу й закономірності розподілу по його висоті палива й флюсів. Останнє обумовлює газодинаміку шару й інтенсивність екзо- й ендотермічних реакцій, що протікають в ньому й температурний режим процесу згрудкування. Останнім часом на агломераційних машинах завантаження шихтових компонентів здійснюється при використанні завантажувального листа, який забезпечує низьке розділення класів крупності матеріалу. Актуальним стає питання розробки конструкцій завантажувальних вузлів агломашини з метою керування розподілом фракцій й відповідно твердого палива у шихті по висоті шару на палетах конвеєрної машини.

Останнє забезпечить покращення використання хімічної й гранулометричної неоднорідності шихти, зниження витрати твердого палива й підвищення продуктивності.

Наведені у дисертації результати досліджень відносно удосконалення технології випалу котунів, дозволили зробити висновок, що у працях не приділяється достатньої уваги питанням керування завантаженням матеріалу на конвеєрну машину з метою стабілізації температурно-часового режиму їх обробки. Надходження теплоти по висоті шару є нерівномірним й для випалу котунів різного розміру необхідна різна кількість теплоти, яка поступає з продуктами горіння. У зв'язку з цим актуальними стають дослідження щодо встановлення впливу розміру котунів на енерговитрати для їх теплової обробки й вивчення можливостей диференційованого завантаження котунів у шар.

Дослідження тепло- масобмінних процесів, що протікають по горизонтах шару з метою стабілізації температурно-часової обробки сипучого матеріалу за рахунок оптимізації умов формування останнього, потребують проведення досліджень на базі математичного моделювання.

У другому розділі вирішено завдання 2 та 3, реалізовано математичний опис теплообмінних процесів, що протікають у стаціонарних шарах моно- та полідисперсних матеріалів з урахуванням внутрішніх джерел теплової енергії.

Процеси теплообміну у шарі значною мірою залежать від таких властивостей сипучих матеріалів: теплоємність, теплопровідність, порозність й крупність часток, що впливає на швидкість переміщення теплової хвилі в його об'ємі. Структура шару суттєво впливає на порозність шару, а також на його теплофізичні характеристики й газодинаміку, що необхідно враховувати при математичному описі теплових процесів у моно- й полідисперсних шарах матеріалів, підготовлених до теплової обробки.

Фізична модель процесу згрудкування, рис. 1, представлена таким чином: через шар сипучого матеріалу з порозністю ε_i , з висотою H й температурою T_m , рухається газ, температура якого на вході у шар дорівнює T_2 , а швидкість газового потоку характеризується величиною ω_2 .

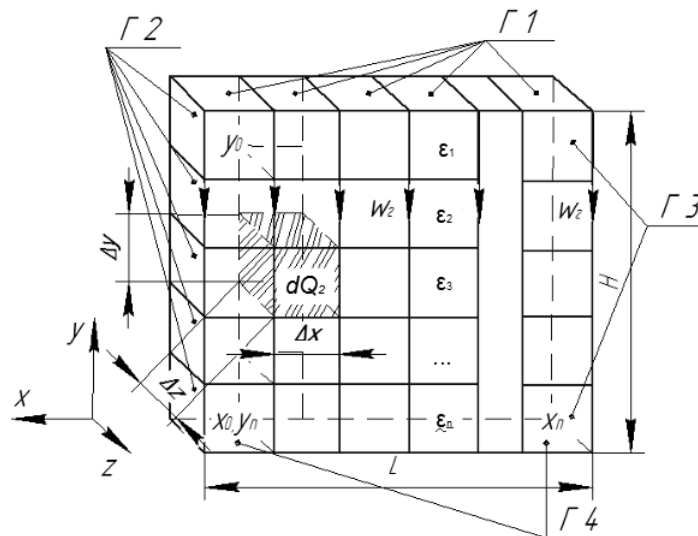


Рис. 1. Схема теплообміну у пористому шарі.

Прийmemo шар сипучого матеріалу на палеті конвеєрної машини як стаціонарний, градієнт температур у якому спрямований по осі (y). Для дотримання технологічних вимог необхідно забезпечити відповідний рівень температур по висоті й ширині палети (x, y). Враховуючи те, що розглядається квазістаціонарний процес спікання й рух шару на теплопередачу вздовж вісі (z) не враховуємо, здійснено перехід до двовимірної моделі. У постановці прийнято такі допущення: тепловий потік від газу до гранул у будь якій точці шару пропорційний різниці температур між поверхнею часток й газом; коефіцієнт тепловіддачі від газу до гранул постійний для всієї поверхні гранули.

Отримана система рівнянь, описує теплові процеси, що протікають у шарі сипучого матеріалу, має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{pm}(T) \rho_{nac}(T)(1-\varepsilon_i) \left[\frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y} \right] = \\ = \left[\frac{\partial T_m}{\partial x} \left(\lambda_z \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial y} \left(\lambda_z \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \right] + q_2(x, y, z); \\ \alpha_v (T_z - T_m) dx dy dz dt = -c_z \rho_z \varepsilon_i \frac{\partial T_z}{\partial t} - c_z \rho_z \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y}; \\ \frac{dP}{dy} = \psi_{cl} \omega_z^2 \rho_z \frac{y}{r_3^2} (1 + \beta T_z). \end{array} \right. \quad (2.1)$$

де: c_{pm} - ізобарна теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К); ρ_{nac} - насипна щільність шару матеріалу, кг/м³, $T_z, T_m(x, y, z, t)$ - температура газу й матеріалу, К; c_z - теплоємність газу, кДж/(кг·К); ρ_z - щільність газу, кг/м³; ω_z - швидкість газового потоку, м/с, ε_i - порозність шару, м³/м³. λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); α_v - об'ємний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м³·К); h - висота шару, м; r_3 - радіус еквівалентного каналу, м; β - коефіцієнт об'ємного розширення газу, К⁻¹; q_2 - потужність внутрішніх джерел енергії (з урахуванням теплових процесів й теплообміну у шарі), Вт.

Кількісна оцінка потужності внутрішніх джерел дана шляхом складання елементарних теплових балансів для елементарних об'ємів, які складають шар сипучого матеріалу. У загальному вигляді потужність внутрішніх джерел теплоти у елементарному об'ємі представлено таким чином:

$$q = \frac{Qm\varepsilon}{V\rho_m t}; \quad (2.2)$$

де: Q - теплота, що виділяється в елементарному об'ємі шару, яка розраховується з теплового балансу й враховує теплообмін між газом й матеріалом й теплоту хімічних реакцій, кДж; m - маса елементарного об'єму, кг; V - об'єм елементарного об'єму, м³; ρ_m - щільність матеріалу, кг/м³; t - час теплової обробки, с.

Для встановлення обсягів тепловиділення в елементарному об'ємі використано метод зональних теплових балансів, рис. 2.

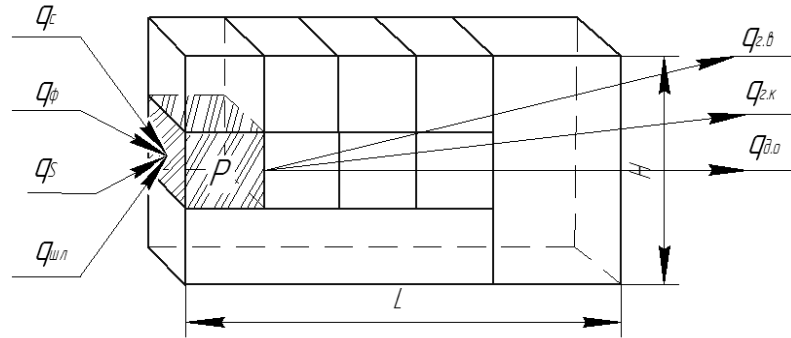


Рис. 2. Елементарний об'єм агломераційного шару:

q_c – теплота, що виділяється при горінні палива, q_ϕ – надходження теплоти від хімічних реакцій, q_s – надходження теплоти від окислення сірки, $q_{шл}$ – теплота шлакоутворення, $q_{г.в}$ – теплота на випаровування гігроскопічної вологи, $q_{г.к}$ – теплота на дисоціацію гідратів й карбонатів, $q_{д.о}$ – теплота на дисоціацію оксиду гематиту.

Враховуючи те, що у реальних технологічних умовах агломерації на шар матеріалу, який знаходиться на конвеєрній машині, зверху діє джерело постійної температури – запалювальний горн, а з боків й знизу шар контактує із зовнішнім середовищем шляхом конвективного теплообміну, початкові (ПУ) й граничні умови (ГУ) запишуться у такому вигляді:

$$\text{П.У. } t_0 = 0, T_m(x, y, z) = T_0, T_z(x, y, z) = T_0, \Delta P(y) = \Delta P(t_0).$$

$$\text{Г.У.} \therefore y = y_0; T_m|_{\Gamma_1} = T_z, t > 0,$$

$$x = x_0; -\lambda_\Sigma(T, W) \left. \frac{\partial T_m}{\partial x} \right|_{\Gamma_2} = \alpha_{F1} (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0, \quad (2.3)$$

$$x = x_n; -\lambda_\Sigma(T, W) \left. \frac{\partial T_m}{\partial x} \right|_{\Gamma_3} = \alpha_{F2} (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$y = y_n; -\lambda_\Sigma(T, W) \left. \frac{\partial T_m}{\partial y} \right|_{\Gamma_4} = \alpha_{F3} (T_m(x, y, z) - T_{o.c.}), t > 0,$$

$$z_n - z_0 = 1.$$

З метою встановлення значень коефіцієнта теплопровідності залежно від впливу фізичних величин (температура, вологість, розмір) у системі рівнянь (2.1) здійснена заміна змінної $\lambda(T, W, d)$ на середньозважене значення коефіцієнта теплопровідності λ_Σ , яке розраховується таким чином:

$$\lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i; \quad (2.4)$$

де: λ_i - значення коефіцієнта теплопровідності залежно від фізичної величини (T, W, d) , Вт/(м·К); r_i - ступінь впливу фізичної величини на λ_i , частка.

З метою встановлення чисельного значення коефіцієнта r_i проведена обробка дослідних даних Чудновського А.Ф. Діапазон зміни експериментальних даних звужено відповідно до реальних характеристик сировинних матеріалів $W(6 \div 12), \%$, $d(0,14 \div 0,917)$,мм й теплових режимів роботи конвеєрних машин $T(20 \div 1200)$, °C. В результаті встановлено інтервал варіювання ступеня впливу вказаних фізичних величин на коефіцієнт теплопровідності, який склав: $r_i(W) = 0,58 \div 0,41$, $r_i(d) = 0,22 \div 0,17$, $r_i(T) = 0,2 \div 0,42$.

$$r_i(W) = \frac{\eta(W)}{\eta_{\Sigma}}; \quad r_i(d) = \frac{\eta(d)}{\eta_{\Sigma}}; \quad r_i(T) = \frac{\eta(T)}{\eta_{\Sigma}};$$

де: $\eta(W)$, $\eta(d)$, $\eta(T)$ - діапазон зміни коефіцієнта теплопровідності від відповідної фізичної величини, Вт/(м·К); η_{Σ} - величина сумарного впливу фізичних величин на коефіцієнт теплопровідності зернистого шару, Вт/(м·К).

Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі, що входить до складу рівнянь, для часток сферичної або близької до неї форми виконано за формулами Тимофєєва В.Н., які мають вигляд:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,61 Re^{0,67} \quad (npu - Re > 200); \\ Nu &= 0,106 Re \quad (npu - Re \leq 200). \end{aligned} \quad (2.5)$$

де: $Nu = \alpha_F \cdot d_m / \lambda_2$; $Re = \omega_2 \cdot d_m / \nu_i$; $\alpha_V = \alpha_F \cdot 6(1-f) / d_m$; w_2 - швидкість руху продуктів згоряння, м/с; d_m - середній діаметр часток матеріалу, м; ν_i - коефіцієнт кінематичної в'язкості газу; λ_2 - коефіцієнт теплопровідності газу.

На базі експериментальних даних по встановленню середнього діаметра сипучого залізородного й бокситового матеріалу з урахуванням використання різних типів завантажувальних вузлів встановлені закономірності зміни об'ємного коефіцієнта тепловіддачі для шарів шихти, підготовленої до теплової обробки, рис. 3,4.

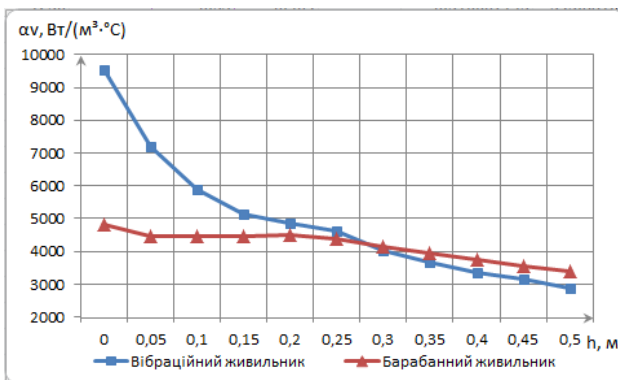


Рис. 3. Зміна значення α_V по висоті шару залізородної шихти

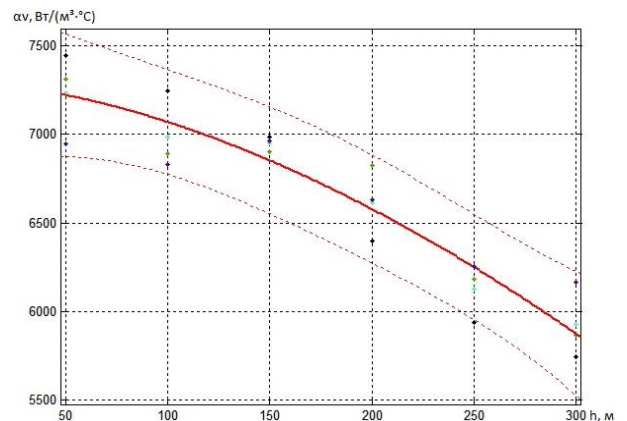


Рис. 4. Зміна значення α_V по висоті шару бокситової шихти

При завантаженні залізородного матеріалу вібраційним живильником, відбувається ослаблення зв'язків між частками сипучого матеріалу, що підсилює сегрегаційні процеси у шарі, коефіцієнт α_v у даному випадку змінюється у межах 2800...9500 Вт/(м³·К). При використанні барабанного живильника, сегрегаційні процеси не значні, в результаті спостерігається монотонне зменшення величини коефіцієнта, для випадку залізородного матеріалу діапазон зміни α_v склав 3300...4800 Вт/(м³·К), а бокситів 5900...7200 Вт/(м³·К). Останнє зв'язано з більшим розміром часток бокситового матеріалу. Наведені результати свідчать про значний вплив ступеня розподілу класів крупності сипучого матеріалу на зміну значення α_v по висоті, що необхідно враховувати при моделюванні теплових процесів, що протікають у шарі.

Для випадку випалу залізородних котунів, які представляють собою, у рамках окремого горизонту шар монодисперсного матеріалу, рівняння, що входить до складу системи (2.1) набуде вигляду:

$$c_{pm}(T)\rho_{nac}(T)(1-\varepsilon)\left[\frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y}\right] = \left[\frac{\partial T_m}{\partial x}\left(\lambda(T,W)\frac{\partial T_m}{\partial x}\right) + \frac{\partial T_m}{\partial y}\left(\lambda(T,W)\frac{\partial T_m}{\partial y}\right) + \frac{\partial T_m}{\partial z}\left(\lambda(T,W)\frac{\partial T_m}{\partial z}\right)\right] + q(x,y,z).$$

Потужність внутрішніх джерел теплоти, яка входить до складу рівняння, встановлюється значною мірою інтенсивністю екзо- та ендотермічних реакцій, що протікають у шарі котунів з тієї причини, що цей технологічний процес відбувається виключно за рахунок температури теплоносія, який надходить у шар сипучого матеріалу, без використання твердого палива. Технологічні рішення, спрямовані на використання пилоподібної коксової дрібноти у процесі випалу котунів шляхом її накопчування на поверхню гранул, не отримали широкого розповсюдження через значні втрати вартісного палива дрібної фракції з потоком продуктів згоряння.

Синтез тривимірної теплової моделі процесу спікання сипучого матеріалу здійснено у програмному продукті Ansys, який базується на методі скінчених елементів (МСК), для чого зріз шару сипучого матеріалу розбито на елементарні об'єми, рис. 5, 6.

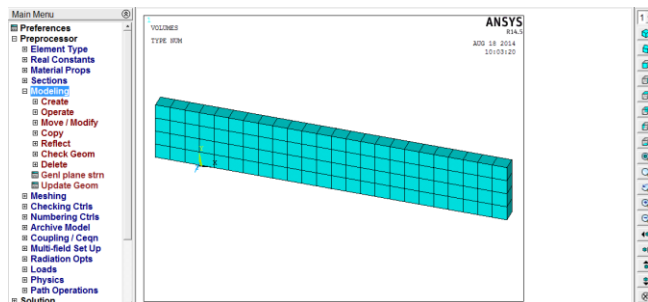


Рис. 5. Розрахункова область моделі

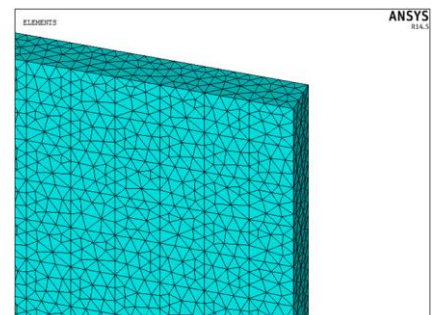


Рис. 6. Кінцево-елементна сітка

Розрахунки, отримані з використанням двовимірної кінцево-елементної моделі, досить добре узгоджуються з результатами лабораторних спікань при відсутності сегрегації палива по висоті шару рис. 7, що обумовлює значний перепад температур до 300 °С, між верхніми й нижніми горизонтами. Адекватність моделі склала 18...20%.

Відомо, що рівномірність розподілу температури по висоті шару позитивно впливає на якість агломерату. Таким чином, поряд з актуальністю проблеми стабілізації температури зони горіння по висоті шару, важливим є завдання встановлення температурного діапазону спікання, який забезпечить отримання міцного, дрібнопористого, легковідновлюваного агломерату.

Для встановлення вказаного діапазону температур проведено низку експериментів по спіканню агломераційної шихти в чаші при різних температурах. Виходячи з результатів експериментів, рис. 8, найкращу відновлювальну здатність мають агломерати, спечені у температурному інтервалі 1250...1350°С, зразки мали пористу структуру без суттєвого переоплавлення агломерату.

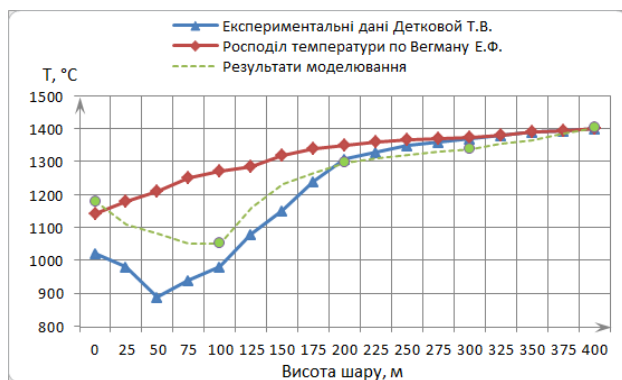


Рис. 7. Розподіл температур по висоті шару, що спікається

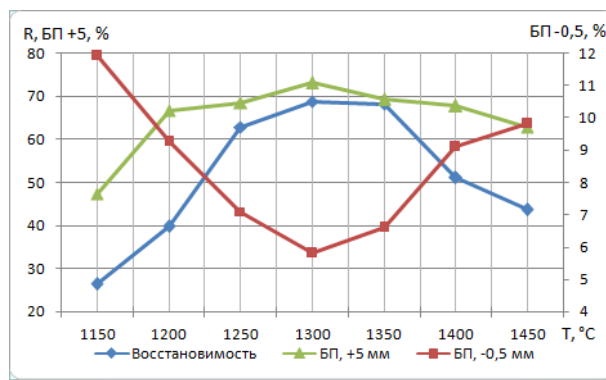


Рис. 8. Вплив температури спікання на якісні характеристики агломерату

Для цього ж діапазону температур характерний найбільший вихід фракції +5 мм за результатами барабанної проби й зниження виходу пилоподібних класів -0,5 мм.

Стабілізації температури зони горіння у вказаному діапазоні можна досягти при забезпеченні необхідної сегрегації палива й хімічних компонентів по висоті шару сипучого матеріалу, шляхом застосування відповідних завантажувальних пристроїв.

У третьому розділі вирішено завдання 4-7, досліджено сегрегаційні процеси у шарі полідисперсної шихти й встановлено їх вплив на тепловий режим агломерації залізородного матеріалу.

Запропоновано методику автоматичного розрахунку гранулометричного складу шихти, яка має достатню точність й може використовуватись у системі керування процесом завантаження агломашинами з метою забезпечення необхідної сегрегації шихти по висоті шару на аглострічці.

З метою прогнозування хімічного складу кожного з горизонтів й удосконалення процесу формування структури шару залізородної шихти із

заданим розподілом фізико-хімічних компонентів по його висоті, проведено дослідження хімічного складу фракцій матеріалу, що завантажується. Встановлено, що такі елементи як MgO, Fe_2O_3, Al_2O_3 досить рівномірно розподілені по фракціях, вміст SiO_2 монотонно зменшується зі зменшенням розміру часток, концентрація C, S, FeO навпаки зі зменшенням розміру часток збільшується. Закономірність розподілу CaO має екстремальний характер, з максимальним вмістом компонента у фракції з середнім діаметром 6,5 мм.

Отримані залежності вмісту палива та хімічних компонентів від гранулометричного складу шихти дозволили встановити кількість теплоти, що виділяється й споживається в елементарному об'ємі шихти P залежно від розташування елемента по висоті шару, рис. 9, 10, отримано для умов агломашин, завантаження яких відбувається вібраційним ВЖ й барабанним БЖ живильниками відповідно.

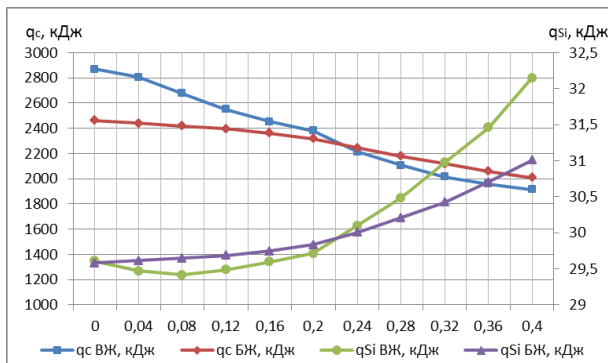


Рис. 9. Теплота, що вноситься горінням палива й утворенням силікатів в елементарному об'ємі з використанням різних живильників

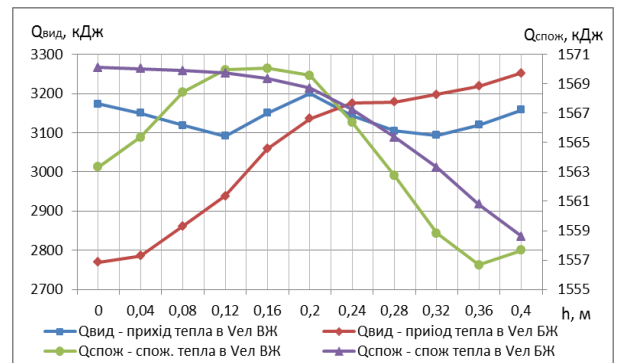


Рис. 10. Теплота, що виділяється та споживається в елементарному об'ємі по висоті шару з використанням різних живильників

Наведені результати свідчать про те, що близько 70-85% теплоти, що надходить до елементарного об'єму зони горіння, виділяється завдяки горінню вартісного твердого палива (коксової дрібноти). Агломераційний процес у вітчизняній металургії характеризується значними втратами дрібних фракцій коксика, який уноситься з продуктами згорання в процесі спікання. Таким чином, актуальним є завдання підвищення енергоефективності процесу підготовки твердого палива з метою скорочення обсягів утворення пилоподібних класів й загального зменшення обсягів споживання палива.

Механізм процесу подрібнення твердого палива представлений системою рівнянь:

$$\begin{cases} \Phi_1' - \Phi_1'' = (\Delta_2 + \Delta_3)t_0; \\ \Phi_2'' - \Phi_2' = (\Delta_1 - \Delta_3)t_0; \\ \Phi_3'' - \Phi_3' = (\Delta_1 - \Delta_2)t_0. \end{cases} \quad (3.1)$$

де: Φ_i^i - вміст i -ї фракції у первинному матеріалі, %; Φ_i^r - вміст i -ї фракції у подрібненому матеріалі, %; t_o - час подрібнення, с; Δ_i - інтенсивність подрібнення i -ї фракції, %/с.

При дослідженні механізму процесів подрібнення у дробарці прийнято, що подрібнення відбувається в результаті стискуючих ξ_1, ξ_2 (+3,0; 0,5...3,0 мм) й стираючих ξ_3 (0...0,5 мм) навантажень на масу матеріалу. Виходячи з того, що ξ_3 є основним джерелом утворення пилоподібних фракцій, частку цих впливів у процесі подрібнення необхідно звести до мінімуму. Останнє реалізовано шляхом зміни схеми підготовки палива та його подрібнення у валковому агрегаті.

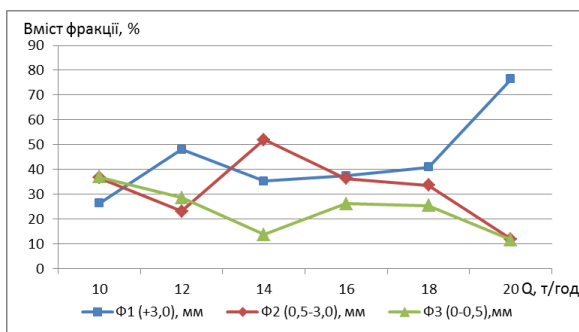


Рис. 11. Залежність фракційного складу коксика від продуктивності

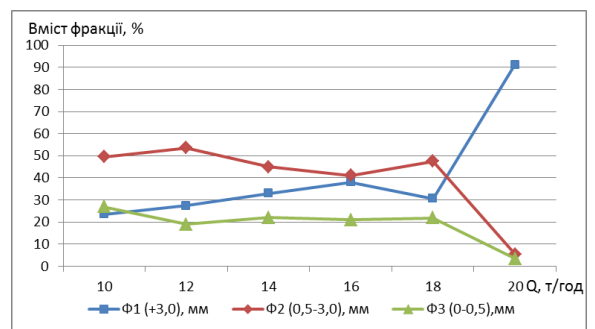


Рис. 13. Залежність фракційного складу штибу від продуктивності дробарки

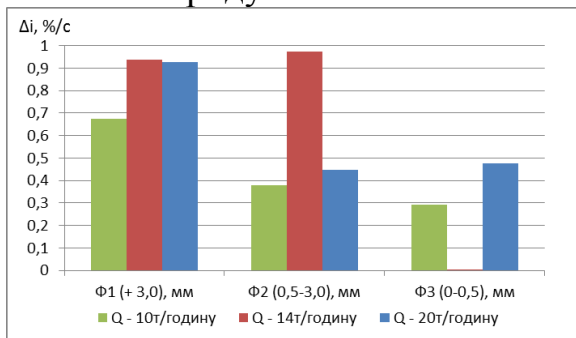


Рис. 12. Інтенсивність подрібнення фракцій коксика від продуктивності

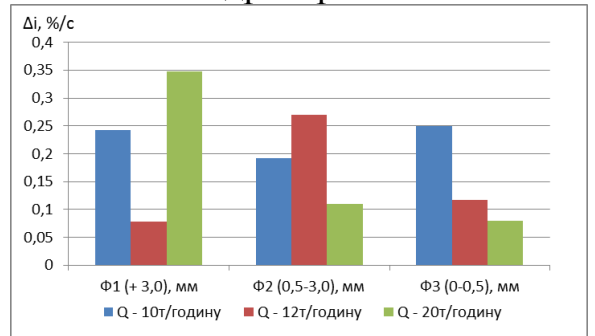


Рис. 14. Інтенсивність подрібнення фракцій штибу від продуктивності дробарки

З метою встановлення раціональних режимів роботи чотиривалкової дробарки проведено серію дослідів з подрібнення коксика й антрацитового штибу. В результаті встановлено значення раціональної продуктивності дробарки при подрібненні коксика, яке складає $G = 14$ т/год й забезпечує максимальний вихід кондиційної фракції, рис. 11. Інтенсивність виходу кондиційної фракції (0,5...3,0 мм) при цій продуктивності також максимальна. При подрібненні антрацитового штибу, раціональна продуктивність дробарки складала $G = 12$ т/год, рис. 13.

Аналіз результатів розрахунку інтенсивності виходу фракції Δ_i , рис. 12, 14, показує, що при збільшенні продуктивності агрегату ущільнюється структура матеріалу, що спричиняє пропорційне зниження інтенсивності його подрібнення під дією стискаючих навантажень. Це явище можна пояснити зниженням рухливості окремих часток та більш щільним примиканням їх одна до одної, що підсилює вплив стираючих навантажень і, як наслідок, збільшує вихід пилоподібних фракцій – 0,5 мм.

Теоретично, на базі досліджень Карабасова Ю.С., встановлено вплив крупності подрібненого палива на час його вигорання, що обумовлює температурний режим процесу спікання шихти. Середній час вигорання частки коксової дрібноти кондиційного розміру складає 48...52 с, а антрацитового штибу 72...76 с.

Для визначення раціонального розподілу твердого палива по висоті шару проведено моделювання спікання залізорудної шихти для умов агломашини №1 ВАТ «Запоріжсталь». З цією умовою, у другому розділі модель модифікована з урахуванням технічних характеристик й технологічних особливостей агрегату.

Проведення натурального експерименту з метою підтвердження адекватності моделі реалізовано на «Дослідній установці аглоцеху для спікання агломерату» ВАТ «Запоріжсталь», рис. 15, 16. Аналіз даних імітаційного моделювання й результатів натурального експерименту по встановленню температури зони горіння, показав, що похибка моделювання складає 12...14%, останнє свідчить про можливість використання розробленої моделі для проведення чисельних експериментів з метою оптимізації теплового режиму спікання.

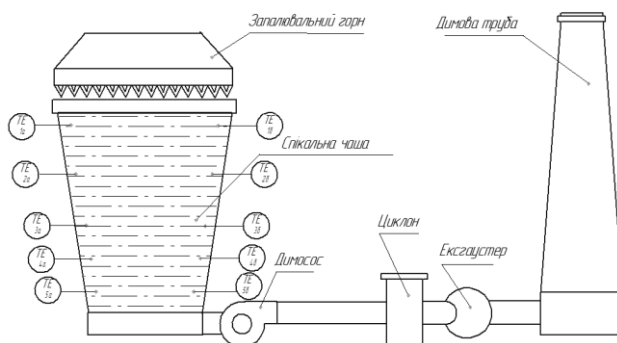


Рис. 15. Схема дослідної установки для спікання агломерату



Рис. 16. Зовнішній вигляд спікальної установки

Для визначення необхідного розподілу твердого палива по висоті й ширині палети, $C_{\%} = f(h) \rightarrow \min$, з метою забезпечення стабілізації максимальної температури зони горіння $T_{з.г.} \rightarrow \text{const}$, на розрахункову область моделі накладались відповідні граничні умови (2.3) й задавалась потужність внутрішніх джерел енергії (2.2). В результаті вирішення зворотної задачі зі стабілізації температури зони горіння, встановлено нерівномірний характер розподілу потужності джерел енергії, за елементарними об'ємами, як по ширині, так і по висоті «пирога», який має суттєве збільшення у прибортових зонах й поступове зменшення від верхніх до нижніх горизонтів шару. Останнє

свідчить про значні втрати теплоти через стінки палети з газами, що відходять, через нещільність й підвищену порозність матеріалу у прибортових зонах, а також про суттєвий рівень акумуляції теплової енергії.

Отримавши необхідний розподіл температур за горизонтами, рис.17, та знаючи потужність внутрішніх джерел енергії в кожному елементарному об'ємі шару, вирішено завдання по встановленню необхідного розподілу палива по висоті й ширині палети з урахуванням теплових ефектів й акумуляції теплоти у матеріалі, що спікається.

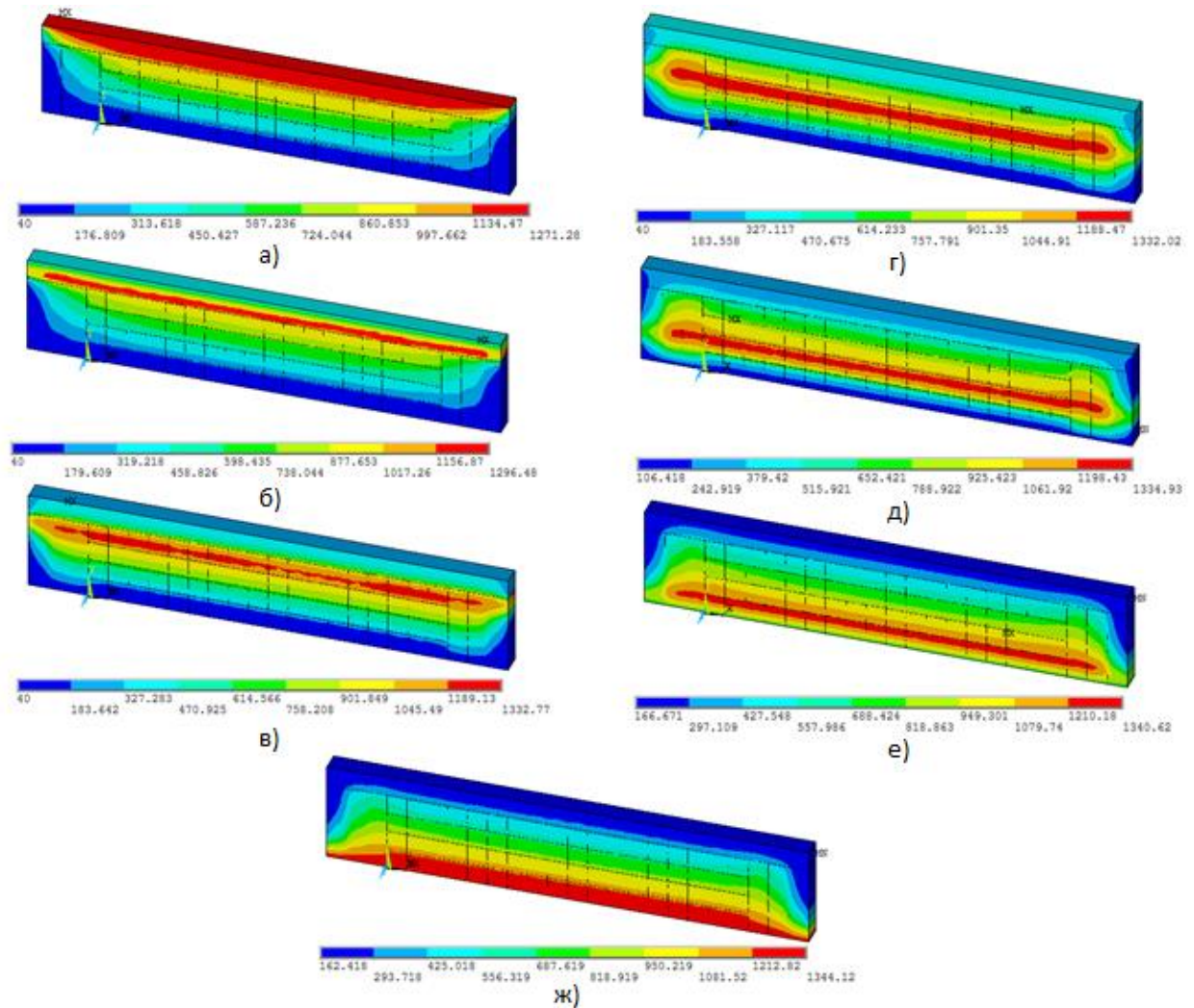


Рис.17. Результати моделювання спікання залізорудного матеріалу за горизонтами: а – горизонт 1, б – горизонт 2, в – горизонт 3, г – горизонт 4, д – горизонт 5, е – горизонт 6, ж – горизонт 7.

Для знаходження вмісту твердого палива у кожному з елементарних об'ємів запропоновано формулу:

$$c_{ш} = \frac{q_c}{a_{co}q_{co} + a_{co2}q_{co2}}, \quad (3.2)$$

де: $c_{ш}$ - вміст твердого палива у шихті, кг; a_{CO}, a_{CO_2} - частка вуглецю, що згорає до CO і CO_2 , частка; q_{CO}, q_{CO_2} - теплота згоряння вуглецю до CO і CO_2 відповідно, кДж/кг.

Процентний вміст вуглецю по висоті й ширині шару встановлено за формулою:

$$c_{\%} = \frac{c_{ш} \cdot 100\%}{V \rho_{ш} (1 - \varepsilon)}, \quad (3.3)$$

де: V - об'єм елементарного об'єму (скінченого елемента), m^3 ; $\rho_{ш}$ - щільність шихти, kg/m^3 ; ε - порозність шару, %.

За результатами розрахунків отримано необхідний розподіл твердого палива по висоті й ширині палети, що забезпечить стабілізацію температури зони горіння, рис. 18.

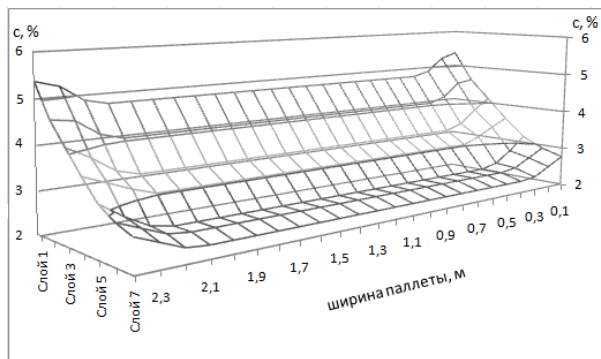


Рис. 18. Рациональний розподіл палива по висоті й ширині палети

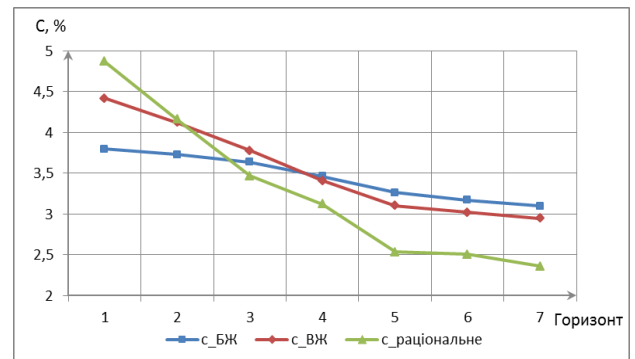


Рис. 19. Існуюче й раціональне розподілення палива за горизонтами

Сумарний вміст палива у шихті за результатами розрахунків склав 3,29% порівняно з 3,6...3,8% існуючим сьогодні на аглофабриці ВАТ «Запоріжсталь», рис. 19.

Отримавши необхідний розподіл палива, розраховано потрібний розподіл гранулометричного складу часток шихти по висоті палети шляхом зворотного перетворення функціональної залежності концентрації палива від гранулометричного складу шихти.

$$d_{cp} = -1,419 \cdot C^{1.563} + 17,41, \quad (3.4)$$

де: d_{cp} - середній діаметр часток фракцій, мм.

Враховуючи, що отримане значення середнього діаметра часток матеріалу на вказаному горизонті може відповідати різноманітним комбінаціям концентрацій окремих фракцій, які складають сипучу масу

шихти, що завантажується, розроблено методику, яка дозволяє в динаміці розраховувати фракційний склад горизонтів шару.

Виходячи з того, що у виробничих умовах контролюють середній діаметр часток сипучого матеріалу, а загальний вміст матеріалу й середній діаметр часток кожної фракції відомий, завдання ідентифікації фракційного складу полідисперсної шихти вирішено за результатами вимірів середнього діаметра часток, що складають її масу. Опис фракційного складу полідисперсного матеріалу представлено у вигляді системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 &= \Phi_\Sigma \\ d_1\Phi_1 + d_2\Phi_2 + d_3\Phi_3 + d_4\Phi_4 + d_5\Phi_5 &= d_{cp}\Phi_\Sigma \end{aligned} \right\}, \quad (3.5)$$

де: Φ_i - вміст i -ї фракції у матеріалі, %; Φ_Σ - загальний вміст матеріалу, %; d_i - середній діаметр часток i -ї фракції, мм; d_{cp} - середній діаметр часток матеріалу, мм.

При числі фракцій n вміст шуканої фракції $i \in [1, n-1]$ можна отримати з рівняння:

$$\Phi_i = \frac{\Phi_\Sigma(d_{cp} - d_{(i+1)n}) - \sum_{m=1}^{i-1} \Phi_m(d_1 - d_{35})}{d_i - d_{(i+1)n}}. \quad (3.6)$$

Встановлення середніх діаметрів груп фракцій обумовлює необхідність наявності інформації щодо закономірностей розподілу сипучого матеріалу за розмірами часток, що складають його масу. Для встановлення середніх діаметрів груп фракцій використано критерій D_{ij} , який характеризує розподіл середнього діаметру групи фракції по висоті шару підготовленого до спікання. Діапазон зміни критерію складає $D_{ij} \in [0; 1]$.

$$D_{ij} = \frac{d_{ij} - d_i}{d_j - d_i}, \quad (3.7)$$

де: d_{ij} - середній діаметр групи фракцій, мм; d_i - середній діаметр фракції Φ_{i-1} , мм; d_j - середній діаметр найбільш крупної фракції сипучого матеріалу, мм.

Значення коефіцієнтів, отримані для низки агломераційних машин, й результати одержаних розрахунків фракційного складу матеріалу дозволили зробити висновок про універсальність розробленої методики, що дозволяє використовувати останню в умовах аглофабрик різних підприємств.

Представлені на рис. 20 залежності, характеризують необхідну сегрегацію фракцій сипучого матеріалу, в результаті чого у верхній частині шару буде зосереджено необхідну кількість дрібних фракцій, які є основними носіями твердого палива, тим самим усуваючи нестачу теплоти у цих горизонтах. У

свою чергу зниження концентрації палива у нижній шарах, за рахунок концентрації там крупних фракцій усуне переоплавлення агломерату.

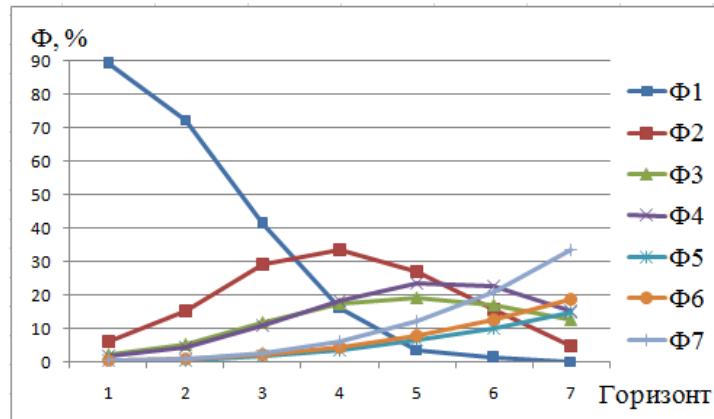


Рис. 20. Необхідний розподіл фракційного складу шихти для умов АМ №1 ВАТ «Запоріжсталь»

Отримані результати створюють передумови до вибору типу й розрахунку характеристик завантажувального пристрою агломашини з метою забезпечення максимально близького до раціонального розподілу фракцій, підготовленої до спікання залізородної шихти.

У четвертому розділі вирішено завдання 5,7-8, наведені результати спрямовані на стабілізацію теплових режимів теплової обробки шарів бокситової шихти й залізородних котунів.

З метою моделювання теплових процесів, що протікають у шарі полідисперсної бокситової шихти для умов ПАТ «Запорізький абразивний комбінат» проведено дослідження щодо аналізу сегрегації класів крупності шихтового матеріалу по висоті шару. Отримано залежності зміни вмісту твердого палива й хімічного складу гранул шихти від їх середнього діаметра. Встановлено, що причиною існуючого для даного процесу перепаду температури зони горіння з 1230°C, для верхніх горизонтів, до 1500°C для основи шару є низьке розподілення класів крупності матеріалу й як наслідок, рівномірне розподілення твердого палива по висоті.

Досліджені процеси, що складають дохідну й витратну частини теплової енергії, що виділяється, в елементарному об'ємі шару бокситів, що спікаються. Встановлено необхідність нерівномірного розподілу твердого палива по висоті й ширині палети, що характерно й для процесу агломерації залізородних матеріалів. Шляхом моделювання процесу, на базі модифікованої для умов виробництва бокситового агломерату моделі, встановлено раціональний розподіл гранулометричного складу шихти по висоті й ширині палети. Останнє обумовлює можливість стабілізації температури зони горіння у діапазоні 1290-1380°C, що покликано виключити переоплавлення нижніх горизонтів й недостатню якість спікання верхніх шарів шихти, тим самим підвищити вихід придатного.

Система завантаження шихти, що використовується на ПАТ «Запоріжабразив» у вигляді барабанного живильника, не забезпечує

раціонального розподілу твердого палива по висоті шару, тим самим створюючи передумови до вибору типу й розрахунку характеристик завантажувального пристрою агломашини, з метою забезпечення максимального близького до раціонального розподілу палива у підготовленій до спікання бокситовій шихті.

Ключовою проблемою на сучасному рівні розвитку процесів збагачення залізорудних концентратів є забезпечення необхідної температурно-часової обробки котунів з метою усунення їх розтріскування й своєчасного закінчення процесів термозміцнення під час випалу. Відомо, що час необхідної теплової обробки котунів залежить від їх розміру, а тривалість контакту часток з теплоносієм залежить від глибини їх розташування у шарі. Таким чином, досліджено теплові процеси, що протікають у шарі випальних залізорудних котунів, методом елементарних теплових балансів отримано залежності, що характеризують обсяги тепловиділення й споживання теплоти у кожному елементарному об'ємі (100x100x100 мм), залежно від зони конвеєрної машини, рис 21.

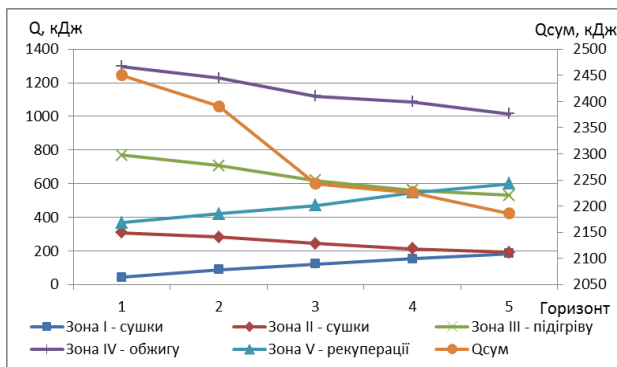


Рис. 21. Обсяг теплоти, що надходить у шар по зонах випальної машини й сумарна енергія, що виділяється у елементарному об'ємі P .

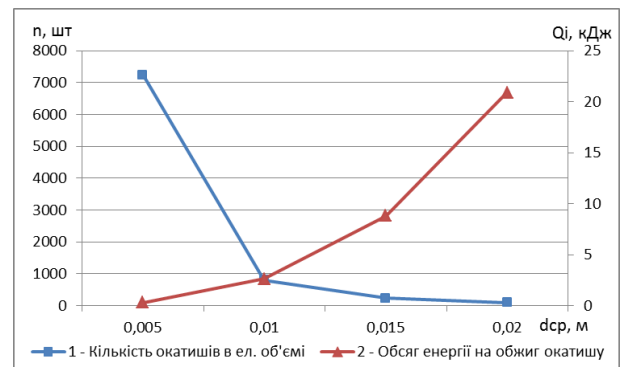


Рис. 22. Зміна кількості котунів й необхідної кількості енергії для їх випалу залежно від d_{cp} .

На базі модифікованої кінцево-елементної моделі проведено моделювання теплової обробки котунів по зонах випальної машини. В результаті отримано картину розподілу температурних полів у кожній зоні випальної машини за горизонтами шару котунів. Останнє дозволило вирішити завдання по встановленню часу й обсягу теплової енергії, яка необхідна для випалу котуна заданого розміру й всього елементарного об'єму шару, заповненого котунами заданого розміру.

Обсяг енергії, необхідний для випалу котунів певного розміру, рис. 22, розраховано за формулою:

$$Q_i = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_o \varepsilon_0 (Q_{сум} / m), \quad (4.1)$$

де: r - радіус котуна, м; ρ_o - щільність котуна, кг/м³; $Q_{\text{сум}}$ - сумарний, по зонах, обсяг теплоти, що виділяється в елементарному об'ємі шару котунів, кДж; ε_o - пористість котуна (0,21...0,36); m - маса елементарного об'єму, кг.

Потрібний час обробки котуна встановлено таким чином:

$$t_i = \frac{Q_i t_o}{Q_{\text{сум}}}, \quad (4.2)$$

де: t_o - час випалу, с.

Виходячи з того, що швидкість розповсюдження ізотермічної поверхні у частках залежить від відношення поверхні частки до її об'єму, сумарну енергію, необхідну для нагрівання до температури 1250...1300°C й завершення процесів термозміцнення у елементарному об'єму, який складається з котунів заданого розміру, обчислено за формулою:

$$Q_{\text{сум}_v} = Q_i n \frac{F}{V}, \quad (4.3)$$

де: Q_i - обсяг енергії, необхідний для випалу котунів заданого розміру, кДж; n - кількість котунів у елементарному об'ємі, шт; F/V - відношення поверхні до об'єму шару.

Встановлено, що час термічної обробки котуна з $d_{cp}=0,01$ м у 8 разів менший за необхідний при $d_{cp}=0,02$ м. Останнє обумовлено тим, що зі зменшенням розміру котуна збільшується його об'ємна поверхня F/V , що сприяє інтенсифікації теплообміну.

Зроблено висновок, що з метою забезпечення рівномірного випалу котунів різного розміру, необхідно забезпечити розподіл класів крупності котунів й їх диференційоване завантаження по висоті шару. Це дозволить усунути недостатній випал крупних гранул, які потрапляють у нижні горизонти шару, за рахунок нерівномірності їх температурно-часової обробки. Останнього можна домогтися за рахунок використання принципово нових конструкцій завантажувальних пристроїв сирих котунів на поверхню палет конвеєрної машини.

У п'ятому розділі вирішено завдання 9-12, розглянуто підходи щодо вдосконалення механізмів підготовки шару сипучого матеріалу до теплової обробки. Запропоновано методика дослідження динаміки процесу формування шару полідисперсного сипучого матеріалу підготовленого до спікання. Розглянуті випадки завантаження шихти системами вібраційний живильник – прямолінійний лоток та барабанний живильник – прямолінійний лоток. Встановлено, що рух часток матеріалу має відбуватись в режимі чистого кочення. Останнє обумовлено тим, що тільки в цьому режимі відбувається розподіл частин різного розміру за швидкістю їх сходження із завантажувального лотка, тим самим забезпечуючи сегрегацію матеріалу по

класам крупності. Отримано обмеження, що визначають режим руху часток шихти по завантажувальному лотку.

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.

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

Теоретично досліджено динаміку процесу формування шару полідисперсного сипучого матеріалу при використанні різноманітних вузлів завантаження, у комплекті з вібраційним живильником. Виявлено діапазон зміни параметрів лотків, для їх ефективної роботи. Зроблено висновок, що застосування зіскладного завантажувального лотка, є найбільш ефективним для забезпечення необхідного розподілу фракцій матеріалу й, як наслідок, необхідного розподілу твердого палива по горизонтах шихти, підготовленої до спікання, що обумовлює можливість стабілізації теплового режиму процесу.

Запропонована модифікація завантажувального лотка з додатковою стрілоподібною секцією покликаною знизити вплив прибортових прососів повітря на тепловий режим спікання. Визначено конструктивні характеристики завантажувального вузла.

Обрано тип й конструктивні характеристики завантажувальних вузлів бокситової шихти та сирих залізрудних котунів з метою забезпечення потрібного розподілу гранулометричного складу матеріалу, що дозволить стабілізувати тепловий режим його обробки.

Експериментально встановлено зміну коефіцієнта газодинамічного опору від фракційного складу полідисперсної шихти. Визначено втрати тиску в шарі висотою 500 мм залежно від швидкості фільтрації повітря і сегрегації шихтових матеріалів по висоті, рис.23, 24.

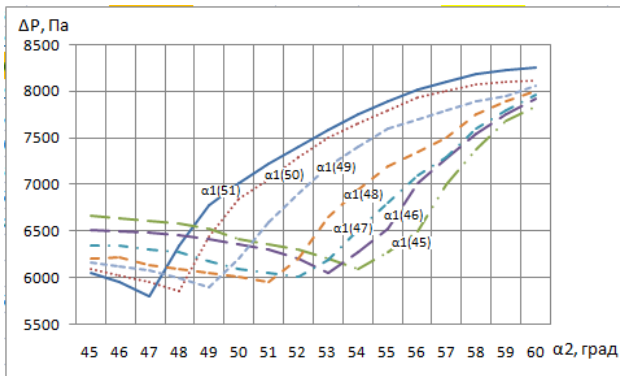


Рис.23. Втрати тиску у шарі при зміні α_1 (45÷51°)

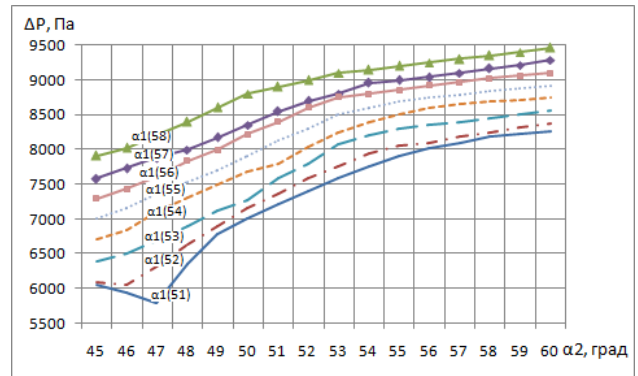


Рис.24. Втрати тиску у шарі при зміні α_1 (51÷58°)

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

Зроблено висновок, що найменшими втратами тиску володіє шар, сформований при α_1 (51°) та α_2 (47°). Подальше збільшення кутів нахилу завантажувального лотка зменшує коефіцієнт сегрегації, що викликано збільшенням швидкості руху середніх та крупних часток, які уносять із собою дрібні фракції у нижні горизонти, в результаті ущільнюючи структуру шару.

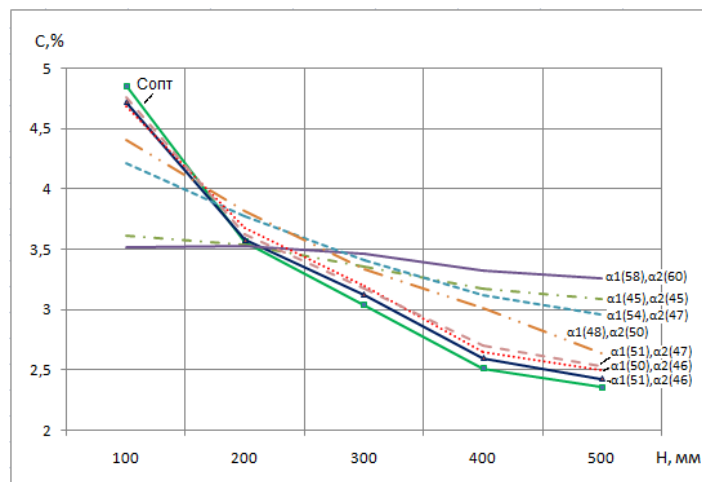


Рис.25. Результати розрахунків розподілу палива у шарі

Розроблено алгоритм управління завантажувальним пристроєм агломашини з метою формування оптимальної структури шару шихти, підготовленої до спікання. Результати розрахунків дозволили встановити оптимальні значення кутів нахилу секції зі складного завантажувального лотка α_1 (51°) та α_2 (47°), що забезпечує найкращу відповідність оптимальному розподілу твердого палива та зниження втрат тиску по висоті шару агломераційної шихти, рис. 23-25.

Аналіз результатів активного експерименту по спіканню агломерату дозволив зробити висновок, що при використанні завантажувального лотка запропонованої конструкції (патент України №110975), покращуються сегрегаційні процеси у шарі, кількість фракції – 3 мм у верхніх горизонтах шару (0-100 мм) збільшилась з 54,3% до 59,6% порівняно з діючою на підприємстві схемою завантаження. Середній вміст палива на цих горизонтах збільшився з 3,8%, при використанні схеми барабанний живильник – завантажувальний лоток, і 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% (9,81...15,14% відн.).

Результати експерименту свідчать, що стабілізація теплового режиму процесу спікання дозволила підвищити механічну міцність і вихід придатного на 4,22%. Отримане зменшення споживання палива, при збереженні якісних

показників процесу спікання, потенційно дозволить економити до 45 млн. грн. на рік з 6 агломашин, для умов аглофабрики підприємства (станом цін на енергоносії на 09.2016 р.).

З урахуванням загального скорочення споживання твердого палива, на базі формул Андоньєва С.М. розраховано зменшення шкідливих викидів у атмосферу по CO на 6,55% (відн.), CO_2 на 6,54% (відн.) та SO_2 на 7,18% (відн.).

Запропоновані технології завантаження на базі конструкцій завантажувальних вузлів (патенти України на корисні моделі № 104024 й №110975) впроваджені на підприємствах ВАТ «Запоріжсталь», ПАТ «Запорожжабразив», Асоціації «ЕНЕРГОИНТЕХ».

ВИСНОВКИ

На базі розвитку наукових основ теплотехнічних процесів згрудкування сипучих матеріалів виконано теоретичне узагальнення і отримано комплексне рішення важливої науково-прикладної проблеми – зниження витрат твердого палива і підвищення виходу придатного при агломерації залізородних, бокситових матеріалів та випалу залізородних котунів, за рахунок формування шару, підготовленого до теплової обробки, з заданим хіміко-гранулометричними характеристиками. Розроблено методологію розрахунку конструктивних характеристик завантажувальних вузлів та оптимального розподілу фізико-хімічних компонентів матеріалу, що забезпечує стабілізацію теплового режиму термообробки.

1. На основі виконаного аналізу науково-технічної інформації проведено узагальнення напрямків удосконалення процесів згрудкування матеріалу на машинах конвеєрного типу в питаннях підвищення якості продукту, зниження споживання твердого палива й кількості шкідливих викидів, які утворюються при горінні. Узагальнення теоретичних, експериментальних та виробничих дослідів дозволило зрозуміти, що найбільший вплив на якісні показники агломерату та котунів має структура, підготовленого до термообробки шару, матеріалу. Останнє обумовлює закономірності розподілу палива й хімічних компонентів і, як наслідок, інтенсивність протікання екзо- й ендотермічних реакцій у шарі та тепловий режим процесів згрудкування.

2. Реалізовано узагальнений математичний опис теплових процесів у стаціонарних шарах моно- та полідисперсних матеріалів з урахуванням внутрішніх джерел енергії. Встановлено вплив структури шару на його теплофізичні характеристики. Запропоновано використання середньозваженого коефіцієнта теплопровідності сипучого матеріалу й встановлено інтервал варіювання ступеня впливу r_i фізичних величин (температура, вологість, крупність) на його кількісне значення.

3. Встановлено закономірності зміни коефіцієнта тепловіддачі по висоті шару від ступеня розділення класів крупності сипучого матеріалу, що обумовлено типом завантажувальної системи, яка використовується. При завантаженні залізородного матеріалу вібраційним живильником, відбувається ослаблення зв'язків між частками сипучого матеріалу, що підсилює

сегрегаційні процеси у шарі, коефіцієнт α_v у даному випадку змінюється по функції близькій до експоненціальної у межах 2800...9500 Вт/(м³·К). При використанні барабанного живильника, сегрегаційні процеси не значні, в результаті спостерігається монотонне зменшення величини коефіцієнта, для випадку залізорудного матеріалу, діапазон зміни α_v склав 3300...4800 Вт/(м³·К), а бокситів 5900...7200 Вт/(м³·К). Останнє зв'язано з більшим розміром часток бокситового матеріалу.

4. Отримали подальший розвиток дослідження процесів теплової обробки сипучих матеріалів на конвеєрних машинах. Аналіз теплових режимів процесів спікання на базі розробленої чисельної кінцево-елементної моделі дозволив зробити висновок, що при агломерації залізорудної шихти, існує раціональна температура зони горіння, яка складає 1280 ...1340° С, й 1290...1380° С при агломерації бокситової шихти, при якій виникає дрібнопористий, легковідновлюваний агломерат з достатньою міцністю. Стабілізації зони горіння у вказаних межах можна досягти за рахунок забезпечення необхідної сегрегації твердого палива і хімічних компонентів по висоті шару

5. Вивчено механізм подрібнення твердого палива у валковому агрегаті, що дозволило зробити висновок про необхідність зміни схеми подрібнення з метою зниження впливу стираючих навантажень на подрібнювальний матеріал і підвищення виходу кондиційної фракції 0,5...3,0 мм. Встановлено, що природні властивості палива суттєво впливають на вихід кондиційної фракції при стабільному режимі подрібнення. Максимальний вихід кондиційної фракції при подрібненні коксової дрібноти забезпечується за продуктивності 14 т/год, а антрацитового штибу - 12 т/год. Запропоновано методику розрахунку раціональних режимів роботи чотиривалкової дробарки.

6. Встановлено закономірності вмісту хімічних компонентів від крупності гранул залізорудного і бокситового матеріалів шляхом проведення спектрального аналізу. Запропонована у роботі методика ідентифікації гранулометричного складу шихти дозволяє в режимі реального часу оцінювати розподіл твердого палива і хімічних компонентів по горизонтах шару.

Узагальнено результати дослідження теплових процесів, які протікають у шарах полідисперсних сипучих матеріалів. Отримано приходну частину теплового балансу високотемпературної зони спікання залежно від розташування горизонту, з урахуванням статей: теплота горіння палива 84,5...65,1%, теплота екзотермічних реакцій 3,1...3,5%, теплота продуктів згоряння та теплота шихти 12,6...31,4%. Це дозволило шляхом вирішення зворотної задачі здійснити розрахунок раціонального розподілу твердого палива по висоті й ширині шару для процесів агломерації залізорудних та бокситових матеріалів, що забезпечує стабілізацію температурного режиму спікання та скорочення загального споживання твердого палива.

7. Розвинено основи теплових процесів, які протікають у шарі залізорудних котунів під час їх випалу, отримано закономірності об'ємів тепловиділення й споживання теплоти у кожному розрахованому елементарному об'ємі, за зонами конвеєрної машини. Розраховано час та

кількість теплоти необхідної для нагріву котунів до температури випалу 1250...1300° С у залежності від діаметру. На базі цих залежностей встановлено тривалість теплової обробки й раціональний розподіл крупності котунів по горизонтах шару, що забезпечить стабілізацію температурно-часового режиму випалу.

8. Експериментально досліджено газодинамічні процеси, які протікають у високому (500мм) полідисперсному шарі шихти, підготовленої до теплової обробки. Встановлено, що підвищення швидкості фільтрації повітря з 0,3 до 1,2 м/с, підвищує опір шару у 5 разів, а посилення сегрегаційних процесів у шарі дозволяє стабілізувати тепловий режим спікання та зменшити газодинамічний опір шару.

9. Отримали узагальнення дослідження динаміки процесу формування шару сипучого матеріалу при використанні різних типів завантажувальних пристроїв. Експериментально встановлено закономірності та діапазон зміни коефіцієнтів тертя кочення f' по поверхні лотка (0,3...1,2) по відкосу шихти (0,6...1,5) і тертя ковзання f'' (1,7...2,9) від гранулометричного складу матеріалу. Отримала подальшого розвитку методологія розрахунку характеристик завантажувальних пристроїв та запропоновані їх модифіковані конструкції, які покликані забезпечити максимально близьке до необхідного розподілення фракційного складу матеріалу. Так для умов різних підприємств запропоновано такі конструкції завантажувальних вузлів:

- для аглофабрики ВАТ «Запоріжсталь» за умови спікання шихти у шарі 500 мм запропоновано використання зіскладного двоступеневого лотка зі стрілоподібною секцією (патент України №110975);

- для цеху агломерації ПАТ «Запорізький абразивний комбінат», де висота шару, який спікається, складає 250..300 мм, рекомендовано застосування одноступеневого лотка зі стрілоподібною секцією;

- для випалу залізородних котунів в умовах Центрального гірничо-збагачувального комбінату (ЦГЗК) м. Кривий Ріг – валкового гуркоту із можливістю зміни проміжку між валками (патент України № 104024).

10. Розроблено алгоритм та програмне забезпечення для оптимізації структури шару агломераційної шихти. Результати розрахунків дозволили встановити значення кутів нахилу секцій зіскладного завантажувального лотка $\alpha_1 = 51^\circ$ та $\alpha_2 = 47^\circ$ відповідно, які забезпечують найкращу відповідність необхідному розподілу твердого палива та зниженню втрат тиску по висоті шару агломераційної шихти.

11. Результати експериментів в умовах аглофабрики ВАТ «Запоріжсталь» дозволили зробити висновок, що при використанні зіскладного завантажувального лотка покращуються сегрегаційні процеси у шарі, кількість фракцій – 3 мм у верхніх горизонтах шару (0...100 мм) збільшилась з 54,3 % до 59,6 % порівняно з діючою на підприємстві схемою завантаження. Середній вміст палива на цих горизонтах збільшився з 3,8 %, при використанні схеми барабанний живильник – завантажувальний лоток, та 4,4 % за схемою вібраційний живильник – завантажувальний лоток, до 4,76% за умов

скорочення загального вмісту твердого палива у шихті з 3,6...3,8 % до 3,3 % (9,81-15,14% відн.).

Результати випробувань свідчать, що стабілізація теплового режиму процесу спікання дозволила підвищити механічну міцність та вихід придатного на 4,22%. Отримане скорочення споживання палива при збереженні якісних показників процесу спікання, потенційно дозволить економити до 45 млн. грн. на рік з шести агломашин, для умов аглофабрики підприємства (станом цін на енергоносії на 09. 2016 р.)

12. 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.).

Результати роботи, проектні та технічні рішення, отримані в результаті виконання дисертації, впроваджено:

- у вигляді методики оптимізації теплового режиму процесу виробництва залізорудного офлюсованого агломерату аглофабрики ВАТ «Запоріжсталь»;

- у проекті розробки раціональних режимів роботи агломераційної машини з метою підвищення ефективності процесу агломерації бокситів і виявлення резервів економії твердого палива цехом агломерації ПАТ «Запорізький абразивний комбінат»;

- у вигляді методики та інструменту для дослідження теплових режимів термічної обробки залізорудних котунів на машинах конвеєрного типу в Асоціації «ЕНЕРГОИНТЕХ» м. Дніпро;

- у навчальному процесі при вивченні дисципліни «Основи розрахунків тепло- масообмінних процесів»; «Виробничі процеси і обладнання об'єктів автоматизації»; «Високотемпературні теплотехнічні процеси та установки».

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мних, А. С. Про підвищення ефективності роботи барабана окомковувача з метою стабілізації якості грудкування шихти. [Текст] / А. С. Мних, Ю.М. Пазюк, М.Б. Федіна // Восточно-европейский журнал передових технологий. – 2010. - №2/1(44). С. 70-73. [2-6*]

2. Пожуев, В. И. Идентификация гранулометрического состава агломерационной шихты, подготовленной к спеканию [Текст] / В.И. Пожуев, М.Ю. Пазюк, Ю.М. Пазюк, Е.Н. Барышенко, А.С. Мных // Металлургия (наукові праці Запорізької державної інженерної академії). – 2010. – вип. 22. – С. 14-20.

3. Мных, А. С. Исследование влияния фракционного состава агломерационной шихты на распределение химических компонентов слоя материала для условий комбината «Запорожсталь». [Текст] / А. С. Мных, В.Д. Ашихмин // Теория и практика металлургии. – 2014. - №3(6).- С 11-15.

4. Мних, А. С. Дослідження факторів, що впливають на формування шару полідисперсних залізорудних матеріалів [Текст]/ А.С. Мных // Металургія

- (наукові праці Запорізької державної інженерної академії). – 2014. – вип.1(31). – С. 19-23.
5. Мных, А.С Моделирование распределения частиц полидисперсной шихты по высоте слоя на аглоленте. [Текст] / А.С. Мных, Ю.М. Пазюк, В.Д. Ашихмин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014. №3. – С. 12-15.
6. Мных, А. С. К вопросу исследования механизма формирования слоя полидисперсной агломерационной шихты [Текст]/ А.С. Мных, М.Ю. Пазюк// *Металургія (наукові праці Запорізької державної інженерної академії)*. – 2014. – вип.2(32). – С. 5-9.
7. Мных, А.С. Решение методом конечных элементов задачи о распределении температур в единичном объеме агломерационного слоя при заданных граничных условиях. // *Збірник наукових праць ДДТУ(технічні науки)*. – 2014. №2(25). – С.153-159.
8. Мных, А. С. Синтез трехмерной модели теплового режима процесса спекания агломерационной шихты [Текст] / А. С. Мных // *Вісник КрНУ (збірник наукових праць)*. – 2014. - №38 – С. 174-177.
9. Мных, А.С. Исследование количества тепловыделения в слое агломерационной шихты. [Текст] / А.С. Мных// *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2014. -№6. – С. 14-18. [2-16*]
10. Мных, А. С. Определение оптимального распределения твердого топлива в слое загружаемой шихты для выравнивания теплового режима агломерационного процесса [Текст]/ А.С. Мных// *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика (збірник наукових праць)*. – 2014. вып. 6. – С. 69-79.
11. Мных, А. С. Анализ адекватности конечно-элементной модели процесса агломерации железорудной шихты [Текст]/ А.С. Мных// *Технологический аудит и резервы производства*. – 2015. №1/1 (21). – С. 22-25. [2-19*]
12. Mnyh, A. S. Determination of the required segregation of fractions of sinter charge for stabilizing the thermal conditions of sintering/ A. Mnyh, O. Yeromin, I. Mnyh// *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*. – 2015. #1/8(73) P. 68-73. [1-15*]
13. 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. [2-19*]
14. Мных, А. С. Исследование систем загрузки полидисперсной аглошихты с целью обеспечения требуемого теплового режима процесса спекания [Текст]/ А.С. Мных // *Вісник ПДТУ Серія: Технічні науки*. – 2015. Вып.30. Т.1. – С. 177-186. [6, 19*]
15. Мных, А. С. К вопросу стабилизации теплового режима спекания аглошихты при использовании составного загрузочного лотка [Текст]/ А.С. Мных, И.А. Овчинникова // *Сборник трудов ДГТУ (технические науки)*. – 2015. Вып. 1(26). – С. 156-161.

16. Мных, А. С. Исследование влияния теплового режима процесса спекания на качественные показатели агломерата [Текст] / А.С. Мных // Энергетика. Энергосбережение. Энергоаудит. – 2015. - №4(135). – С. 46-52. [2,3,5,6,19,20 *]
17. Мных, А.С. Исследование тепловых процессов в агломерируемом слое бокситов в зависимости от сегрегации топлива и химкомпонентов по высоте [Текст] / А. С. Мных // Энергетика. Энергосбережение. Энергоаудит. – 2015. - №6(136). – С. 23-27. [2,3,5,6,19,20 *]
18. Мних, А. С. Формування шару бокситового агломерату з метою стабілізації температурного режиму процесу спікання в умовах ПАТ «ЗАК» [Текст] / А. С. Мных, А. В. Альошина // Матеріали Х науково-технічної конференції ЗДІА. – 2015. С. 76.
19. Мных, А.С. Вибір раціонального розподілу твердого палива у шарі бокситової шихти на основі моделі теплового режиму спікання [Текст] / А. С. Мных, И.Г. Яковлева // КПИ. Энергетика.- 2015. №3(41) - С. 59-66.
20. Мних, А. С. До питання вибору системи завантаження полідисперсної бокситової шихти з метою підвищення енергоефективності теплового режиму процесу спікання [Текст] / А.С. Мных // Вісник ВПІ. – 2015. №4(121) – С. 70-75. [7 *]
21. Мных, А. С. К вопросу синтеза тепловой модели термообработки железорудных окатышей [Текст] / А. С. Мных // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – №7. – С 14-20. [2,3,5,6,19,20 *]
22. Мных, А. С. Исследование сегрегации гранул по высоте слоя обеспечивающей исключение неравномерной тепловой обработки окатышей [Текст] / А. С. Мных // Збірник наукових праць ДДТУ. – 2015. – №2(27). – С. 148-153.
23. Мных, А. С. Исследование газодинамического сопротивления слоя полидисперсной агломерационной шихты подготовленной к спеканию [Текст] / А.С. Мных, И.Г. Яковлева, М.Ю. Пазюк, И.А. Овчинникова // Промышленная теплоэнергетика. – 2015. - №5. Том 37. – С. 16-23.
24. Мных, А. С. Оптимизация структуры агломерационной шихты с целью стабилизации теплового режима процесса спекания [Текст] / А.С. Мных, И.Г. Яковлева, М.Ю. Пазюк, А.А. Жеребцов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2016. №2. – С. 43-49.
25. Мных, А. С. Определение количества выделяемой тепловой энергии в слое спекаемой шихты в рамках решения задачи повышения энергоэффективности аглопроцесса [Текст] / А.С. Мных // Экология и промышленность. – 2015. - №3. – С. 60-64.
26. Мных, А. С. К вопросу оптимизации подготовки твердого топлива к тепловой обработке агломерационной шихты [Текст] / А.С. Мных, И.Г. Яковлева, М.Ю. Пазюк // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. - №10(141). – С. 56-63. [2,3,5,6,19,20*]
27. Мных, А. С. Сокращение вредных выбросов в атмосферный воздух путем усиления сегрегационных процессов в слое агломерационной шихты [Текст] /

- А.С. Мных, И.Г. Яковлева, М.Ю. Пазюк // Экология и промышленность. – 2015. - №4. – С. 34-37.
28. Мных, А. С. Анализ химического состава фракций полидисперсной агломерационной шихты для условий комбината «Запорожсталь» [Текст] / А. С. Мных // Всеукраинская научно-практическая конференция «Металлургия 21 столетия глазами молодых», 15 апреля 2014г., ДНТУ. Донецк: сб. тр. конф. – Донецк, 2014. – С. 17-18.
29. Мних, А. С. Сучасний стан та шляхи підвищення енерго- ефективності агломераційного виробництва [Текст] / А. С. Мных, А. В. Альошина // Матеріали ІХ науково-технічної конференції ЗДІА. – 2014. С. 108.
30. Мных, А. С. Исследование изменения качественных показателей агломерата от теплового режима процесса спекания [Текст]// Материалы Всеукраинской научно-практической конференции «Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва», Кривой-Рог. – 2015. С. 99.
31. Мных, А. С. К вопросу выравнивания теплового режима спекания агломерационного процесса [Текст] / А. С. Мных // Всеукраинская научно-практическая конференция «Проблемы энергоресурсосбережения в промышленном регионе. Наука и практика», ПГТУ. Мариуполь: сб. тр. конф. – Мариуполь, 2015. – С. 32.
32. Мных, А. С. Моделирование теплового режима процесса спекания бокситовой шихты [Текст] / А. С. Мных // Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современных технологий», ТНТУ. Тернополь: сб. тр. конф. – Тернополь, 2015. – С. 187.
33. Мных, А. С. К вопросу определения количества выделяемой тепловой энергии в слое полидисперсной агломерационной шихты в зависимости от сегрегации топлива и химкомпонентов по высоте слоя [Текст] / А. С. Мных // IV Международная научно-практическая конференция «Проектирование предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения, защиты окружающей природной среды», Харьков: сб. тр. конф. – Харьков, 2015. – С. 171 -175.
34. Мных, А. С. Структурные характеристики стационарного слоя сыпучего материала [Текст] / А. С. Мных // Материалы XI международной научно-практической конференции «Новости научной мысли». Чехия. Прага. – 2015. том 11. – С. 64-67.
35. Мных, А. С. Описание тепловых процессов в слое монодисперсного сыпучего материала [Текст] / А. С. Мных // Материалы X международной научно-практической конференции «Перспективные вопросы мировой науки». г. София, Болгария. – 2015. том 19. – С. 42-44.
36. Пат. 104024 Україна, МПК 2015.01 F27D 30/00. Завантажувальний пристрій випальної конвеєрної машини / Мних А.С., Яковлева І.Г. (Україна); заявник та патентовласник Запорізька державна інженерна

академія. – № u201506410 ; заявл. 30.06.2016 ; опубл. 12.01.2016, Бюл. № 1. – 3 с.

37. Мных А. С. Влияние условий формирования сыпучего слоя железорудных и бокситовых материалов на коэффициент теплоотдачи [Текст]/ А.С. Мных, И.Г. Яковлева, М.Ю. Пазюк // Холодильна техніка та технологія. – 2016. – Том 52, №4. – С. 16-20. [2,3,5,6,19,21*]

* *Перечень международных наукометрических баз, репозитариев и поисковых систем:* 1. SCOPUS; 2. Ulrich's Periodicals Directory; 3. DRIVER; 4. Bielefeld Academic Search Engine (BASE); 5. Index Copernicus; 6. WorldCat; 7. РИНЦ; 8. Directory of Open Access Journals (DOAJ); 9. EBSCO; 10. ResearchBib; 11. American Chemical Society; 12. Directory Indexing of International Research Journals; 13. Directory of Research Journals Indexing (DRJI); 14. CrossRef; 15. Open Academic Journals Index (OAJI); 16. Sherpa/Romeo; 17. Open Access Articles; 18. WorldWideScience.org; 19. JURN; 20. Google Scholar; 21. ВИНТИ РАН.

АНОТАЦІЯ

Мних А.С. Підвищення енергоефективності теплових процесів згрудкування сипучих матеріалів при інтенсифікації сегрегації у стаціонарних шарах – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2016.

Дисертація присвячена комплексному вирішенню проблеми підвищення енергоефективності згрудкування 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, бокситових матеріалів та випалу залізорудних котунів.

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. Встановлено раціональну температуру зони горіння у шарі залізорудного матеріалу, яка складає 1280...1340° С й 1290...1380° С для умов агломерації бокситів, при якій утворюється дрібнопористий, легковідновлюваний агломерат з достатньою міцністю.

Отримали подальшого розвитку дослідження спрямовані на стабілізацію температурно-часового режиму випалу котунів. Встановлено необхідність розділу класів крупності котунів й їх диференційованого

укладання по горизонтах шару. Запропоновано конструкцію завантажувального пристрою котунів.

Синтезовано алгоритм й програмне забезпечення для оптимізації структури шару агломераційної шихти.

Запропоновані рішення для умов агломерації залізорудної шихти дозволили зменшити питоме споживання твердого палива з 3,6...3,8 % до 3,3 % (9,81...15,14% відн.), підвищити вихід придатного на 4,22 %, зменшити викиди CO на 6,55% (відн.), CO_2 на 6,54% (відн.) й SO_2 на 7,18% (відн.).

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

АННОТАЦІЯ

Мных А.С. Повышение энергоэффективности тепловых процессов окускования сыпучих материалов при интенсификации сегрегации в стационарных слоях – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.06 – Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2016.

Диссертация посвящена комплексному решению проблемы повышения энергоэффективности окускования сыпучих материалов со снижением расхода твердого топлива за счет управления сегрегационными процессами, что позволяет стабилизировать тепловой режим обработки материала по горизонтам слоя.

Теоретическими расчетами, результатами математического моделирования, посредством полупромышленного эксперимента подтверждена возможность снижения расхода твердого топлива и повышения выхода годного при агломерации железорудных, бокситовых материалов и обжиге железорудных окатышей за счет формирования слоя подготовленного к тепловой обработке с заданными химико-гранулометрическими характеристиками.

Развиты научные основы повышения энергоэффективности процесса дробления и предложена методика расчета производительности четырехвалковой дробилки. Проведены исследования по рационализации режимов работы агрегата при измельчении коксовой мелочи и антрацитового штыба. Предложена новая схема дробления топлива с целью снижения влияния истирающих нагрузок на измельчаемый материал. Установлено влияние крупности дробленого топлива на время его выгорания.

Реализовано математическое описание тепловых процессов в стационарном слое моно- и полидисперсных материалов с учетом внутренних источников энергии. Разработана численная конечно-элементная модель теплового режима процесса окускования. Сделан вывод, что при агломерации железорудной шихты существует рациональная температура

зоны горения составляющая $1280...1340^{\circ}\text{C}$, и $1290...1380^{\circ}\text{C}$ при агломерации бокситов, при которой образуется мелкопористый, легковосстановимый агломерат с достаточной прочностью.

Получили дальнейшее развитие исследования направленные на стабилизацию температурно-временного режима обжига окатышей, установлено количество тепловой энергии, необходимой для обжига окатышей различного диаметра, и требуемое время обработки. Установлена необходимость разделения классов крупности окатышей и их дифференцированной укладки по горизонтам слоя. Предложена конструкция загрузочного устройства окатышей.

Разработана методика, позволяющая в непрерывном режиме реального времени оценивать распределение фракционного состава шихты по горизонтам слоя подготовленной к спеканию. Проверено адекватность предложенной методики для условий аглофабрик различных предприятий.

Исследована динамика процесса формирования слоя сыпучего материала. Разработана методология расчета конструктивных характеристик загрузочных узлов. Синтезирован алгоритм и программное обеспечение для оптимизации структуры слоя агломерационной шихты.

Предложенные решения для условий агломерации железорудной шихты позволили сократить удельное потребление твердого топлива с $3,6...3,8\%$ до $3,3\%$ ($9,81...15,14\%$ отн.). Стабилизация теплового режима процесса спекания, позволила повысить механическую прочность и выход годного на $4,22\%$. Усиление сегрегационных процессов в слое с общим сокращением содержания топлива в шихте, снижает выбросы CO на $6,55\%$ (отн.), CO_2 на $6,54\%$ (отн.) и SO_2 на $7,18\%$ (отн.).

Ключевые слова: агломерационная шихта, железорудные окатыши, газодинамические характеристики, порозность, загрузочный лоток, палета, тепло- массообмен, сегрегация, фракционный состав, средний диаметр.

ABSTRACT

Mnyh A.S. The improving of energy efficiency of thermal processes of bulk materials clotting with segregation intensification in stationary layers – Manuscript.

Dissertation for acquisition of the scholarly degree of the Doctor of Technical Science in specialty 05.14.06 – technical thermal physics and industrial heat engineering - Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2016.

The dissertation focuses on the complex solution of the problem of energy efficiency of bulk materials agglomerating with consumption of solid fuel decrease by segregation processes controlling which allows to stabilize the thermal regime of granular material sintering by horizons of the layer during sintering of iron ore, bauxite materials, and firing of iron ore pellets.

The scientific bases of increase of efficiency of fuel crushing process are further developed. In order to reduce the effect of erasing loads on the material, a new scheme of fuel crushing is reveal.

The mathematical description of thermal processes in a stationary layer of mono - and polydisperse materials considering the internal sources of energy is implemented. The rational temperature of the combustion zone in a layer of iron ore sinter in the range 1280...1340° C and 1290...1380° C in case of sintering bauxite which improves the quality of sinter is reveal.

The conducted research is aimed at stabilizing the temperature-time regime of pellet firing. The necessity of separation of size fractions of pellets and their differentiated download by the horizons of the layer is defined. The design of the loading device of the pellets is proposed.

The algorithm and software for the optimization of the sinter mix structure layer is synthesized.

As the result of the research, a new methodology of forming a layer structure allows to reduce the specific consumption of solid fuel from 3,6...3,8 % to 3,3 % (9,81...15,14% cond.) increase productivity by 4,22 %, reduce harmful emissions by *CO* at 6,55% (cond.), by *CO*₂ at 6,54% (cond.) and *SO*₂ at 7,18% (cond.).

Key words: sinter mix, iron ore pellets, gas dynamic characteristics, fenestration, boot tray, pallet, heat and mass transfer, segregation, fractional composition, average diameter.