

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

СОВА АРТЕМ ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 669:162.1:622.78(43)

**ДИСЕРТАЦІЯ**

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА АГЛОМЕРАТУ  
ШЛЯХОМ ФОРМУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ БЛОКОВОЇ СТРУКТУРИ НА  
ОСНОВІ РОЗДІЛЬНОЇ ПІДГОТОВКИ ШИХТИ ТА МЕХАНІЧНОЇ  
ОБРОБКИ СПЕЧЕНЦЯ

Спеціальність: 05.16.02 – “Металургія чорних і  
кольорових металів та спеціальних сплавів”

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ А.В. Сова

Науковий керівник – Бочка Володимир Васильович, д.т.н., професор

Дніпро – 2020

## АНОТАЦІЯ

**Сова А.В. Удосконалення технології виробництва агломерату шляхом формування раціональної блокової структури на основі роздільної підготовки шихти та механічної обробки спеченця. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів». – Національна металургійна академія України. - м. Дніпро – 2020.

Метою роботи є удосконалення технології виробництва агломерату в сучасних умовах на основі результатів дослідження ефективних методів роздільної підготовки компонентів шихти перед спіканням, а також способів механічної обробки спеченця в пристроях спеціальної конструкції.

Встановлено, що попереднє роздільне грудкування композиту з концентрату – руди – вапна – вапняку, основністю 0,9-1,0 од., та залишкової шихти основністю 1,6-1,8 з подальшою спільною грануляцією дозволяє формувати гранули необхідного складу та крупності, що позитивно впливає на якість спеченого агломерату.

Проведені дослідження щодо оптимізації конструкційних та технологічних параметрів барабана-стабілізатора, котрий забезпечує ефективну механічну обробку агломерату.

Використання запропонованої схеми підготовки стабілізованого за крупністю та міцністю агломерату дозволить зменшити вміст дріб'язку в ньому з 12 до 3-4% без значного збільшення кількості звороту.

**Ключові слова:** агломерат, мінералогічний склад, міцність, зв'язка, композит, основність, олівіни, ферити, механічна обробка, барабан-стабілізатор.

## ABSTRACT

**Sova A. The improvement of production technology of agglomerate by forming rational cluster structure using separate preparation of charge and machining of cake. – Manuscript of a qualification research.**

The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical sciences, speciality 05.16.02 - "Metallurgy of ferrous and non-ferrous metals and special alloys". National metallurgical Academy of Ukraine. - Dnipro - 2020.

The goal of the work is the improvement of production technology of agglomerate in the current circumstances based on the results of researching of effective methods of separate preparation of charge constituents before sintering and methods of machining of cake in specially designed machines.

It has been found, that preliminary separate pelletizing of composite out of concentrates – ore – lime – limestone with 0,9-1,0 units of basicity and residual charge with 1,6-1,8 of basicity together with further common granulation allows to form granules with necessary composition and size. It has positive impact on quality of sintered agglomerate.

The studies in the regard of optimization of construction and technological parameters of drum type device, which provides effective machining of agglomerate were made.

The using of proposed scheme of preparation of agglomerate that was stabilized by size and solidity will allow to decrease the content of trifle in it from 12 to 3-4% without significant increase in amount of fine fraction.

**Keywords:** agglomerate, mineralogical composition, solidity, bond, composite, basicity, olivines, ferrits, machining, drum type device.

**Список публікацій здобувача.**

1. Бочка В.В. Дослідження особливостей взаємодії кусків агломераційного спеченця в барабані-стабілізаторі / В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова та ін. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. - №5. – С. 8-11.
2. Бочка В.В. Особенности формирования напряженного состояния и разрушения агломерата / В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова и др. // *Металл и Литьё Украины*. – 2017. - №6-7. – С. 1-4.
3. Бочка В.В. Исследование особенностей процесса разрушения агломерата в устройстве барабанного типа / В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова // *Металл и Литьё Украины*. – 2018. - №11-12. – С. 3-10.
4. Бочка В.В. Особливості спікання агломерату при використанні шихти з попередньо підготовленими композитами / В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова та ін. // *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті*. – 2019. - №22. – С. 3-12.
5. Бочка В.В. Улучшение качества агломерата путем усовершенствования способа подготовки шихты / В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В. Двоєглазова // *Металл и Литьё Украины*. – 2019. - №1-2. – С. 3-10.
6. Бочка В.В. Удосконалення технології виробництва якісного агломерату / В.В. Бочка, А.К. Тараканов, А.В. Сова, М.М. Бойко, М.В. Ягольник, А.В. Двоєглазова // *Теорія і практика металургії*. – 2019. - №1. – С. 5-14. doi:10.34185/tpm.1.2019.01
7. Бочка В.В. Исследования оптимальной механической обработки агломерата/ В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова // XIX INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE «New technologies and achievements in metallurgy, materialengineering and production engineering», a collective monograph, Czestochova, 2018. P. 129-133.
8. Барабан-стабілізатор із завантажувальним пристроєм. Патент на корисну модель №100418 Україна// С.Є. Суліменко, В.В. Бочка, Є.І. Суліменко, А.В. Сова// опубл. 27.07.2015 р. Бюл. №14.

9. Пристрій для стабілізації агломерату за крупністю. Патент на корисну модель №129583 Україна// В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В. Двоєглазова.

**Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.**

1. Бочка В.В. Вдосконалення технології агрегатів для механічної обробки спеку/ В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова та ін. // 41-ша Міжнародна науково-технічна конференція молоді, м. Запоріжжя – 2014. – С. 16.
2. Сова А.В. Дослідження особливостей виробництва стабілізованого за крупністю агломерату/ А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В.Двоєглазова та ін. // 42-га Міжнародна науково-технічна конференція молоді, м. Запоріжжя – 2015. – С. 14.
3. Сова А.В. Вдосконалення конструкції завантажувального пристрою для барабану-стабілізатора/ А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В.Двоєглазова та ін. // V Міжнародна науково-практична конференція «Металургия. Литьє 2016» , м. Запоріжжя – 2016. – С. 418.
4. Сова А.В. Дослідження причин утворення внутрішнього напруження в агломераті, та пошук оптимальної енергії руйнування спеченця / А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В.Двоєглазова та ін. // 43-тя Міжнародна науково-технічна конференція молоді, м. Запоріжжя – 2016. – С. 17.
5. Бочка В.В. Поведінка агломерату при механічних навантаженнях / В.В.Бочка, А.В.Двоєглазова, А.В. Сова та ін. // Матеріали конференції «Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти», присвячена 100-річчю Г.Г.Єфіменко, м. Дніпро – 2017. – С. 233-237.
6. Сова А.В. Пошук оптимальної схеми реалізації внутрішніх напружень в агломераті/ А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В.Двоєглазова та ін. // VI Міжнародна науково-практична конференція «Металургия 2017» , м. Запоріжжя – 2017. – С. 408.
7. Сова А.В. Розробка математичної моделі руйнування агломераційного спеченця в агрегаті стабілізаторі барабанного типу / А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В.Двоєглазова та ін. // 44-та Міжнародна науково-технічна конференція

молоді. – 2017, , м. Запоріжжя – С. 14.

8. Бочка В.В. Можливості отримання стабілізованого агломерату / В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова // VII Міжнародна науково-практична конференція «Металлургия 2018», , м. Запоріжжя – 2018. – С 240-242.

9. Bochka V. Modeling of the mechanical processing of an agglomerate in the drum type device / V. Bochka, A. Sova, A. Dvoiehlazova // 13th International symposium of Croatian metallurgical society. Sibenik, Croatia, June 24-28, 2018.

10. Bochka V. Influence of structural and technological parameters of the drum type device on the mechanical processing of agglomerate / V. Bochka, A. Sova, A. Dvoiehlazova // 13th International symposium of Croatian metallurgical society. Sibenik, Croatia, June 24-28, 2018.

11. Сова А.В. Вплив роздільного огрудкування шихти на якість агломерату / А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В. Двоєглазова, М.В. Ягольник // 45 Міжнародна науково-технічна конференція молоді, м. Запоріжжя - 2018. – С. 19.

12. Бочка В.В. Удосконалення технології виробництва якісного агломерату / В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова, М.О. Ващенко // VIII Міжнародна науково-практична конференція «Металлургия 2019», м. Запоріжжя, 21-23 травня, ст. 256-257.

## ЗМІСТ

	стр
ВСТУП.....	9
....	
1 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА ЯКІСНОГО АГЛОМЕРАТУ В СУЧАСНИХ УМОВАХ.....	16
1.1 Формування вимог до агломерату при його використанні в доменній печі.....	16
1.2 Характеристика агломерату, як основного залізовмісного компонента доменної плавки.....	20
1.3 Вплив етапів технологічної схеми виробництва агломерату на його якість.....	25
1.4 Оцінка ефективності сучасних способів підготовки агломераційної шихти.....	30
1.5 Оцінка особливостей процесів руйнування спеченого агломерату в різних агрегатах механічної обробки.....	33
1.6 Висновки по першому розділу.....	37
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ АГЛОМЕРАТУ ЗАДАНОГО СКЛАДУ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ.....	38

2.1 Дослідження вірогідної можливості формування агломерату заданого фазового складу.....	38
2.2 Вплив капілярних явищ різних компонентів шихти у складі композитів на процес формування гранул.....	46
2.3 Дослідження впливу роздільної підготовки шихти з використанням композитів різного складу на якість сирих гранул і агломерату.....	51
2.4 Технологічна схема роздільної підготовки шихти з можливістю формування агломерату заданого складу та якості.....	59
2.5 Висновки по другому розділу.....	66
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ В БАРАБАНИ-СТАБІЛІЗАТОРІ НА ЯКІСТЬ СПЕЧЕНОГО АГЛОМЕРАТУ, З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ.....	68
3.1 Можливість стабілізації гранулометричного складу агломерату перед потраплянням у робочий простір барабана-стабілізатора.....	68
3.2 Розробка математичної моделі руйнування спеченого агломерату в агрегаті барабанного типу.....	73
3.3 Оцінка і вибір конструкції та технологічного режиму роботи барабана-стабілізатора.....	85
3.4 Експериментальна перевірка результатів моделювання і уточнення технологічних параметрів роботи барабана.....	89
3.5 Висновки по третьому розділу.....	93



4 ОЦІНКА ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАБІЛІЗОВАНОГО АГЛОМЕРАТУ ТА ЇХ ВПЛИВ НА РОБОТУ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ.....	94
4.1 Порівняльний аналіз властивостей агломератів, отриманих за різними технологічними схемами.....	94
4.2 Аналіз ефективності використання стабілізованого агломерату в доменній печі.....	97
4.3 Розрахунок економічного ефекту запропонованих заходів.....	99
4.4 Висновки по четвертому розділу.....	103
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	107
Додаток А.....	119
Додаток Б.....	120

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Удосконалення технології виробництва агломерату є актуальною задачею, вирішення якої дозволить збільшити продуктивність доменних печей і знизити питому витрату коксу. Формування

якості агломерату є комплексною задачею і здійснюється на кожній стадії його виробництва. Існуюча технологія складається з заходів по підготовці та спіканню шихти, а також механічної обробки спеченого продукту. Міцність агломерату визначається складом в'язучих частин, наявністю неспечених компонентів, крупних пор і появою внутрішніх напружень у кусках, які утворюються під час самого агломераційного процесу й охолодження спеченця, а реалізуються на етапі механічної обробки.

Отримання якісного агломерату, стабілізованого за крупністю та міцністю, залежить від можливості створення умов на етапі підготовки шихти до спікання для формування блокової структури та мінералогічного складу в'язучої частини високої міцності. Існуючі схеми підготовки шихти не в змозі в повній мірі забезпечити виконання цих вимог.

Спечений агломерат піддається механічній обробці, задачею якої є виділити з нього міцні куски, стабілізовані за крупністю та міцністю, для забезпечення оптимальних умов роботи доменної печі. Агрегати для механічної обробки не враховують механізм руйнування агломерату під дією різних типів навантаження, що суттєво обмежує можливості підвищення його якості.

Значний внесок у дослідження способів отримання якісного агломерату зробили вчені: Є.Ф. Вегман, Т.Я. Малишева, В.А. Утков, Л.Р. Мігуцький, Д.А. Ковальов, Є.І. Суліменко, В.І. Коротич, Ю.С. Юсфін, Г.В. Коршиков, С.В. Смирнов та інші.

Запропоновано для формування раціональної блокової структури зі зв'язкою: різні способи управління гранулометриєю та мінералогічним складом сирих гранул, використання комплексного флюсу, подачу флюсів у нижній шар для спікання; для механічної обробки спеченця: використання після зубчатої дробарки пристрою барабанного типу, зменшення однотипних навантажень у дробарках.

Незважаючи на значні досягнення у вирішенні вказаної задачі, у повній мірі вона залишається не вирішеною. У зв'язку з цим, дослідження,

спрямованні на вивчення фізико-хімічних закономірностей формування в агломераті заданої структури та властивостей на стадіях підготовки шихти до спікання та механічної обробки спеченого продукту є **актуальними** для отримання агломерату, стабілізованого за міцністю та крупністю.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Розглянуті в дисертаційній роботі питання і задачі складають результати досліджень, що виконані автором та викладені у звіті із науково-дослідної роботи «Розробка способів використання в металургії вуглецевих матеріалів, отриманих з поновлюваної сировини» (номер державної реєстрації Г001М10007). Дисертаційна робота виконувалася в рамках науково-дослідної діяльності кафедри металургії чавуну Національної металургійної академії України (НМетАУ).

**Мета та завдання дослідження.** Теоретичне обґрунтування та удосконалення технології виробництва агломерату на основі результатів дослідження ефективних методів роздільного грудкування компонентів шихти перед спіканням, а також способів механічної обробки спеченця у пристроях спеціальної конструкції.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі передбачалося вирішення наступних задач:

- проаналізувати вимоги до якості агломерату, сучасні способи його отримання та можливості їх удосконалення;
- обґрунтувати на основі фізико-хімічних досліджень можливість формування складу та покращення властивостей агломерату;
- визначити умови формування в агломераті міцної міжблокової зв'язки при застосуванні роздільної підготовки шихти до спікання з використанням композитів різного складу та властивостей;
- провести лабораторні спікання агломерату з метою визначення раціональних параметрів технології роздільного грудкування з використанням композитів заданого складу та крупності;

- обґрунтувати оптимальні умови механічної обробки агломерату з метою його стабілізації за гранулометричним складом і міцністю;
- розробити математичну модель руйнування кусків агломерату в пристрої барабанного типу, визначити вплив конструкційних і технологічних параметрів роботи барабана-стабілізатора на величину та вид енергетичних навантажень на агломерат;
- визначити оптимальні параметри механічної обробки агломерату при різних умовах роботи барабана-стабілізатора;
- оцінити властивості стабілізованого агломерату та ефективність його використання в доменній печі.

**Об'єкт дослідження:** технологія виробництва агломерату заданого складу та властивостей.

**Предмет дослідження:** фізико-хімічні закономірності формування заданої структури агломерату; вплив роздільної підготовки шихти на процес спікання агломерату та його якість; вплив величини та виду механічного навантаження на руйнування спеченого агломерату; розробка математичної моделі з метою визначення величини та виду механічного навантаження на агломерат в залежності від конструкції та технологічних параметрів роботи барабана-стабілізатора; розробка конструкції барабана-стабілізатора та технологічних умов роботи для забезпечення стабілізації агломерату за крупністю та міцністю.

**Методи дослідження.** Аналітичні та теоретичні дослідження реакції утворення залізо-кальцієвих олівінів і феритів кальцію базуються на фундаментальних положеннях фізичної хімії та теорії металургійних процесів. Аналіз основних термодинамічних показників та фазового складу для компонентів агломераційної шихти проводили за допомогою програмного комплексу. Дослідження способу грудкування агломераційної шихти з використанням попередньо підготовлених композитів проводили на експериментальній установці для спікання агломерату в лабораторії кафедри

металургії чавуну НМетАУ. Дослідження ефективності використання барабана-стабілізатора для оптимальної механічної обробки і стабілізації агломерату та вплив його конструкційних і технологічних параметрів роботи проводили в дослідному барабані проблемної лабораторії кафедри металургії чавуну НМетАУ. В роботі використані методи математичного моделювання та математичної статистики, прикладні програми планування експерименту. Усі експериментальні дослідження виконані з використанням перевіреного та сертифікованого обладнання й устаткування.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Розвинуто уявлення щодо відмінностей у взаємодії різних компонентів агломераційної шихти з водою під час роздільних процесів зволоження та грудкування. На основі результатів досліджень капілярної здатності до змочування запропоновано розподілення компонентів шихти, яке, ґрунтуючись на їхній пористості, властивостях поверхонь і їхній активності під час зволоження, забезпечує рівномірні показники просочування вологи в суміш та взаємодії компонентів між собою, що сприяє утворенню більш однорідних за розмірами та складом гранул, шляхом їхнього роздільного зародження не лише навколо крупних кусків звороту та руди, а й завдяки окремій взаємодії дрібних компонентів з активними поверхневими властивостями, і подальшої спільної грануляції зародків гранул з залишковою шихтою.

2. Обґрунтовані та показані умови роздільної підготовки шихти до спікання, завдяки яким в агломераті під час спікання формується в'язуча частина переважно з залізо-кальцієвих олівінів і незначної кількості феритів кальцію, оскільки за рахунок утворення необхідних контактних взаємодій компонентів він має основність на рівні 0.9-1.0 од. для формування залізо-кальцієвих олівінів та 1.6 од. для формування феритів кальцію.

3. Вперше на основі моделювання механічної обробки агломерату в пристрої барабанного типу досліджено залежність виділення міцної складової спеченого агломерату блокової структури, в'язуча частина якого

представлена залізо-кальцієвими олівінами та феритами кальцію, від прикладених енергетичних навантажень на нього, види і величина яких залежать від характеристик конструкції барабана та технологічних умов його роботи. Обґрунтована та експериментально підтверджена ефективність створення в барабані робочих зон зі змінною дією сил та величиною енергетичного навантаження на матеріал за рахунок зміни кількості та ширини полиць, що призводить до реалізації внутрішніх напружень в агломераті, подальшого надання йому округлої форми та стабілізації за крупністю (5-50 мм) та міцністю.

### **Практична цінність отриманих результатів**

1. Розроблені технологічні рекомендації щодо підвищення ефективності підготовки агломераційної шихти до спікання. Показано, що для можливості отримання агломерату заданого складу та властивостей необхідно попередньо формувати композит шляхом спільного грудкування концентрату з залізною рудою крупністю 0-3 мм в кількості 9-12 % від маси концентрату, вапном та вапняком крупністю 0-3 мм, що забезпечує основність суміші на рівні до 1.0 од.. Залишкова частина агломераційної шихти, основністю від 1.6 од. грудкується окремо з подальшою грануляцією спільно з запропонованим композитом у барабані, з додаванням наприкінці коксу крупністю 0-7 мм.

2. Розроблені практичні рекомендації щодо конструкції і технологічних параметрів роботи барабана-стабілізатора, що забезпечує ефективну механічну обробку спеченця та отримання стабілізованого за крупністю та міцністю агломерату. Барабан повинен бути обладнаний не менш ніж трьома робочими зонами та мати наступні характеристики: радіус – 1,25–1,75 м; частота обертання – 8-10 об/хв; кількість полиць: 6 (1 зона), 4 (2 зона) та 0-2 (3 зона); ширина полиць: 20-22 % від радіуса барабана (1 зона), 18-20% (2 зона) та 16-18 % (3 зона); ступінь завантаження барабана – 15-30%; кут нахилу 4-6 град.; довжина барабана 7,5-10 м.

3. Результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи були використані при розробці проекту реконструкції

агломераційних фабрик України в державному підприємстві «Укрдїпрометз» (додаток А), а також використовуються у навчальному процесі на кафедрі металургії чавуну Національної металургійної академії України при вивченні дисципліни «Підготовка металургійної сировини» спеціальності 136 - «Металургія» (додаток Б).

**Особистий внесок дисертанта.** Наведені в дисертації теоретичні дослідження, обробка, узагальнення та аналіз отриманих результатів виконані автором самостійно. Результати експериментальних досліджень опубліковані в співавторстві зі співробітниками та студентами кафедри металургії чавуну Національної металургійної академії України. В опублікованих спільно зі співавторами працях, наведених в авторефераті, автор особисто виконав: [1, 3, 6, 9-13, 19-21] - аналіз стану виробництва якісного агломерату, підготовку, проведення експериментів, аналіз і обробку отриманих результатів; [2, 4-5, 14-18] - проведення експериментів, аналіз і обробку отриманих результатів; [7-8] - аналіз існуючих технологій механічної обробки агломерату, проведення експериментів і аналіз отриманих даних.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи були представлені в доповідях на: міжнародних науково-технічних конференціях молоді (м. Запоріжжя 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 роки), міжнародних науково-практичних конференціях «Металургія» (м. Запоріжжя 2016, 2017, 2018, 2019 роки), всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти», присвяченій 100-річчю Г.Г. Єфименка (м. Дніпро, 2017р.), International symposium of Croatian metallurgical society (Sibenik, Croatia 2018 p.).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковані 21 роботи, із них: 6 – статті у спеціалізованих наукових виданнях, затверджених ДАК України, 1 – стаття у науковому виданні іншої держави, 2 – патенти на корисну модель, 12 - матеріали наукових конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Матеріал

дисертації викладений на 120 сторінках, включаючи 42 рисунки, 19 таблиць та 2 додатки. Бібліографічний список містить 114 найменувань робіт вітчизняних і закордонних авторів.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА ЯКІСНОГО АГЛОМЕРАТУ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

#### 1.1 Формування вимог до агломерату при його використанні в доменній печі



Доменна піч - агрегат, який працює за принципом протитоку газу та шихти. В нижню її частину подається повітря, що вдувається, необхідне для згоряння палива. Газ, що утворився, рухається вгору, а назустріч йому спускаються шихтові матеріали, які завантажуються в верхню частину доменної печі. Матеріали спускаються під власною масою, а повітря, що вдувається подається під тиском, достатнім для подолання опору стовпа шихти та зони когезії. В результаті цього газ віддає свою теплоту шихтовим матеріалам та вступає у реакції непрямого відновлення.

Стовп шихтових матеріалів складається з кусків різної величини та форми. В порожнечах, між кусками, рухаються гази, а в нижній частині доменної печі - гази і рідкі продукти плавки. Шихтові матеріали повинні в максимально повній мірі забезпечувати гарну газопроникність [1-4].

Підвищення якості залізорудної частини шихти є одним з найбільш ефективних заходів, які дозволяють покращити техніко-економічні показники роботи доменної печі: знизити питому витрату коксу, підвищити продуктивність, зменшити вихід шлаку та створити умови для впровадження технології вдування ПВП [5-7].

Під час доменної плавки шихтові матеріали піддаються дії різних навантажень, які призводять до їх руйнування зі збільшенням вмісту дрібної фракції 0-5 мм, що негативно впливає на хід процесу. Ці навантаження можна розділити на три типи:

- механічні, під час завантаження у доменну піч та під дією верхнього шару матеріалів;
- теплові, спричинені різким перепадом температур;
- фізико-хімічні, які виникають у результаті перетворень [8-9].

Це висуває ряд вимог до них, забезпечення яких дозволить підтримувати в оптимальних умовах роботу доменної печі.

В Україні основним залізозмісним компонентом доменної плавки залишається агломерат. Його позитивними металургійними характеристиками є:

- технологічна можливість виробництва з будь-яких залізовмісних матеріалів і відходів металургійного виробництва;
- можливість флюсувати до будь-якої необхідної основності;
- кут природного укосу, аналогічний доменному коксу;
- низькі величини усадки шару та перепаду руху газу в ньому;
- вузький діапазон температур перед початком розм'якшення та плавленням в процесі високотемпературного (вище 1100 °С) відновлення за умов його основності вище 1,2 од. [10].

Негативними металургійними характеристиками агломерату є:

- низький вміст заліза;
- високий вміст дрібної фракції (0-5 мм) в готовій продукції;
- широкий діапазон крупності готової продукції;
- низька міцність та високе стирання під час транспортування та перевантаження;
- низька міцність та високе стирання в процесі низькотемпературного відновлення;
- відносно низька відновлюваність [11].

Проведено дослідження характеру та механізму руйнування агломерату на спеціальній установці, яка моделює доменну піч, забезпечуючи нагрів під навантаженням в різноманітних газових середовищах. Авторами доведено, що агломерат може піддаватися як крихкому, так і пластичному руйнуванню [12].

Крихкі руйнування відбуваються в інтервалі температур 400-700 °С шляхом утворення тріщин трьох типів:

- термічних, у зв'язку зі структурною неоднорідністю агломерату;
- у зв'язку зі збільшенням об'єму гематиту в розмірах під час відновлення;
- радіальних у межах металізованої кірки на поверхні агломерату, яка виникає в наслідок з її різким стисненням при зональному відновленні.

Пластичні руйнування відбуваються в зоні температур 900-1200 °С. Розм'якшення агломерату відбувається у зв'язку оплавлення скла та

легкоплавкої евтектики з подальшим розчиненням у розплаві різних мінералогічних фаз, а також у зв'язку з розм'якшенням і деформацією металеві губки, яка утворюється при відновленні залізо-оксидних мінералів [13].

Зона когезії, в якій шихтові матеріали знаходяться в розм'якшеному стані, надає найбільший супротив проходу газів в доменній печі. Для забезпечення рівномірного сходження шихти та високих техніко-економічних показників важливо скоротити її протяжність [14]. У роботі [15] встановлено, що фракція менше 5 мм має найбільш низьку температуру розм'якшення, у той час як фракція 40-60 мм – найбільш високу, що також призводить до нестабільного та нерівномірного протікання процесу плавки.

Отже, можна зробити висновок, що однорідність гранулометричного складу агломерату не лише позитивно впливає на газопроникність усього шару шихти, а й на рівномірність та швидкість його процесу розм'якшення в печі.

Важливі дослідження руйнування агломерату в доменній печі об'ємом 2000 м<sup>3</sup> шляхом визначення його складу по висоті доменної печі провели Б.М. Старшинов та ін. [16]. Проби знімали на трьох горизонтах і в фурменій зоні горна. Результати наведені в таблиці 1.1.

В табл. 1.1 показано зменшення вмісту фракції + 10 мм в агломераті по висоті шахти за результатами відбору проб з доменної печі. Видно, що якщо частка фракції +10 мм у вихідному агломераті становить 48,3%, то вже у верхній частині шахти на досліджуваному горизонті на рівні 3,5 м від колошника ця величина складає 27,3%, що означає руйнування майже половини цієї фракції. Перш за все, це свідчить про вплив механічних навантажень на агломерат, що виникають у результаті реалізації напруженого стану при завантаженні матеріалів на колошник, при падінні матеріалу у піч, а також при впливі маси стовпа матеріалів.

## Гранулометричний склад проб по горизонтах

Горизонти, що досліджуються	Вміст фракцій в агломераті (мм), %		
	10+	5-10	0-5
В(вихідний)	48,30	37,10	14,60
3,5 м	27,30	44,90	27,80
11,8 м	24,80	52,20	23,00
17,8 м	8,20	51,50	40,30

Відбір проб в середині шахти на висоті 11,8 м показав, що вміст фракції +10 мм зменшився лише на 2,5%. А при подальшому спускові з 11,8 м до 17,8 м, знову відбувається суттєве руйнування до 8,2%, що пояснюється досягненням агломератом зон розм'якшення і когезії.

Кількість утвореного дріб'язку (0-5 мм) в доменній печі змінюється в зворотній пропорційності до зміни фракції +10 мм. Єдиною відмінністю є зменшення вмісту фракції 0-5 мм з 27,8 до 23% у зоні між висотами 3,5 і 11,8 м. Це можна пояснити частковим виносом газами пилюватого дріб'язку, що утворився руйнуванням і стиранням у верхніх шарах стовпа матеріалів.

За допомогою дослідження поведінки матеріалу в доменній печі, можна сформулювати основні вимоги до якості агломерату зі сторони доменної плавки:

а) за фізичними властивостями:

- однорідність гранулометричного складу;
- висока механічна міцність;
- низький рівень руйнування та стирання в звичайному стані та мінімізація погіршення цих властивостей у процесі відновлення;
- висока пористість;

б) за фізико-хімічними властивостями:

- висока відновлюваність (збільшення відновлюваності залізовмісної сировини на 1% забезпечує зменшення питомої витрати коксу приблизно на 1%. [17]);
- висока температура початку розм'якшення та його невеликий температурний інтервал;

в) за хімічним складом:

- максимальний вміст заліза;
- висока основність, яка дозволяє не використовувати додаткові флюси;
- стабільність хімічного складу [1-2; 5].

Представлені дані призводять до висновку, що для зменшення процесу руйнування агломерату в доменній печі є необхідною стабілізація матеріалу за крупністю, хімічним складом і міцністю. Вирішення цієї задачі дозволить забезпечувати доменну піч матеріалом, котрий сприятливо впливатиме на сам процес плавки.

## 1.2 Характеристика агломерату, як основного залізовмісного компонента доменної плавки

Агломерат - це антропогенний багатокомпонентний матеріал за складом схожий на залізні руди, оскільки містить значну кількість однойменних мінералів, структуру і мінералогічний склад якого на відміну від руд можна змінювати в залежності від складу та умов підготовки шихти і режиму спікання [18].

Значну увагу дослідженню структури агломерату приділив у своїх роботах Є.Ф. Вегман [19]. Встановлено, що кусок агломерату не являється однорідною масою, а складається з окремих слабо пов'язаних між собою згустків речовини, розділених широкими порами неправильної форми. Просторова система таких згустків, названих блоками, кожен з яких відрізняється від сусідніх розміром (від частки мм до 30-40 мм) і формою

(неправильною, та зазвичай округлою), нагадує текстуру грона винограду.

Блок має концентрично-зональну будову. Він містить периферійну зону, яка складається в основному з магнетиту та невеликої кількості силікатної зв'язки, проміжну зону, в якій кількість зв'язки збільшується, та одне або декілька центральних силікатних озер, що містять дендрити або скелетні кристали магнетиту та вюститу в масі силікатів заліза та залізистого скла. Таким чином, концентрація силікатної зв'язки зростає в напрямку від периферії до центральних областей блоків, а вміст магнетиту – в напрямку від периферії блоку.

Силікатні озера розташовані не обов'язково в геометричному центрі блоку, вони можуть бути зміщеними до однієї зі сторін, але ніколи не виходять на його поверхню та завжди відділені від поверхні магнетитовим шаром. У ході досліджень [20], автори не відмітили закономірності у розподіленні залізистого скла по перерізу блоку. В одних випадках воно приурочене до центральних озер, в інших – до периферійної зони блока.

Встановлено, що блок є найбільш міцною текстурною одиницею в агломераті, в той час як зв'язуючі компоненти мають меншу міцність [21]. Зв'язкою в агломераті низької основності слугують фаяліт і залізокальцієві олівіни, які утворюють силікатні озера. Зі збільшенням основності частка силікатів заліза зменшується, а збільшується вміст феритів кальцію. Формування блокової структури в агломераті є важливою задачею, оскільки дозволяє концентровано виділяти зі спеченого продукту міцну складову.

Міцність агломерату як композиційного матеріалу є важливою характеристикою, яка пов'язана з параметрами внутрішнього напруженого стану [22]. Він виникає як і в процесі агломерації, так і в значній мірі під час охолодження спеченого продукту, а реалізується за допомогою механічної обробки [23]. Руйнування спеченця відбувається за умов, коли сумарна дія всіх напружень в матеріалі досягає критичного рівня, який залежить від його складу та структури [24].

Однією з головних причин виникнення внутрішніх напружень є

композитність агломерату. Вони виникають і за рахунок неможливості деформуватися пов'язаним в систему компонентам незалежно від інших і через наявність таких складових, як скло, яке навіть у незначній кількості може підвищувати величину власних напружень у кусках в 1,5-2 рази [25-26].

Закономірності руйнування агломераційного спеченця показують, що дезінтеграція матеріалу здійснюється послідовно, починаючи з розриву слабких зв'язок та руйнування крупних пор. Міцні блоки при цьому майже не піддаються руйнуванню, оскільки при нормальних умовах спікання міцність зв'язки між елементами має бути нижчою за міцність самого елемента [18] .

Утворення тріщин навколо пор обумовлено концентрацією розтягуючої напруги на контурах цих пор. Під час досягнення зовнішніми стискаючими напруженнями критичного рівня, виникає напруга на контурах пор, яка сприяє розвитку тріщин, котрі у підсумку при багатократному розвітленні та зміні напрямку утворення, створюють разом магістральну тріщину, орієнтовану вздовж напрямку зовнішніх зусиль, що і призводить до руйнування матеріалу [27].

Ці дані свідчать про те, що міцність агломератів залежить від мінерального складу зв'язок рудних зерен та наявності крупних пор. Автори [28] порівняли характеристики міцності на стиснення зв'язуючі фази агломерату. Воно показало, що складові агломерату суттєво відрізняються за своїми характеристиками міцності. Найменш міцними фазами є олівінове скло та двокальцієвий ферит. Їх наявність і визначає низьку міцність агломерату, оскільки руйнування кусків починає відбуватися саме зі слабких зв'язок і крупних пор.

Це підтверджують результати досліджень [29-30] на визначення міцності, мікрокрихкості та мікротвердості спеціально підготовлених чистих мінералів, які є основною складовою зв'язки в агломераті, представлені на рис. 1.1.

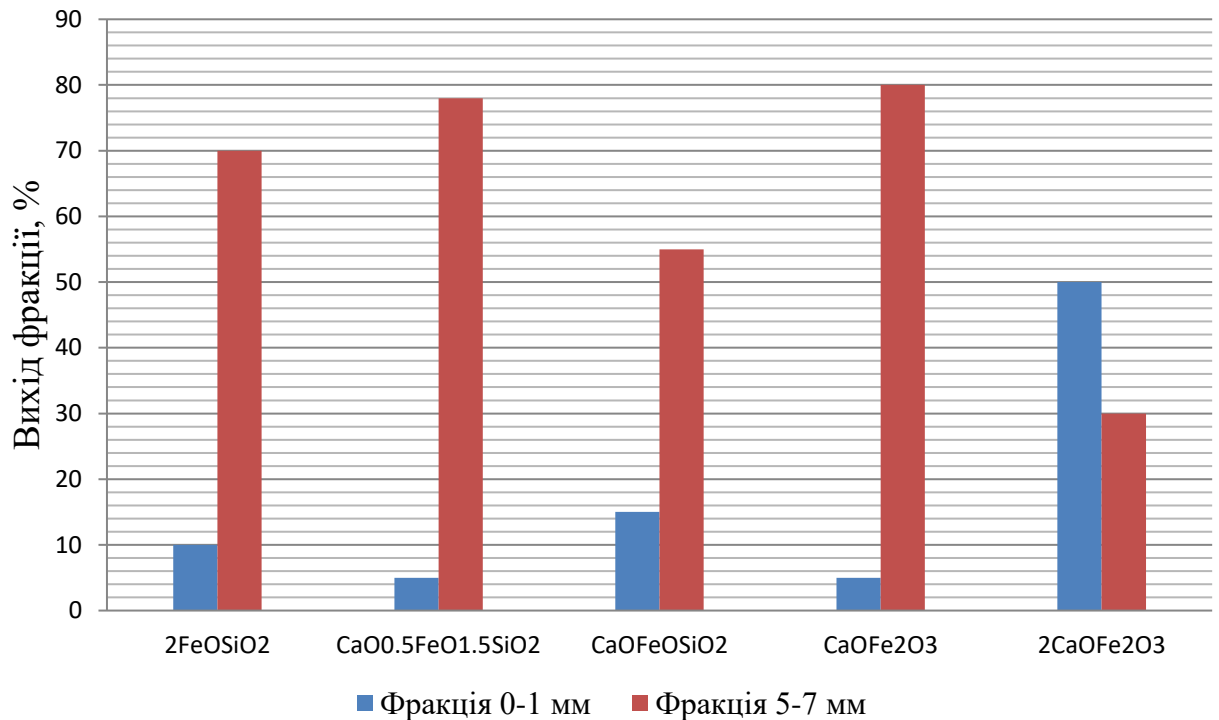


Рисунок 1.1 - Вихід фракцій 0-1 мм і 5-7 мм для різних мінералів після дроблення впродовж 15 хв: 1 – фракція – 0-1 мм; 2 – фракція 5-7 мм

Встановлено, що найбільш міцними при дробленні є однокальцієвий ферит і залізо-кальцієвий олівін складу  $\text{CaO}_{0.5}\text{FeO}_{1.5}\text{SiO}_2$ . Вони мають і найвищі показники мікротвердості.

Мінералогічний склад зв'язки визначається основністю шихти, а міцність готової продукції, в свою чергу, напряму залежить від їхнього складу [26; 31-33]. Збільшенням основності шихти від 1,6 до 3,0 приводить до появи феритів, які утворюють більш міцну структурну композицію рудної зв'язки ніж силікати [34-36].

Проте, як показали дослідження [37], при значному вмісті фериту кальцію може відбуватися розвиток процесу утворення тріщин, що потребує й обмеження вмісту  $\text{CaO}$  в агломераційній шихті. У той же час, збільшення вмісту фаяліту в системі призводить до появи мікротріщин [38].

Виходячи з результатів наведених досліджень, постає потреба у формуванні агломерату блокової структури із заданим складом міжблокової



зв'язки, представленої переважно однокальцієвим феритом та залізо-кальцієвими олівінами низької основності.

На відміну від гіпотези професора Є.Ф. Вегмана, який стверджував, що блоки формуються навколо кусків твердого палива, у роботі [39] стверджують те, що блокова макроструктура спеченого агломерату є наслідком сформованої макроструктури згрудкованої шихти, центрами утворення більшості гранул якої є крупний зворот, на який накочена дрібнодисперсна шихта. Автори наголошують, що в цьому випадку зворот переорієнтовується в пластичному стані з утворенням крупних магнетитових кристалів і локалізацією залізо-силікатного розплаву. Дрібнодисперсна шихта на стадії твердофазного спікання перетворюється на рудно-феритний спеченець, який дає початок залізо-силікатному розплаву. Сили поверхневого натягу цього розплаву й призводять до формування блоків.

Результати цих досліджень показують важливість етапу підготовки агломераційної шихти до спікання та дослідження досі актуального питання механізму формування міцного агломерату на цій стадії виробництва [40].

Вірогідно, що для зменшення значної температурної та хіміко-мінералогічної неоднорідності в мікрооб'ємах шихти [41] необхідно прагнути рівномірного розподілення компонентів, оптимізації процесів зволоження та, відповідно, утворення гранул. А вже в наслідку створення оптимальних умов для спікання, з максимальною ефективністю буде використовувати паливо для передумов формування блоків, яке може розташовуватись як і всередині гранул, так і на їх поверхні, що доведено в результатах досліджень [42].

### 1.3 Вплив етапів технологічної схеми виробництва агломерату на його якість

Існує внутрішній зв'язок між параметрами агломераційного процесу та якістю агломерату [43]. Формування міцної структури та оптимального мінерального складу агломерату триває на кожному етапі його виробництва, починаючи з вибору та підготовки шихти до спікання та завершуючи

виділенням міцних блоків зі спеченого продукту під час механічної обробки [44-45].

Існуюча технологія складається з заходів по підготовці усіх компонентів шихти до спікання, процесу спікання та подальшої механічної обробки спеченого продукту, рис. 1.2 [45-47].

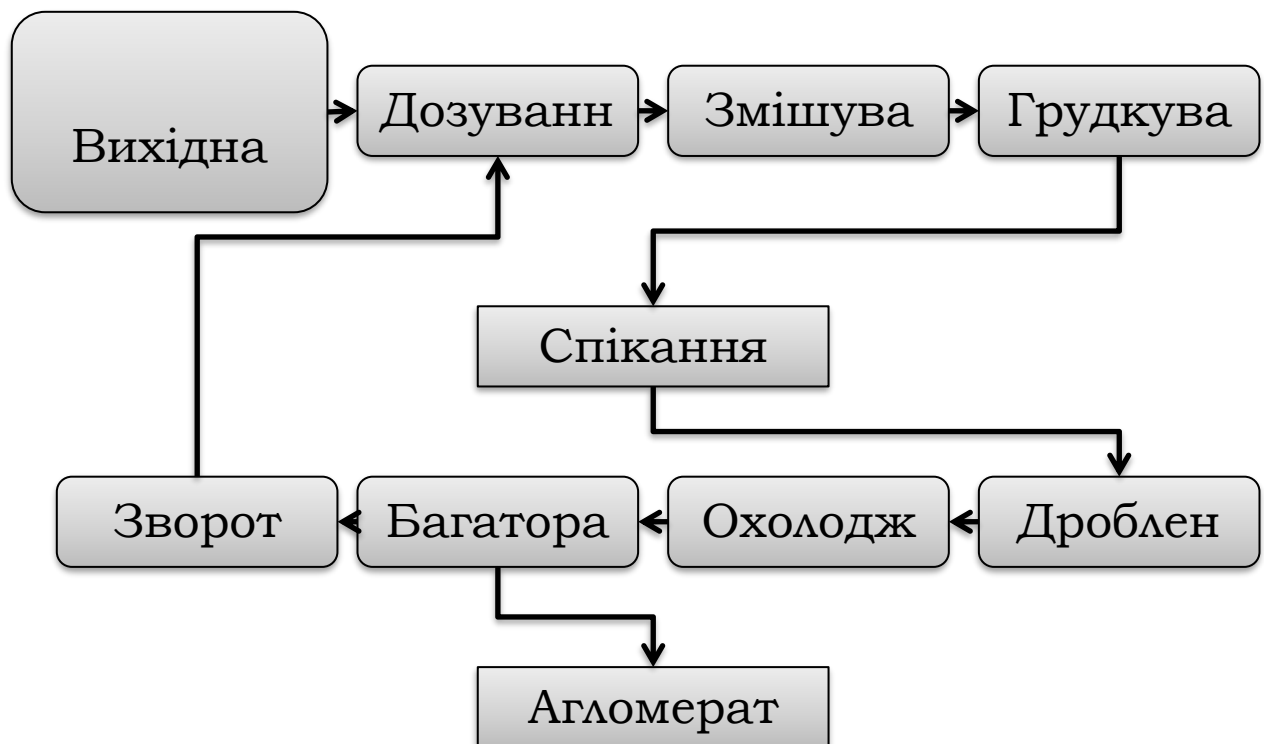


Рисунок 1.2 – Технологічна схема виробництва агломерату

У статті [48] доведено значний вплив на структуру та якість агломерату ефективності грануляції, стабільності ядра і об'єму первинного розплаву агломерату та властивостей залізної руди. На процеси грануляції та термічного ущільнення при спіканні впливають хімічні, фізичні та мінералогічні характеристики компонентів шихти [44].

В основному механізм грануляції передбачає накопчування дрібних часток шихти на більш крупні, які виконують функцію ядра майбутньої гранули [49]. При підготовці шихти з використанням усіх компонентів отримати високий ступінь однорідності гранул за крупністю та хімічним

складом проблематично через недостатнє врахування особливостей поведінки матеріалів при зволоженні та грудкуванні, а також через значні коливання розмірів часток агломераційної шихти. Особливо це стосується використання шихт, які містять значну кількість концентрату крупністю менше 0.1 мм та крупнозернистих компонентів, таких як залізна руда та зворот [50-51].

Негативний вплив використання маленьких часточок концентрату в значній кількості є загальновідомим [52-53]. Як експериментально довели автори статей [54-55], спікання суміші з високим вмістом концентрату характеризується різким зниженням придатного агломерату, що знижує і питому продуктивність установки.

Погіршення умов підготовки шихти з використанням компонентів різної крупності пояснюється також тим, що переміщення матеріалів грудкувачем супроводжується додатковим розподіленням різних фракцій і порушенням їх однорідності. У той же час, дрібні компоненти мають більший коефіцієнт тертя у порівнянні з крупними та меншу швидкість руху, що призводить до сегрегації матеріалів [56].

Як показали лабораторні дослідження на кафедрі металургії чавуну НМетАУ, у результаті підготовки такої шихти значна кількість дрібної фракції не грудкується зовсім (до 25-30%), а на крупні фракції накопчується тонкоподрібнений матеріал з утворенням гранул розміром більше 10-15 мм, які під час руху в барабані-грудкувачі руйнують більш слабкі дрібні гранули. Це призводить до зниження газопроникності агломераційної шихти. Окрім того, така схема грудкування не забезпечує в достатній мірі рівномірне розподілення компонентів у гранулах, що негативно впливає на процеси твердо- та рідкофазного спікання агломерату. Закладена неоднорідність на етапі підготовки шихти в значній мірі сприяє зародженню внутрішніх напружень в агломераті на етапах спікання та охолодження спеченого продукту.

Таким чином, дана технологічна схема підготовки шихти суттєво обмежує можливості формування та виробництва агломерату заданого складу

та високої міцності, сприяючи зародженню неоднорідності шихти та внутрішніх напружень в спеченому продукті, що висуває необхідність розробки нових шляхів її удосконалення.

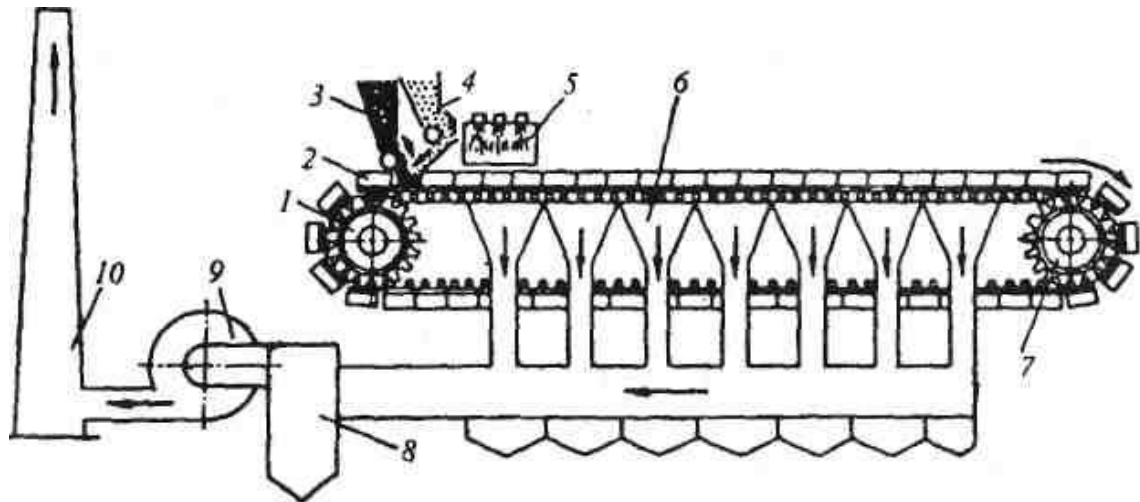


Рис. 1.3 - Схема агломераційної машини [1]

1- зірочки, 2-візки-палети, 3-живильник, 4- завантажувальний пристрій, 5- горн, 6- вакуумна камера, 7-холоста зірочка, 8- пилоловлювач, 9- ексгаустер, 10- труба.

Спикання агломерату відбувається на машині (рис. 1.3), яка має в якості основного елементу замкнуту стрічку (конвеєр) з окремих спікальних візків-палет. На рухому стрічку живильником укладають постіль висотою ~ 30 мм зі звороту крупністю 10-25 мм (вона запобігає прокидання шихти через щілини решітки і оберігає решітку від перегріву). Потім живильником завантажують шар шихти висотою 250-350 мм. На рухомій стрічці шихта потрапляє під запальний горн, що нагріває поверхню шихти по всій ширині до 1200-1300 °С, в результаті чого спалахує паливо. За рахунок просмоктування ексгаустером зверху повітря, шар горіння коксу і спикання агломерату переміщується вниз, а продукти горіння через вакуумні камери надходять в пилоловлювач і викидаються в атмосферу через трубу.

Формування агломерату закінчується на горизонтальній ділянці руху

стрічки; цей момент легко визначають через різке падіння температури газів, які відходять, що свідчить про закінчення горіння коксу [1].

Процес агломерації умовно поділений на п'ять зон (перезволоження, сушки, підігріву, плавлення, горіння). Під час горіння вуглецю відбувається нагрів шихтових матеріалів, що створює умови протікання твердофазних хімічних реакцій, під час яких взаємодіють контактуючі між собою частки. Реакції в твердій фазі мають екзотермічний ефект.

Реакції в твердій фазі дозволяють отримати в зоні підігріву і в зоні горіння твердого палива нові легкоплавкі речовини, наявність яких необхідна для отримання достатньої кількості розплаву в зоні горіння [57]. У верхній зоні підігріву та зоні горіння відбувається розм'якшення шихти. Таким чином речовини, які утворились в твердій фазі, знову розкладаються при плавленні. Тому при достатній витраті палива на процес кінцева структура агломерату значно відрізняється від структури шихти перед плавленням. Визначаючим фактором при кристалізації розплаву є його основність агломераційної шихти та швидкість охолодження розплаву, від яких залежить кінцевий мінералогічний склад агломерату [58].

Існуюча технологія спікання агломерату цілком ефективна при застосуванні якісних сировинних матеріалів. На формування внутрішніх напружень під час спікання впливають закладені неоднорідності фазового складу та крупності гранул під час підготовки шихти.

На величину внутрішніх напружень в спеченому продукті в значній мірі впливає і швидкість його охолодження – з її зростанням збільшується і кількість напружень [59-60].

Також важливим технологічним етапом, задачею якого є виділення зі спеченого агломерату міцної складової зі стабілізацією його крупності (5-40 мм), складу та міцності без утворення значної кількості дріб'язку (0-5 мм) є його механічна обробка [61-62].

Оскільки спечений агломерат в залежності від крупності визначається різними характеристиками міцності, складу, а отже і внутрішніми

напруженнями у кусках, виникає доцільність проведення механічної обробки в декілька етапів. На першому етапі спеченець піддається руйнуванню до розмірів першого структурного рівня (300-600 мм), далі під час активного навантаження на матеріал його крупність зменшується до розмірів другого структурного рівня (близько 100 мм), елементи якого істотно розрізняються за значенням міцності та необхідної величини навантаження подальшого руйнування, і на третьому етапі руйнування отримувати кондиційний стабілізований за крупністю та міцністю агломерат [18].

Отримання стабілізованого агломерату можна досягти контрольованим навантаженням на матеріал, за допомогою сил удару, розколювання, стирання і роздавлювання.

Відповідно до концепції селективного руйнування неоднорідних матеріалів співвідношення виходу кондиційного класу (5-40 мм) і вмісту дріб'язку (0-5 мм) багато в чому залежить від режиму навантаження. Необмежена деформація і великий запас діючої енергії навантажувального пристрою призводить до вторинного руйнування з надмірним утворенням дріб'язку.

У сучасних умовах агломерат перед відправленням у доменний цех піддається механічній обробці зазвичай в дробарках різного типу та подальшому відсіванню на грохотах різної конструкції [45].

Недоліком такої схеми обробки є переважна однотипність діючих сил руйнування в дробарках і відсутність можливості контролю та зміни величини навантаження в них. У більшості випадків це призводить до подрібнення кусків з утворенням значної кількості дріб'язку, а не ефективного виділення зі спеченого агломерату міцної складової.

Також від умов охолодження спеченого агломерату під час механічної обробки залежить наявність значної кількості внутрішніх макронапружень [63]. Їх можна ліквідувати вповільненим охолодженням, або повторним нагрівом [25].

Недосконалість підготовки шихти до спікання та недостатня

ефективність механічної обробки призводить до того, що отриманий агломерат характеризується низькими показниками міцності, неоднорідністю хімічного складу та крупності, наявності високого вмісту дріб'язку.

У зв'язку з цим дослідження, спрямованні на вивчення фізико-хімічних закономірностей формування заданої структури агломерату на стадіях підготовки шихти до спікання та оптимізацію механічної обробки спеченця є актуальними для отримання агломерату, стабілізованого за міцністю та крупністю.

#### 1.4 Оцінка ефективності сучасних способів підготовки агломераційної шихти

Підготовка агломераційної шихти є важливим етапом, під час якого формуються умови для спікання та характеристики якості спеченого агломерату.

Значною проблемою цього етапу є складність у забезпеченні однорідності шихти в мікрооб'ємах та по висоті шару. Під час аналізу літератури значну увагу було приділено способам, спрямованим на вирішення цієї проблеми.

Запропоновано зміну режиму зволоження шихти [64], шляхом подачі 40 % вологи у барабан-змішувач, а її залишку – на першій третині барабана-грудкувача методом розпилення.

Цей спосіб розрахований на більш рівномірне зволоження компонентів, проте недостатньо враховує взаємодію різних компонентів між собою та їх різницю у крупності.

Важливим напрямком покращення умов підготовки шихти, як показав літературний аналіз, стала роздільна підготовка її компонентів, представлена в публікаціях у різних варіаціях.

Розглянуто схему селективної грануляції агломераційної шихти, яка передбачає відсів частини твердих центрів грудкування (кусочки руди, звороту, флюсу та палива крупністю більше 1 мм), гранулювання компонентів

фракцією 0-1 мм та подальше змішування з відсіяними компонентами [55]. Це дозволяє зменшити вміст у шихті гранул більше 6 мм, через відсутнє переважне гранулоутворення навколо крупних часток, знизити оптимальну величину зволоження, покращити продуктивність та якість агломерату при незначному зменшенні витрати твердого палива.

У роботі [65] запропоновано спосіб двостадійної технології грануляції, в якому 70% шихти зволожували з надлишком та гранулювали в малому барабані, після чого на неї накочували залишкову шихту, що позитивно впливало на гранулометричний склад отриманих гранул і їх зволоження.

У роботах [66-71] автори стверджують, що процес утворення гранул в барабані суттєво покращується без додавання у початкову шихту палива.

У роботі [72] зроблено висновок, що підвищити пористість і газопроникність шару шихти можливо в спеціальному барабані-грудкувачі, в першій частині робочого простору якого утворюються зародки гранул крупністю 2-2,6 мм, а у другій частині вже здійснюється накат усієї іншої шихти на поверхню зародків, що призводить до збільшення крупності і міцності гранул.

Ці способи позитивно сприяють на процес утворення гранул, проте не враховуються в максимальній мірі усі фактори, які впливають на взаємодію компонентів з різними поверхневими властивостями та крупністю між собою під час зволоження та грудкування.

У роботі [73] розроблена технологія спікання агломерату з подачею додаткового флюсу в нижній шар спікання. Це дозволяє отримувати шихту основністю: 0.98 - у нижньому шарі, 2.4 – у верхньому, що сприяє утворенню залізокальцієвих олівінів і феритів кальцію. Перевагами цього способу підготовки над роздільною підготовкою є те, що він не потребує додаткового тракту грудкування. Проте, він не дозволяє реалізувати оптимальні умови взаємодії компонентів між собою та з вологою, що впливає на рівномірність крупності гранул.

Поєднання найкращих якостей агломерату та обкотишів намагалися



досягти розробкою гібридного гранульованого агломераційного процесу (HPS) [74-75]. У ньому всю сировину змішують і перетворюють в грануляторі на гранули крупністю 5–10 мм. Потім на них накочують паливо крупністю менше 0,125 мм і відправляють отриману шихту на попередню сушку, яка дозволяє зберегти отриману форму перед спіканням. Збільшення крупності гранул призводить до погіршення показників процесу та не дозволяє сформулювати необхідну мінералогічну структуру в усьому шарі матеріалу.

Однак недоліками цього процесу є відсутність достатньої кількості контактних зв'язків через сферичну форму отриманих матеріалів, а також обмежені можливості використання дрібного концентрату у вихідній шихті.

Значної уваги потребує розроблений процес спікання агломерату з композитів (the composite agglomeration process - CAP) [76-78]. Автори пропонують частину або всі дрібні залізозмісні матеріали окремо гранулювати до крупності 8–16 мм у кульовому млині або барабані, а решту дрібнозернистих та всіх крупнозернистих матеріалів гранулювати після першого змішування із зворотом, паливом та флюсами.

Після цього два роздільно гранульовані композити піддаються вторинному змішуванню, і вторинна суміш завантажується на стрічку спікання. Ця технологія може дозволити отримувати композитний агломерат, в якому основний шар накладається на кислотні гранули.

Дослідження показали, що новий процес має низку переваг перед традиційною підготовкою шихти: ефективне використання концентрату та залізної руди; значне поліпшення газопроникності шару шихти; збільшення продуктивності машини для спікання; незначне споживання енергії.

Однак розділення агломераційної шихти з метою забезпечення оптимальних умов формування гранул заданої крупності та однородності, і формування компонентів високої міцності – потребує подальшого дослідження.

Наведені результати досліджень дають можливість припустити, що використання роздільної підготовки шихти може сприяти як і покращенню

процесів утворення гранул, так і можливості впливати на фазовий склад агломерату. Цього можна досягти шляхом формування із усіх компонентів композиту та залишкової шихти оптимального складу та властивостей.

### 1.5 Оцінка особливостей процесів руйнування спеченого агломерату в різних агрегатах механічної обробки

Спечений агломерат підлягає механічній обробці для надання йому властивостей, необхідних при використанні в доменній печі. Цей технологічний етап має дозволити не лише запобігти потраплянню дріб'язку в доменну піч, а й значному її утворенню в ній під дією зовнішніх сил в самій печі.

Причини руйнування агломерату під дією зовнішніх сил:

1. Виникнення напруженого стану в кусках під час спікання та охолодження.
2. Неоднорідність складу агломерату.
3. Наявність неспечених компонентів.
4. Наявність пор.
5. Зародження і розвиток тріщин навколо пор.
6. Обмеження показників міцності усіх складових агломерату.
7. Однотипність навантажень, діючих на агломерат.
8. Необмежена величина енергії навантаження.

Літературний аналіз [18] дозволив виділити оптимальні умови для руйнування агломерату з метою його стабілізації за крупністю, міцністю та хімічним складом:

1. Спільна дія сил удару, стирання та розколювання.

2. Енергія навантаження на агломерат в 60-100 Дж/кг з подальшим зменшенням цієї величини по ходу механічної обробки.
3. Перехід від переважних сил удару з метою виділення міцних блоків до сил стирання, з метою надання кускам необхідної округлої форми.

Значну увагу в роботі приділено агрегатам, які використовуються для руйнування агломерату.

Недоліком використання дробарок, як зазначалося, є відсутність можливості контролю необхідної величини навантаження, прикладеного до агломерату, та переважна однотипність діючих сил руйнування [1; 79]. Це призводить до подрібнення кусків з утворенням значної кількості дріб'язку, а не ефективного виділення зі спеченця міцної складової.

В цих умовах все більше досліджень присвячується проблемі зниження однотипних навантажень в дробарках на агломерат [80].

Відоме використання для стабілізації гранулометричного складу агломерату барабанного грохоту [81]. Він являє собою металевий циліндр із вікнами по діаметру з закріпленими в них решітчастими секціями з прутків круглого перетину, установлених паралельно подовжньої осі з зазором 6 мм. При обертанні барабанного грохоту куски агломерату, перекочуючись з підйомом по внутрішній поверхні, руйнуються, а дріб'язок класу відсівається через решітчасті секції і направляється в агломераційну шихту для утилізації при спіканні. Агломерат, що залишається на решітці грохота направляється в доменний цех. Вміст дріб'язку 0-5мм в такому агломераті знаходиться в межах 13,5-22,5%.

Істотним недоліком барабанного грохоту такої конструкції є однотипність характеру навантаження на матеріал під час знаходження в барабані, яка не дозволяє забезпечити необхідні ударні навантаження та одержати стабілізований за гранулометричним складом та міцністю агломерат з мінімальним вмістом дріб'язку 0-5 мм. Сучасні грохоти виконують лише відсів дріб'язку, що не дозволяє у повній мірі реалізувати внутрішні

напруження у кусках і стабілізувати склад і крупність агломерату.

Використання після зубчатої дробарки, де агломерат дробиться до крупності 100-150 мм, барабана-стабілізатора, робочий простір якого обладнано певною кількістю полиць [82-83], дозволяє проводити механічну обробку агломерату із забезпеченням водночас різних сил навантаження (удару, стирання та розколювання). Механічна обробка здійснюється при взаємодії кусків різної форми та крупності, що рухаються за своїми траєкторіями.

Стабілізатор включає в себе барабан із приводом для обертання, бандажі, опорні і упорні ролики, завантажувальну лінійку, розвантажувальну камеру, на внутрішній поверхні барабана рівнобіжними відносно його подовжньої осі рядами встановлені полки, висота яких з боку завантаження складає 0,01-0,10, а з боку розвантажувальної камери - 0,15-0,2 діаметра барабана.

Після попереднього руйнування куски агломерату крупністю 0-100 мм надходять через завантажувальну лійку в обертовий від привода барабан. У барабані вони полками підіймаються на визначений кут, і падаючи з них у верхній точці кута підйому, вдаряються об нижче розміщені полки, що призводить до їх руйнування на більш дрібні куски зі збільшенням об'єму маси. Об'єм зруйнованого агломерату в міру просування його у бік розвантажувальної камери повністю заповнює простір між полками і внутрішньою поверхнею барабана, що дозволяє по всьому шляху руху агломерату мати постійну роботу його руйнування. Відбувається стабілізація агломерату з видаленням гострих виступів та міжпорових перегородок, зміна геометрії куска, що забезпечує високу ефективність роботи вузла просівання.

Одночасно зі стабілізацією агломерату відбувається його охолодження за рахунок інтенсивного відбору тепла від корпусу барабана 1 при зрошенні його водою з форсунок, розташованих між кільцевими ребрами на зовнішній поверхні барабана.

Істотним недоліком цього пристрою є відсутність достатнього

аргументування вибору конструкційних і технологічних параметрів його роботи, що не дозволяє ефективно керувати механізмом стабілізації агломерату. Згідно існуючих моделей, полиці, обладнані в робочому просторі, збільшуються за шириною від зони завантаження пристрою до його зони розвантаження, що сприяє збільшенню діючих сил на агломерат по ходу механічної обробки.

Для вирішення проблеми зменшення навантаження на агломерат в барабані-стабілізаторі розроблений пристрій [84], полиці в якому мають трапецеїдальну форму із зазором між собою. Однак така форма полиць не забезпечує рівномірного поступового зменшення діючих сил від 100 Дж/кг до 30-40 Дж/кг.

Подальше удосконалення технологічних умов роботи і конструкції пристрою може дозволити створити в робочому просторі оптимальні умови механічної обробки агломерату.

## 1.6 Висновки по першому розділу

1. На основі літературних даних показано, що отримання якісного агломерату, стабілізованого за крупністю та міцністю, є комплексною задачею, вирішення якої включає формування блокової структури з оптимальним мінералогічним складом міжблокової зв'язки на етапі підготовки шихти до спікання та ефективний спосіб механічної обробки спеченця.

2. Використання роздільної підготовки шихти може сприяти як і покращенню процесів утворення гранул, так і можливості впливати на фазовий склад агломерату. Цього можна досягти шляхом формування із усіх компонентів композиту та залишкової шихти оптимального складу та властивостей.

3. Використання після зубчатої дробарки, де агломерат дробиться до крупності 100-150 мм, барабана-стабілізатора, робочий простір якого обладнано певною кількістю полиць, дозволяє проводити механічну обробку агломерату із забезпеченням водночас різних сил навантаження (удару, стирання та розколювання). Удосконалення технологічних умов роботи і конструкції пристрою може дозволити створити в робочому просторі оптимальні умови механічної обробки агломерату.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ АГЛОМЕРАТУ ЗАДАНОГО СКЛАДУ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ

#### 2.1 Дослідження вірогідної можливості формування агломерату заданого фазового складу

Фазовий склад спеченого агломерату в значній мірі обумовлює його міцність. Для вивчення можливостей його формування з метою підвищення якості агломерату, важливо оцінити вірогідність утворення різних мінералів під час спікання та вплив на неї різних технологічних факторів.

За допомогою програмного комплексу HSC 5.1 [85] проведено термодинамічний аналіз вірогідності реакцій утворення різних мінералів в семикомпонентній системі (Fe, Si, Ca, Mg, Al, O, C), яка відповідає в цілому складу шихти для спікання агломерату, шляхом оцінки величини відносної зміни термодинамічних показників: вільної енергії Гіббса – величини, що показує зміну енергії в ході хімічної реакції і дає відповідь на питання про можливість її протікання; та ентальпії - кількості теплоти енергії, необхідної для протікання реакції при певних температурах [86-87].

Розрахунок проводили наступним чином:

- після запуску програми необхідно скористатися розділом «Reaction Equations» (рис. 2.1). У вікні, що відкрилося, потрібно ввести формулу хімічної реакції в поле «Reaction Equaton or Chemical Formula» (рис.2.2);

- у полі «Temperature» необхідно зазначити діапазон температур для якого хочемо отримати результат та крок розбиття цього інтервалу. Одиниці вимірювання температури обираються в «Temperature Units», а енергетичні одиниці розрахунку - в «Energy Units»;

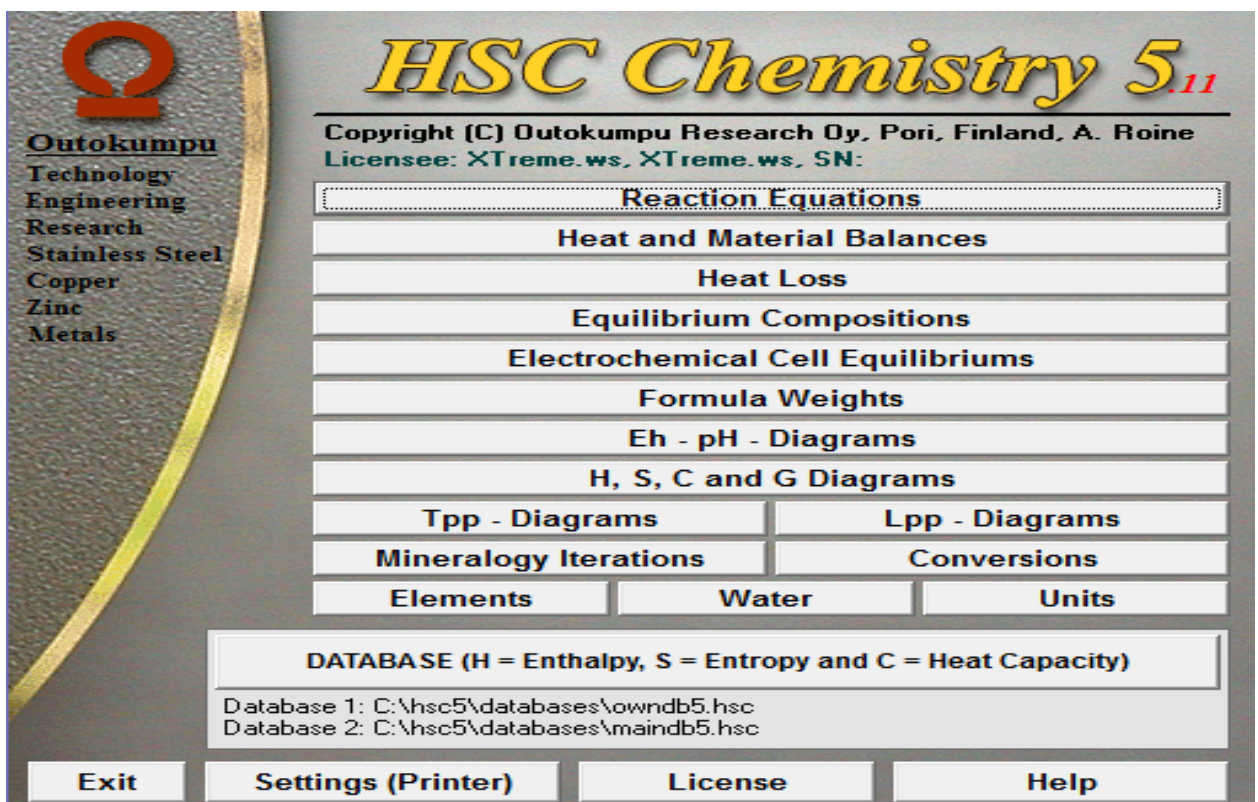


Рис.2.1 – Стартове вікно програми

- при натисканні кнопки «Calculate» програма відкриє вікно з результатами розрахунку, які переносили у таблицю в програмі «Excel» для побудови графічних залежностей.

Результати термодинамічного аналізу вірогідності реакцій утворення різних мінералів при спіканні агломерату представлені на рис. 2.3.

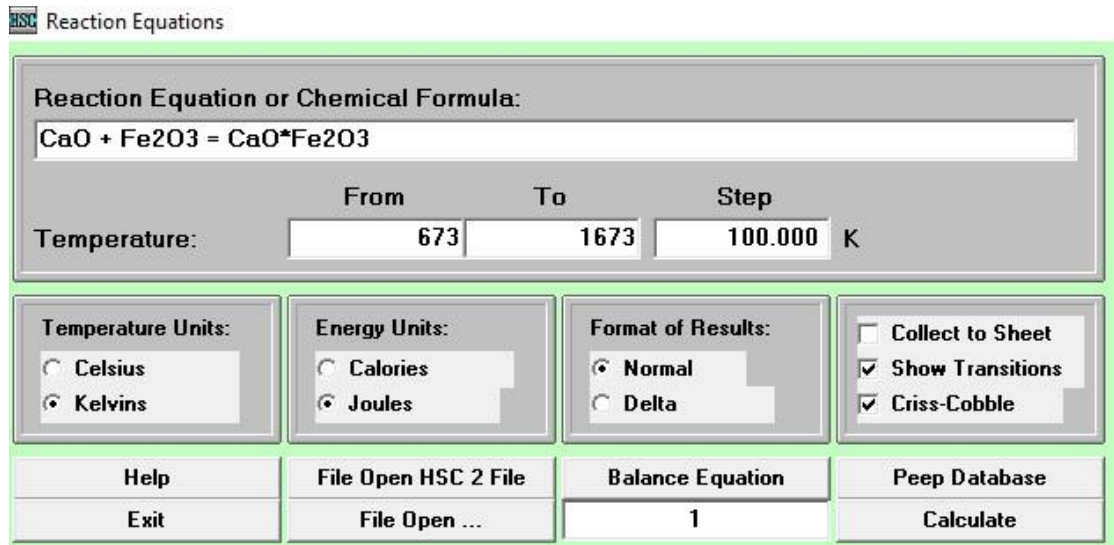
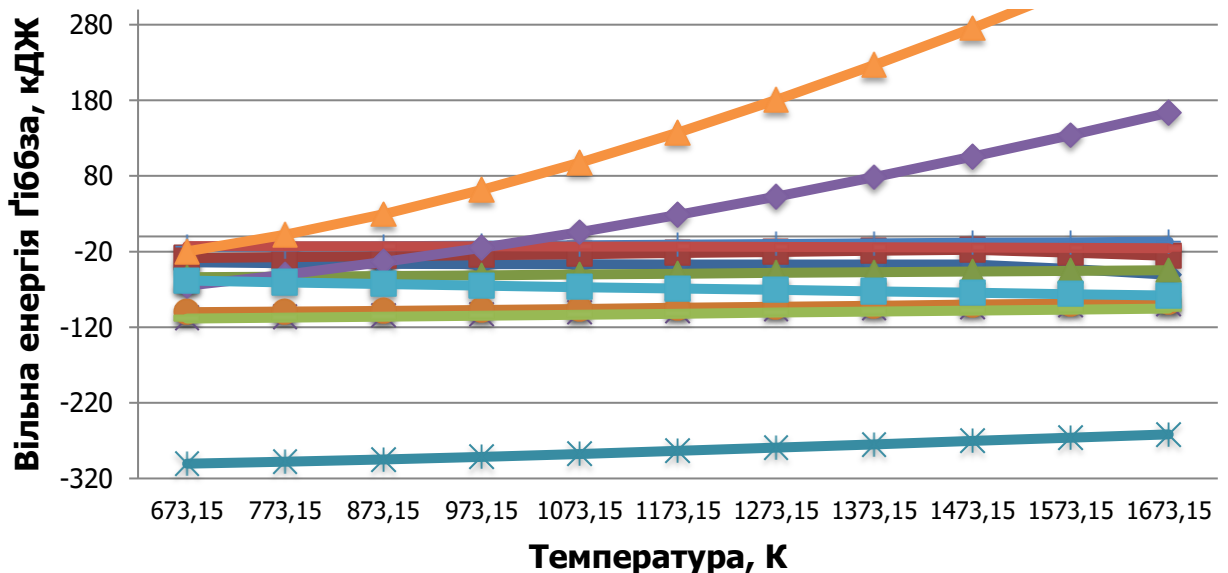
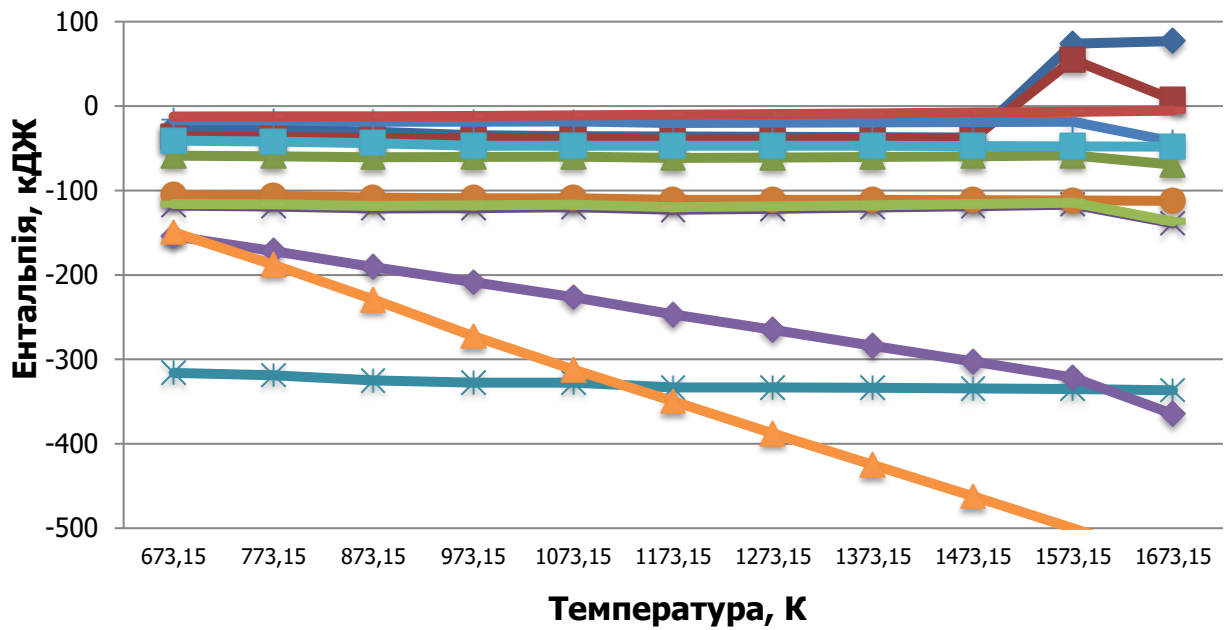


Рис.2.2 – Вікно для введення вихідних даних розрахунку



A)





Б)



Рисунок 2.3 – Залежність величин енергії Гіббса (А) й ентальпії (Б) в семикомпонентній системі від температури

На рис. 2.3а наведена залежність величин вільної енергії Гіббса від температури. Вона показала вірогідність утворення в даному середовищі зв'язки з фаяліту, деяких залізо-кальцієвих олівінів і феритів кальцію.

Як показало дослідження ентальпії (рис. 2.3б), утворення усіх мінералів характеризується екзотермічним ефектом. Лише в діапазоні температур 1473-1673 К формування 2FeOSiO<sub>2</sub> та однокальцієвого фериту відбувається в ендотермічних умовах.

Шляхом розрахунку в програмному комплексі HSC 5.1 проведений аналіз залежності фазового складу агломерату від температури, отриманого для шихти, основністю 0.9 од., 1.3 од., 1.7 од..

Розрахунок проводили наступним чином:

- після запуску програми необхідно скористатися розділом «Equilibrium Composition». У вікні, що відкрилося (рис. 2.4), натискаємо клавішу «Create new Input File (give Elements)»;

- у новому вікні обираємо необхідні хімічні елементи, які присутні в агломераційній шихті та братимуть участь у реакціях під час спікання (рис.2.5);

- у вікні (рис. 2.6) серед запропонованих варіантів можливих сполук обираємо ті, які можуть сформувати мінералогічних склад зв'язки агломерату.

- розраховуємо склад шихти таким чином, щоб отримати основність у межах 0.9, 1.3, 1.7 од..

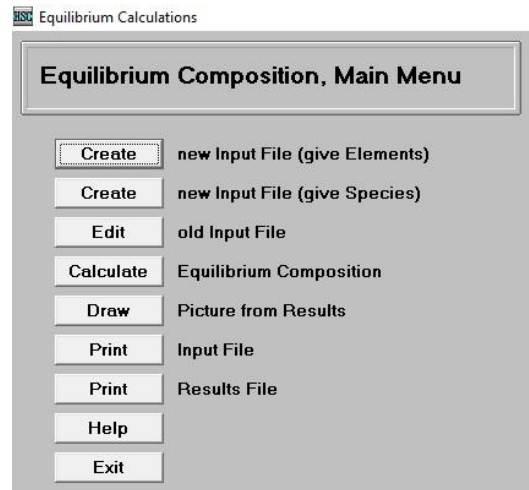


Рис. 2.4 – Вікно вибору задачі

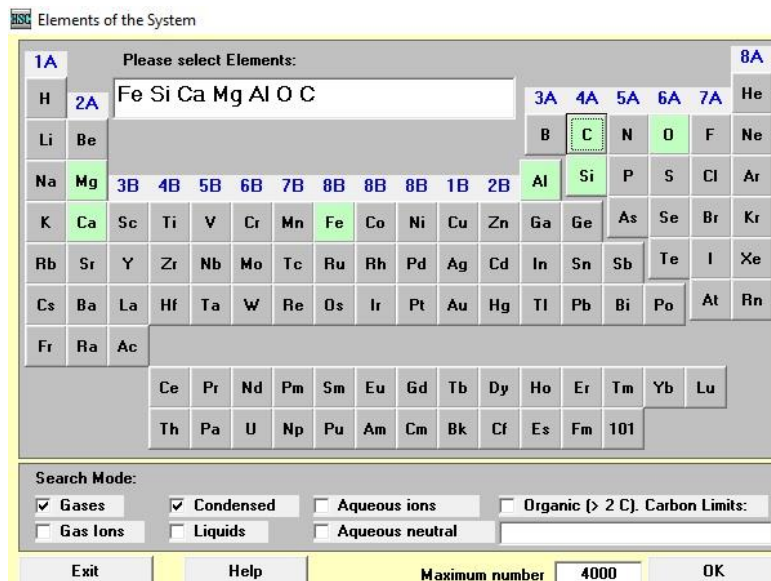


Рис. 2.5 – Вікно вибору хімічних елементів, котрі беруть участь у реакціях в системі

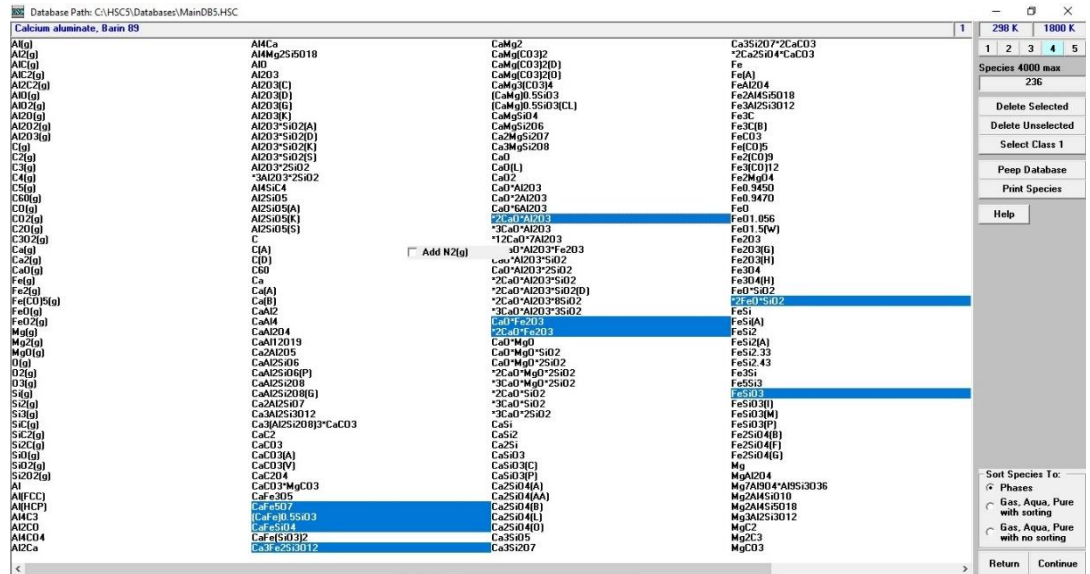
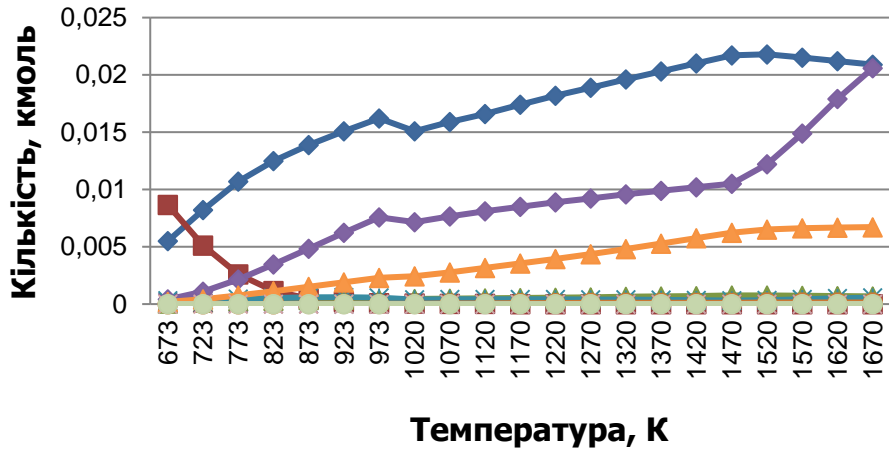


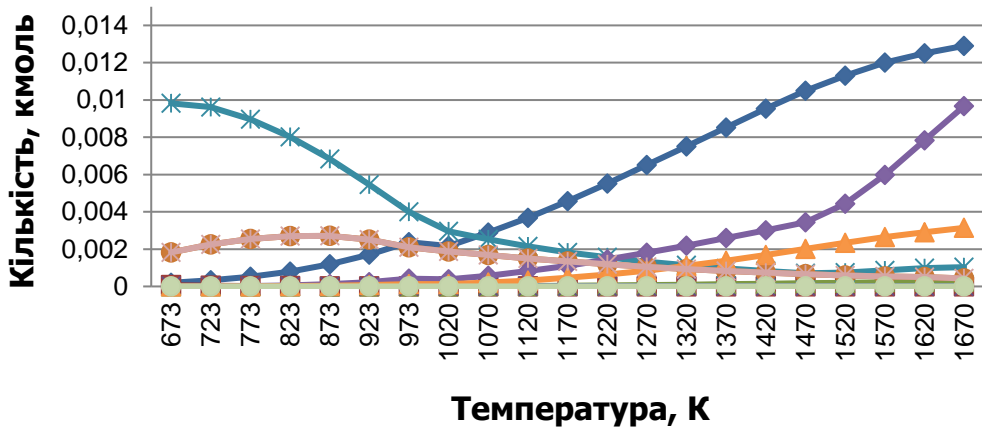
Рис. 2.6 – Вікно вибору можливих складових зв'язки агломерату

Отримані результати представлені на рис. 2.7.

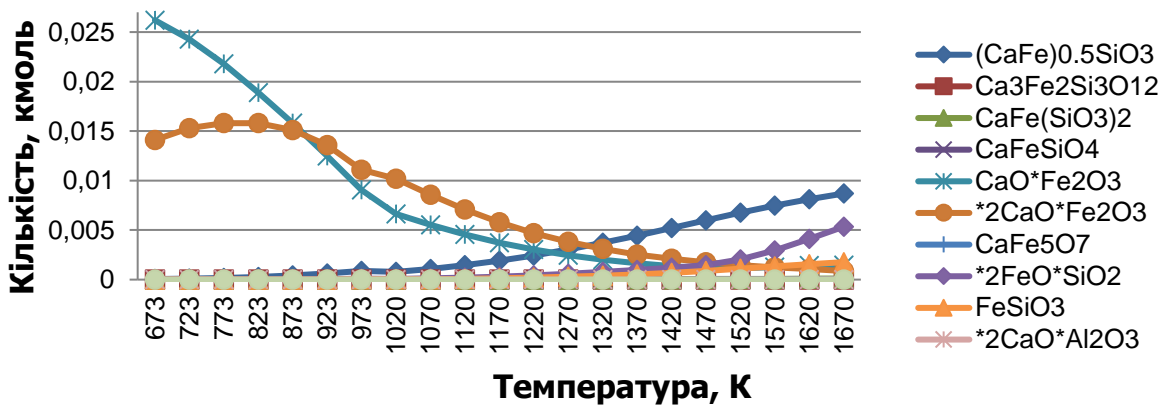
У заданій системі за даних умов основності міжблокова зв'язка представлена в основному залізокальцієвим олівіном ( $\text{CaO}_{0.5}\text{FeO}_{1.5}\text{SiO}_2$ ), фаялітом ( $2\text{FeOSiO}_2$  та  $\text{FeSiO}_3$ ) та феритами кальцію ( $\text{CaOFe}_2\text{O}_3$  та  $2\text{CaOFe}_2\text{O}_3$ ). Зростання температури в реакційній зоні позитивно впливає на утворення олівінів та фаяліту, сприяє стрімкому розкладанню однокальцієвого фериту та спершу збільшенню кількості двокальцієвого фериту, а після - плавному її зменшенню.



А)

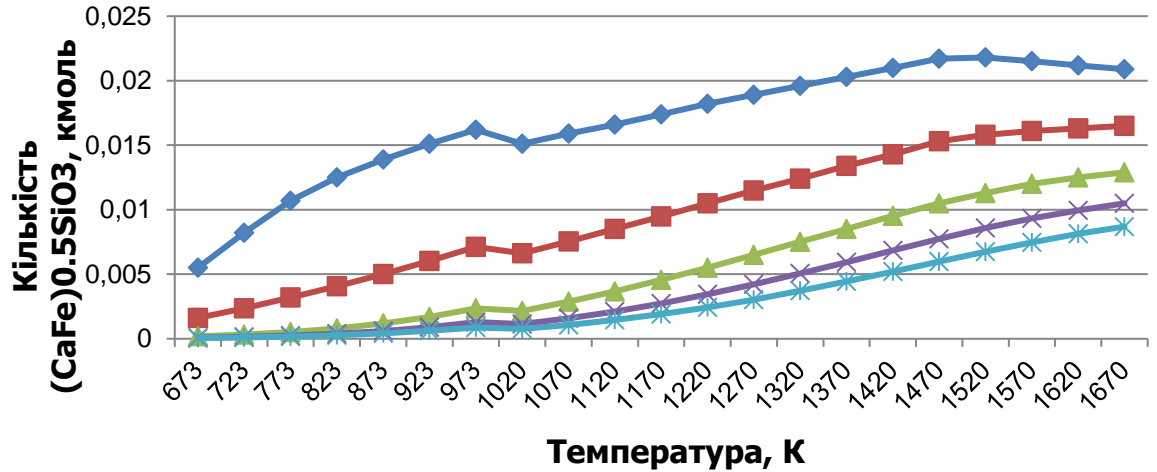


Б)

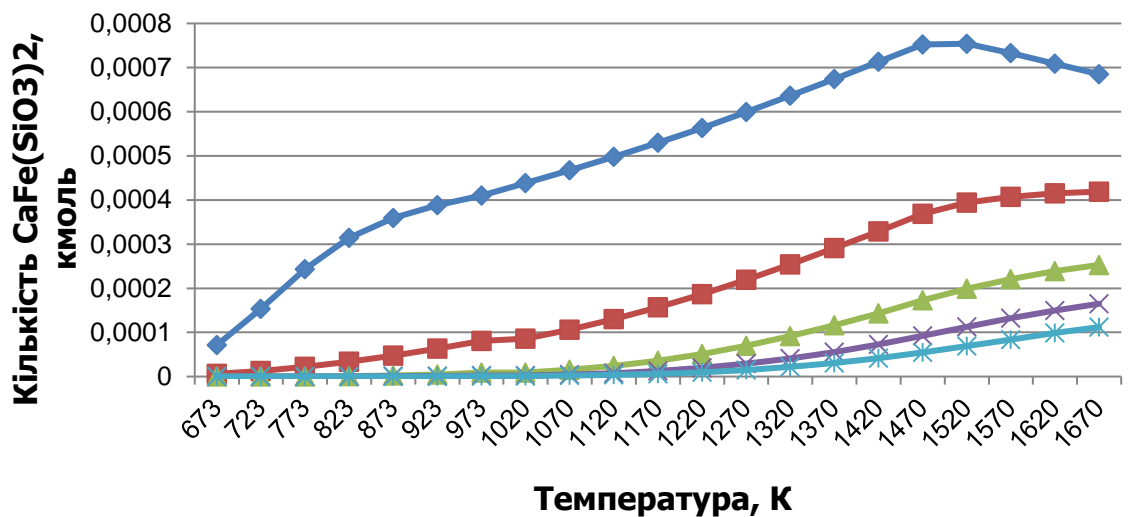


В)

Рис. 2.7 - Залежність фазового складу семикомпонентної системи при різних показниках основності та температури



А)



Б)

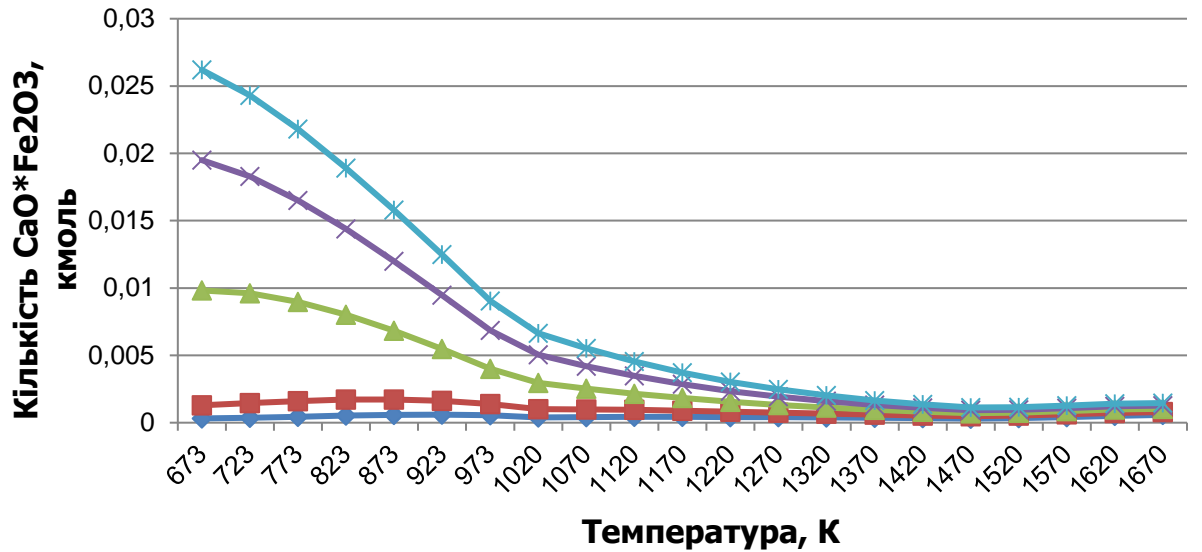
—◆— Основність 0.9 од.    —■— Основність 1.1 од.    —▲— Основність 1.3 од.  
 —×— Основність 1.5 од.    —\*— Основність 1.7 од.

Рис. 2.8 - Залежність формування залізокальцієвих олівінів від основності та температури

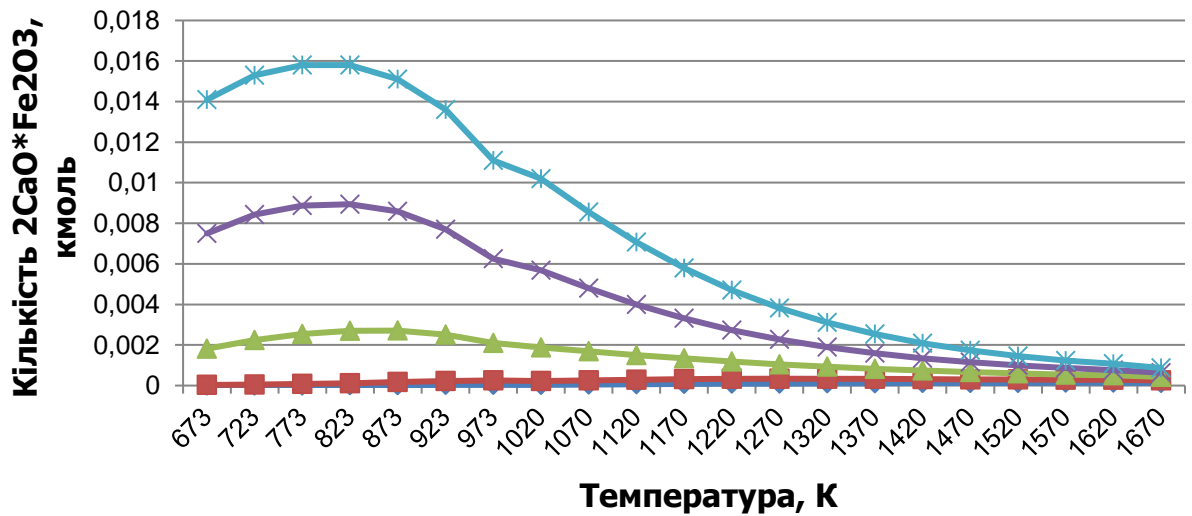
На основі фазового аналізу в програмі HSC 5.1 виконано дослідження впливу основності системи на кількість утворених в ній залізокальцієвих олівінів та феритів кальцію. Методика розрахунку відповідна тій, де досліджувався мінералогічний склад зв'язки, тільки замість усіх можливих компонентів були обрані ферити та олівіни, а діапазон зміни основності

обраний від 0.9 до 1.7, з кроком 0.2 од..

Результати представлені на рисунках 2.8-2.9.



А)



Б)

◆ Основність 0.9 од. ■ Основність 1.1 од. ▲ Основність 1.3 од.  
 ✕ Основність 1.5 од. \* Основність 1.7 од.

Рис. 2.9 - Залежність формування феритів кальцію від основності та температури

Розрахунки підтвердили, що саме основність шихти в значній мірі впливає на фазовий склад агломерату та вміст у ньому міцних зв'язуючих компонентів: залізокальцієвих олівінів та феритів кальцію. З графіків видно,

що кількість олівінів ( $\text{CaO}_{0.5}\text{FeO}_{1.5}\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaOFeOSiO}_2$ ) збільшується при зменшенні основності шихти до рівня 0.9-1.0 од.. Поява феритів кальцію ( $\text{CaOFe}_2\text{O}_3$  та  $2\text{CaOFe}_2\text{O}_3$ ) у значній кількості потребує, в свою чергу, збільшення основності до рівня 1.6-1.7 од..

Також в програмі HSC 5.1 проведено розрахункове дослідження впливу кількості вуглецю в заданій системі на утворення олівінів та феритів кальцію. Зміна його вмісту в межах 5-8% при незмінному вмісті інших компонентів не призводить до суттєвого впливу на вміст олівінів та феритів. Це дозволяє використовувати його винятково у кількості, яка забезпечить оптимальний тепловий баланс процесу спікання.

Теоретичний аналіз залежності фазового складу агломерату від різних факторів привів до висновку, що формування блокової структури з міцною міжблоковою зв'язкою можливе шляхом роздільної підготовки шихти основністю 0.9-1.0 та 1.6-1.7 од.. Цього можна досягти роздільним формуванням з агломераційної шихти композиту (суміші декількох компонентів шихти, яка грудкується окремо з метою покращення взаємодії компонентів між собою та вологою) та залишкової шихти заданого складу, який відповідатиме цим показникам основності, та властивостей.

## 2.2 Вплив капілярних явищ різних компонентів шихти у складі композитів на процес формування гранул

Гранулометричний склад агломераційної шихти є важливим фактором, який впливає на її газопроникність. Застосування роздільної підготовки шихти з використанням композитів має забезпечити не лише можливість формування агломерату заданого фазового складу, а й сирих гранул, рівномірних за крупністю та хімічним складом.

Як згадувалося раніше, наявність в агломераційній шихті матеріалів різного речового складу та крупності призводить до порушення процесів змішування та грудкування. Оскільки процес грудкування тонкодисперсних

матеріалів визначається силами взаємодії вологи з поверхнями твердих часточок компонентів шихти, то, дослідивши цю взаємодію для різних матеріалів і їх сумішей, можна досягти покращення процесу утворення гранул.

Капілярні сили є основними, котрі забезпечують зчеплення зерен у вологому сипучому матеріалі [88-89]. Їх виникнення пов'язане з утворенням в точках контактів окремих часточок матеріалу прошарків води кільцевої форми. Характер капілярної взаємодії в шарі сипучих матеріалів визначається їх властивостями, кількістю води у точці контакту, формою контакту та їх кількістю в одиниці об'єму матеріалів [28] .

Відповідно до літературних даних, для дослідження способів підготовки агломераційної шихти з використанням попередньо підготовлених композитів, першочерговою задачею стало вивчення особливості впливу вологи на процеси грудкування шихти з різними композитами на основі концентрату [90] .

Компоненти шихти попередньо подрібнювали до фракції 40-63 мікрон, щоб унеможливити вплив їхньої крупності на капілярні явища. Порівняльним показником ефективності взаємодії різних компонентів з вологою прийняли висоту капілярного просочування (рис.2.10), вміст вологи в суміші (рис. 2.11) та її насипну масу (рис.2.12).

Капілярні явища досліджувалася у сумішах на основі з концентратом (К) із використанням залізної руди (Р), звороту (З), вапняку (Вк):

- двокомпонентних: К-Р, К-З, К-Вк;
- багатокомпонентних: К-Р-Вк, К-З-Вк, К-Р-З, К-Р-З-Вк.

Об'ємне співвідношення компонентів в сумішах змінювалося. Матеріали декілька разів промивалися дистильованою водою, після чого висушувалися.

Пропитку здійснювали в трубках діаметром 10 мм. Кожне дослідження проводили двічі. При виникненні розходження даних більш ніж на 2%, експеримент повторювали.



В усіх досліджуваних системах чітко проявляється неоднозначна зміна висоти капілярного просочування та в питомому вмісті вологи в окремих композитах різного складу. Такий характер змін можна пояснити нестабільністю поверхневих властивостей матеріалів в композиті та його складу, зміною ефективного радіуса капіляра та іншими факторами.

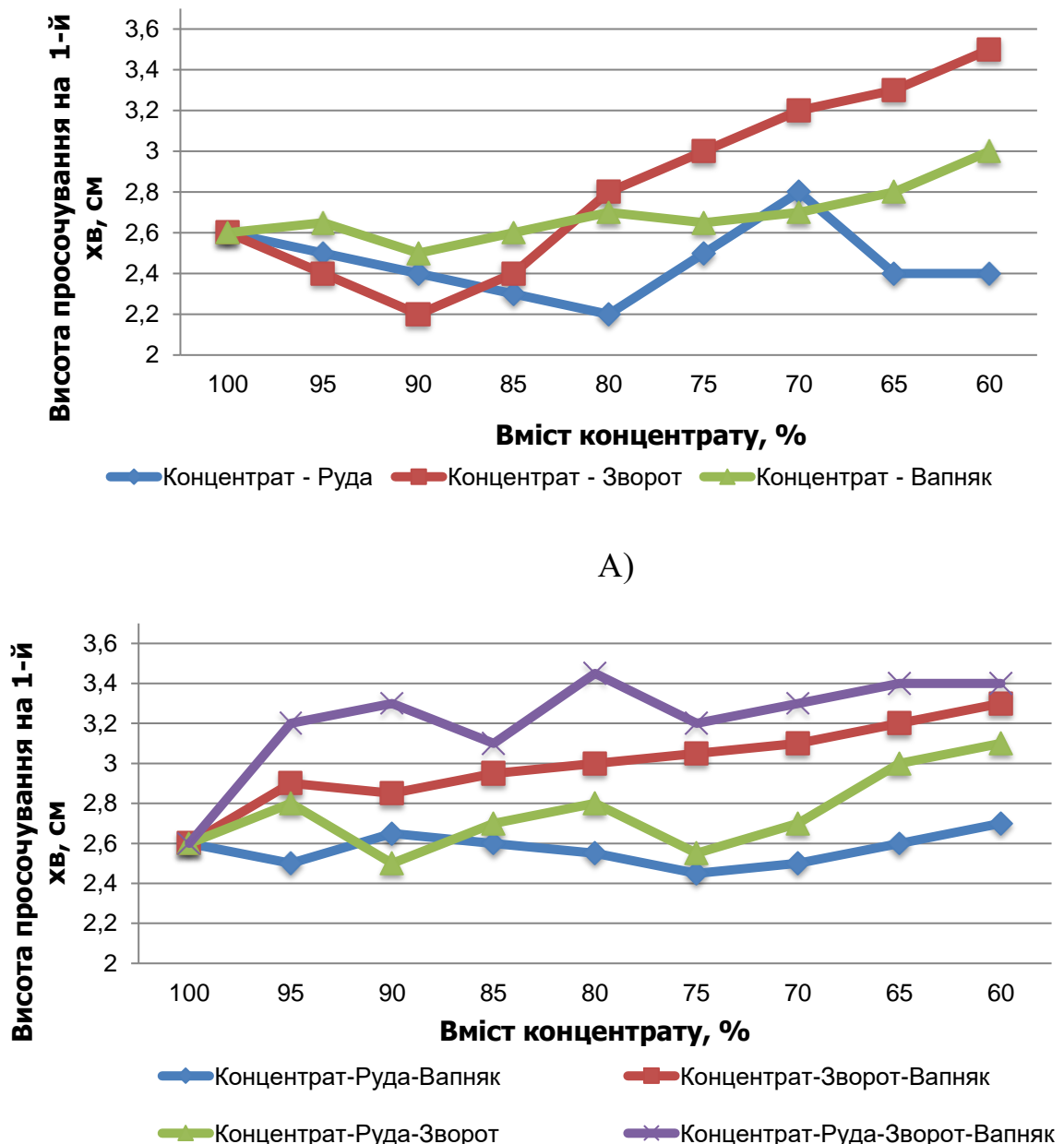
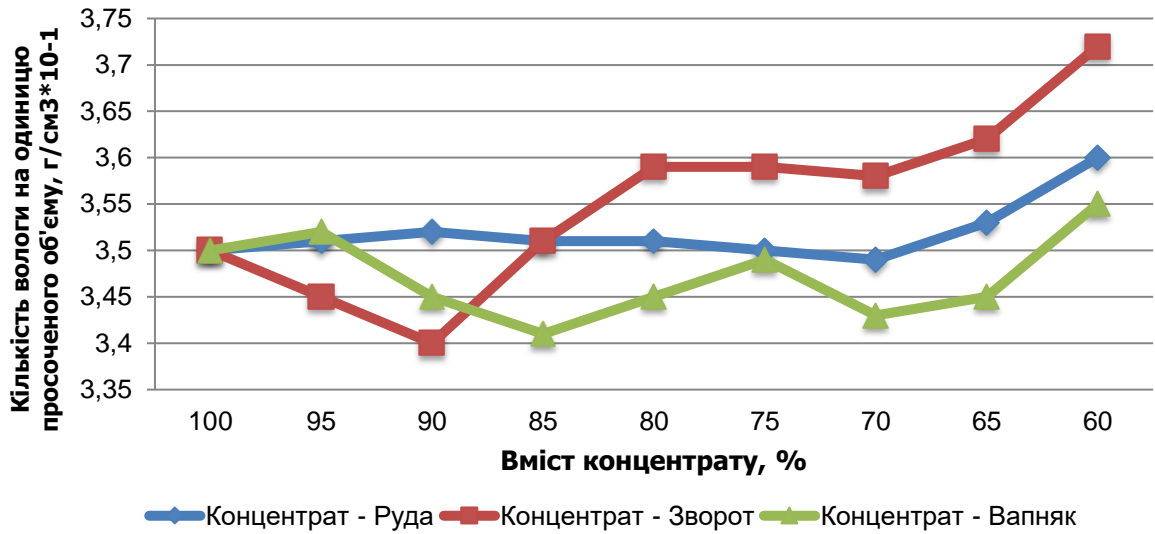
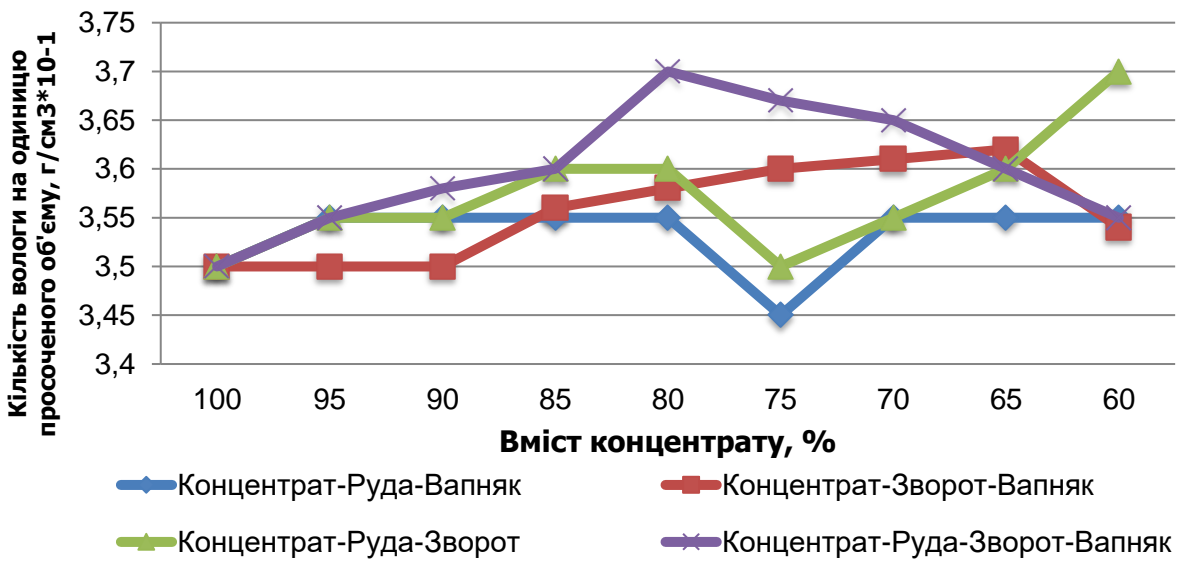


Рис. 2.10 – Вплив складу композиту на висоту просочування

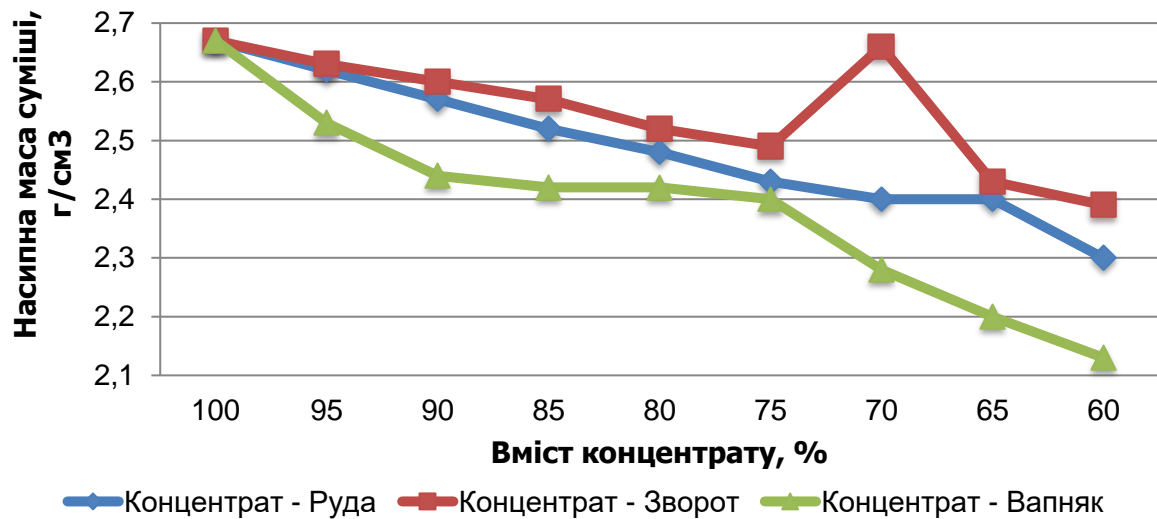


A)

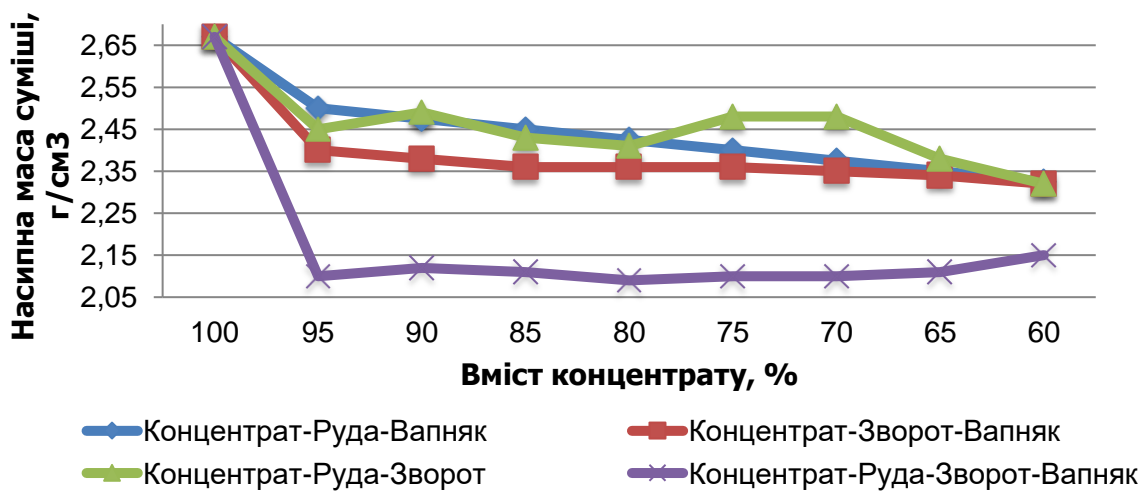


B)

Рис. 2.11 – Вплив складу композиту на кількість вологи на одиницю просоченого об'єму



А)



Б)

Рис. 2.12 – Вплив складу композиту на насипну масу суміші

Дослідження капілярних явищ показали, що вид та склад композиту в значній мірі впливають як на кінетику капілярних явищ, так і на процеси грудкування шихти. Попри наявність аномальних результатів, підбір окремих шихтових матеріалів з різними властивостями поверхні та здатності до взаємодії з вологою, мають ключове значення у процесах гранулоутворення.

Використання у композиті звороту в значній мірі підвищує його здатність до взаємодії з водою. Додавання у систему вапняку призводить до незначного поліпшення взаємодії суміші з вологою.

Серед багатокomпонентних сумішей найкращі за рівномірністю

показники просочування вологи належать композиту з концентрату, руди та вапняку, в результаті використання якого отримуємо усереднене значення висоти просочування – 2.5-3.1 см, що спричинене взаємодією компонентів з різною активністю поверхневих властивостей.

Це дозволяє обґрунтувати ефективність застосування роздільної підготовки шихти, завдяки якій будуть створені умови формування гранул не лише навколо крупних кусків руди та звороту, а й під час взаємодії між собою дрібних компонентів з активними поверхневими властивостями.

Слід зазначити, що проведений аналіз процесу грудкування не враховує вихідний гранулометричний склад компонентів шихти, який здатний внести суттєві корективи в отримані закономірності.

### 2.3 Дослідження впливу роздільної підготовки шихти з використанням композитів різного складу на якість сирих гранул і агломерату

Проведено дослідження впливу підготовки агломераційної шихти у натуральну величину з використанням попередньо підготовлених композитів на показники спікання та якість агломерату [91-92].

Для цього з компонентів агломераційної шихти, хімічний склад яких представлений у табл. 2.1, попередньо виготовляли дво-, три- та чотирикомпонентні композити на основі концентрату, до яких потім додавали залишкові компоненти шихти для остаточного грудкування.

Склад та умовне позначення композитів, який розраховувався на отримання основності шихти ( $\text{CaO/SiO}_2$ ) = 1,27 од., представлено у табл. 2.2. Сумарна витрата води на кожне спікання становила 9% від загальної маси шихти.

Підготовка до базового спікання проходила наступним чином: матеріали зважували відповідно до розрахунку шихти, після чого змішували, зволожували і грудкували впродовж 1 хвилини. Сирі гранули розсіювали на ситах, з метою визначення гранулометричного складу, та повторно грудкували

впродовж 15 секунд, аби мінімізувати вплив розсіювання на руйнування гранул.

Таблиця 2.1

## Хімічний склад компонентів шихти

Матеріали	Вміст, %							
	Fe <sub>заг.</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	ВПП
Залізорудний концентрат	65,88	28,27	62,71	6,44	0,30	0,17	0,26	1,85
Залізна руда	57,75	1,76	80,54	11,54	1,60	1,65	0,62	1,82
Вапняк звичайний	0,28	-	0,40	1,34	0,56	53,22	0,92	43,56
Зола коксу*	12,66	-	18,09	49,42	26,61	4,48	1,40	-
Вапно	-	-	-	1,17	0,30	87,8	0,65	10,08
Зворот	55,35	12,83	64,49	9,46	1,4	11,38	0,56	

\*Технічний склад коксу: зола – 12,4 %; сірка – 1,07 %; летючі речовини – 1,5 %; волога – 2,2 %.

Таблиця 2.2

## Склад шихти

Склад шихти	Концентрат (К)	Залізна руда (Р)		Зворот (З)	Вапно (Во)	Вапняк (Вк)	Кокс (Кс)	Загалом
		0-3	3-10					
Крупність, мм	0-3	0-3	3-10	0-10	0-3	0-3	0-3	
Маса, %	50	6,5	3,5	25	4	5	6	100

Роздільна підготовка шихти з використанням композитів відрізнялася тим, що спершу зволожували та згрудковували задану суміш, а потім до отриманих гранул додавали інші компоненти, продовжуючи зволоження та

грудкування.

Як і в базовому спіканні, сирі гранули розсіювали на ситах, визначаючи гранулометричний склад та додатково грудкували.

До попередньо підготовленої суміші воду додавали відповідно до її маси. Наприклад, в експерименті, де попередньо грудкували концентрат і руду, маса суміші (К - Р) становила 1200 г (60% від загальної). До неї додавали 108 г води (60% від загальної кількості), а інші 72 г – після введення залишкової частини шихти.

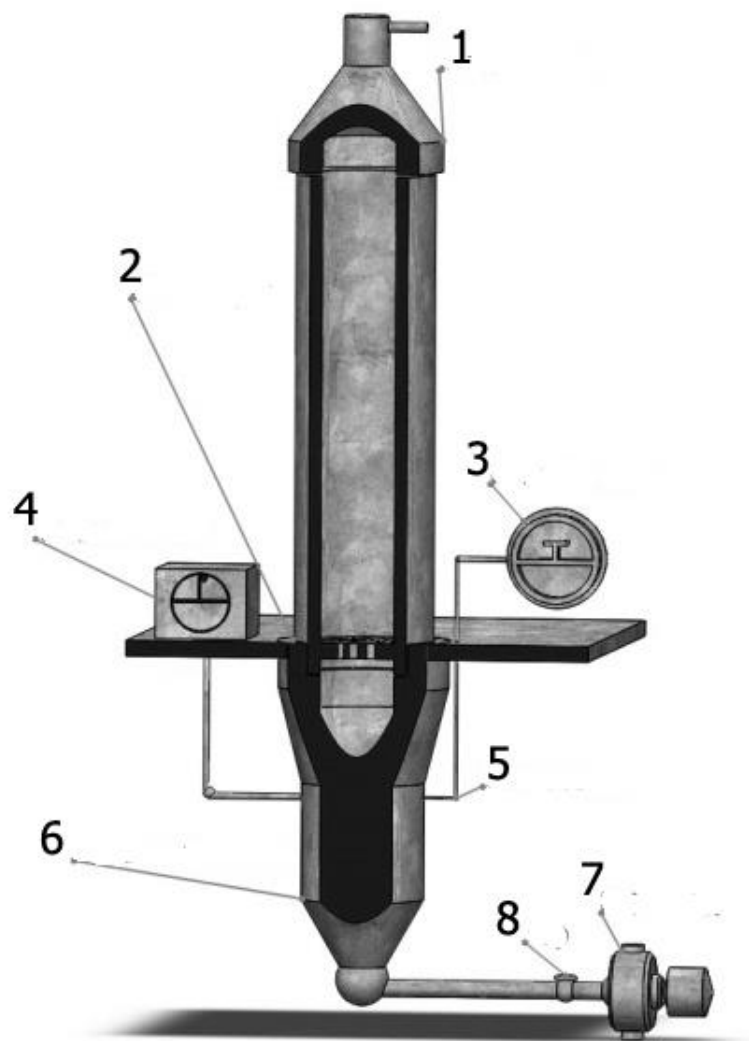


Рис. 2.13 - Схема чаші для спікання:

1 - запальний горн, 2 - агломераційна чаша, 3 – потенціометр, 4 – вакуометр, 5 – термопара, 6 - вакуумна камера, 7 – ексгаустер, 8 – перемикач.

Для оцінки гранулометричного складу сирих гранул їх розділяли на класи крупності за допомогою сит з діаметрами отвору: 1, 3, 5, 7, 10 мм, та зважували кожну окрему фракцію на вагах.

Ефективність підготовки шихти з використанням композитів заданого складу оцінювали за допомогою наступних показників: еквівалентний діаметр, коефіцієнт варіації крупності гранул, середньо-квадратичне відхилення крупності, кількість дріб'язку (фракції 0-1 мм).

Еквівалентний діаметр розраховувався за формулою:

$$D_{\text{екв}} = \sum_{i=1}^N (D_{s i} * n_i) \quad (2.1),$$

де, N – кількість фракцій;

$D_s$  – середній розмір і-ї фракції;

n – вміст і-ї фракції.

Середньо-квадратичне відхилення крупності гранул розраховувалося за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (D_{s i} * n_i - D_{\text{екв}})^2} \quad (2.2)$$

Коефіцієнт варіації крупності гранул розраховувався за формулою:

$$V = \frac{\sigma}{D_{\text{сер}}} \quad (2.3),$$

де  $D_{\text{сер}}$  – середній діаметр агломерату в шихті.

Підготовлена шихта завантажувалася у чашу (рис.2.13) на постіль (200 г звороту, крупністю 7-10 мм). Схема установки на якій проводилися спікання наведена на рис. 2.14.

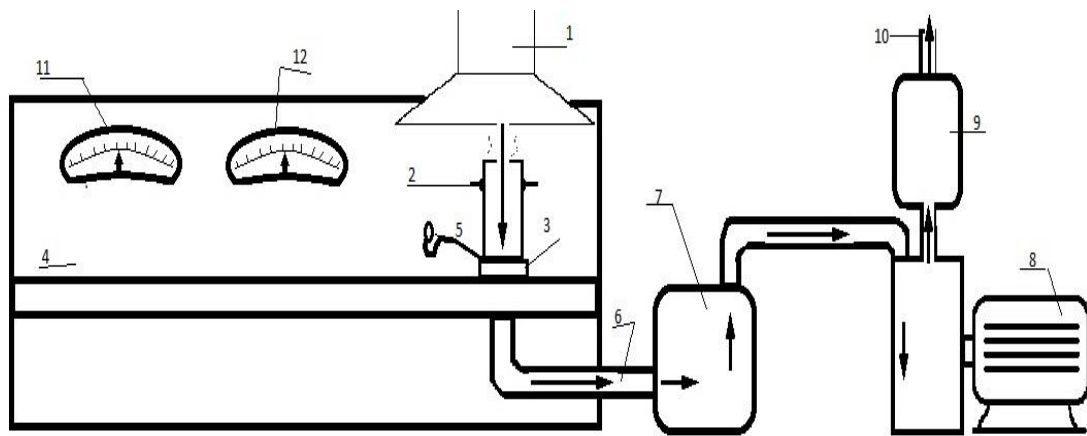


Рис. 2.14 - Схема установки по спіканню залізорудних матеріалів:

1 - витяжка; 2 - агломераційна чаша; 3 - стенд; 4 - стіл; 5 - термопара; 6 - газохід; 7 - відстійник; 8 - водокільцевий насос (ВН-2) з електродвигуном; 9 - скруббер; 10 - свіча; 11 - потенціометр; 12 – вакуумметр

Спікання проводили наступним чином: суцільно закривши поверхню під колосниковою решіткою кришкою, виставляли початкове розрядження на рівень 1000 мм вод. ст.. Після цього знімали кришку та ставили чашу з сирою шихтою. Замірювали висоту слою та швидкість фільтрації. Впродовж 1 хв запалювали шихту температурою 1200 °С. Під час спікання вели контроль температури газів, що відходять, і розрядження під колосниковою решіткою. Спікання завершували тоді, коли температура газів, що відходять, починала знижуватися. При цьому визначали такі показники: час спікання, швидкість спікання, висоту пирога готового агломерату, усадку шару шихти, швидкість фільтрації. По завершенню процесу спікання агломерат вибивали з чаші [93].

Якість спеченого агломерату оцінювали за допомогою показників: вихід придатного агломерату (фракція +10 мм), вихід агломерату після випробування на міцність (фракції +5 мм) і вміст у ньому фракції 0-5 мм.



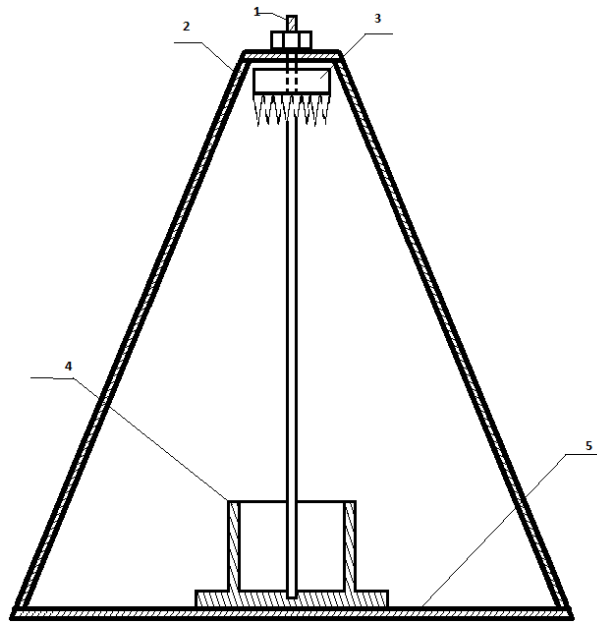


Рис. 2.15 - Пристрій для випробування агломерату на міцність:  
1 – шток, 2 – штатив, 3 – циліндрична гиря з зубцями, 4 - чаша для випробувального агломерату.

Для визначення показників міцності агломерату використовувалася нестандартна методика. З придатного агломерату відбиралася проба масою 1 кг, яка завантажувалася у спеціальну чашу, рис. 2.15.

На пробу з висоти 1 м двічі падала спеціальна циліндрична металева гиря з зубцями. Після випробування проба за допомогою сит розсівалася на фракції 0-0,5 та + 5 мм відповідно та зважувалася.

У табл. 2.3 представлено гранулометричний склад сирих гранул, отриманих при різних способах підготовки шихти.

Згідно з наведеними у табл. 2.3 даними можна відзначити, що використання роздільної підготовки шихти в цілому позитивно впливає на однорідність гранулометричного складу сирих гранул: зменшується кількість незгрудкованої фракції 0-1 мм та збільшується еквівалентний діаметр гранул; зменшуються показники середньо-квадратичного відхилення та коефіцієнту варіації [94].

Показники крупності гранул при різних способах підготовки шихти

Варіант підготовки шихти	Вміст фракції, %						$d_{\text{екв}}$ , мм	Середньо-квадратичне відхилення	Коефіцієнт варіації	
	+10 мм	7-10 мм	5-7 мм	3-5 мм	1-3 мм	0-1 мм				
Сумісна	0,05	0,09	0,09	0,14	0,50	0,14	3,38	0,17	0,99	
Роздільна, з використанням композиту	КР	0,31	0,18	0,11	0,15	0,23	0,01	6,45	0,10	0,62
	КВо	0,23	0,11	0,09	0,13	0,40	0,03	5,17	0,13	0,80
	КВк	0,29	0,11	0,10	0,16	0,32	0,01	5,77	0,12	0,70
	КРЗ	0,22	0,13	0,09	0,14	0,38	0,04	5,15	0,12	0,71
	КРВо	0,15	0,13	0,13	0,17	0,41	0,01	4,94	0,13	0,78
	КРВк	0,35	0,08	0,10	0,10	0,33	0,04	5,84	0,14	0,82
	КЗВо	0,24	0,10	0,08	0,12	0,43	0,03	5,06	0,15	0,87
	КЗВк	0,04	0,12	0,11	0,13	0,56	0,04	3,71	0,20	1,19
	КВоВк	0,20	0,10	0,11	0,16	0,40	0,01	5,06	0,13	0,79
	КРЗВк	0,08	0,14	0,12	0,13	0,47	0,05	4,21	0,15	0,91
	КРЗВо	0,14	0,14	0,10	0,15	0,45	0,02	4,66	0,15	0,88
	КРВоВк	0,26	0,10	0,12	0,16	0,35	0,01	5,51	0,12	0,73
КЗВоВк	0,32	0,14	0,10	0,19	0,23	0,01	6,22	0,11	0,64	

Збільшення при роздільній підготовці шихти вмісту фракції +10 мм, яка негативно впливає на процес спікання агломерату, відбувається через наявність в шихті крупних часток руди та звороту, які суттєво впливають на процеси утворення та росту гранул. Крім того, аналіз складу сирих гранул показав велику нерівномірність розподілу в них компонентів шихти.

Використання роздільної підготовки шихти, незважаючи на покращення гранулометричного складу сирих гранул, неоднозначно впливає на процес спікання та показники якості агломерату, що видно з табл. 2.4.

Таблиця 2.4

## Показники якості агломерату при різних варіантах підготовки шихти

Вихід агломерату, %	Варіант підготовки шихти													
	Роздільна, з використанням наведеного композиту													
	КР	КВо	КВк	КЗ	КРЗ	КРВо	КРВк	КЗВо	КЗВк	КВоВк	КРЗВк	КРЗВо	КРВоВк	
Після спікання (+10 мм)	71.8	70.9	73.6	80.9	69.2	78.3	74.1	75.3	59.1	74.4	68.2	67	72.9	81
Після випробування на міцність (+5 мм)	83	85	88	87	82.2	87	89.1	90	83.6	84.5	88	87	87.5	92
Дріб'язку, після випробування на міцність (0-5 мм)	17	15	12	13	17.8	13	10.9	10	16.4	15.5	12	13	12.5	8

Серед двокомпонентних композитів, представлених у табл. 2.4, слід відзначити позитивний вплив флюсів при додаванні до концентрату. Це підтверджує результати досліджень [95] щодо позитивного впливу додавання вапняку на процеси утворення гранул та якість спеченого продукту. Пояснити отриманий результат можна створенням умов для взаємодії залізовмісних компонентів і флюсів, що сприяє появі у зв'язці феритів кальцію. Проте через значну кількість залишкової шихти, використання двокомпонентних композитів не дозволяє ефективно покращувати процес утворення гранул.

Спікання агломератів, підготовлених з використанням трикомпонентних композитів підтвердило, що додавання вапняку та вапна до концентрату та руди покращує процес утворення гранул і дозволяє рівномірно розподіляти флюс в утворених гранулах.

Найкращу якість агломерату отримали під час спікання шихти, підготовленої з використанням чотирикомпонентного композиту з «концентрату – руди – вапна – вапняку». У той же час, результати дослідження підтвердили необхідність коригування цієї технології.

#### 2.4 Технологічна схема роздільної підготовки шихти з можливістю формування агломерату заданого складу та якості

Для покращення ефективності підготовки шихти, прийнято рішення розділити руду на фракції: 0-3 мм, яка подаватиметься до складу композиту, та 3-10 мм, яка буде використовуватися у залишковій шихті. Це має призвести до більш ефективного процесу зародження гранул, які формуватимуться шляхом взаємодії компонентів з активними поверхневими властивостями у композиті, та накочуванням на крупні гранули у залишковій шихті.

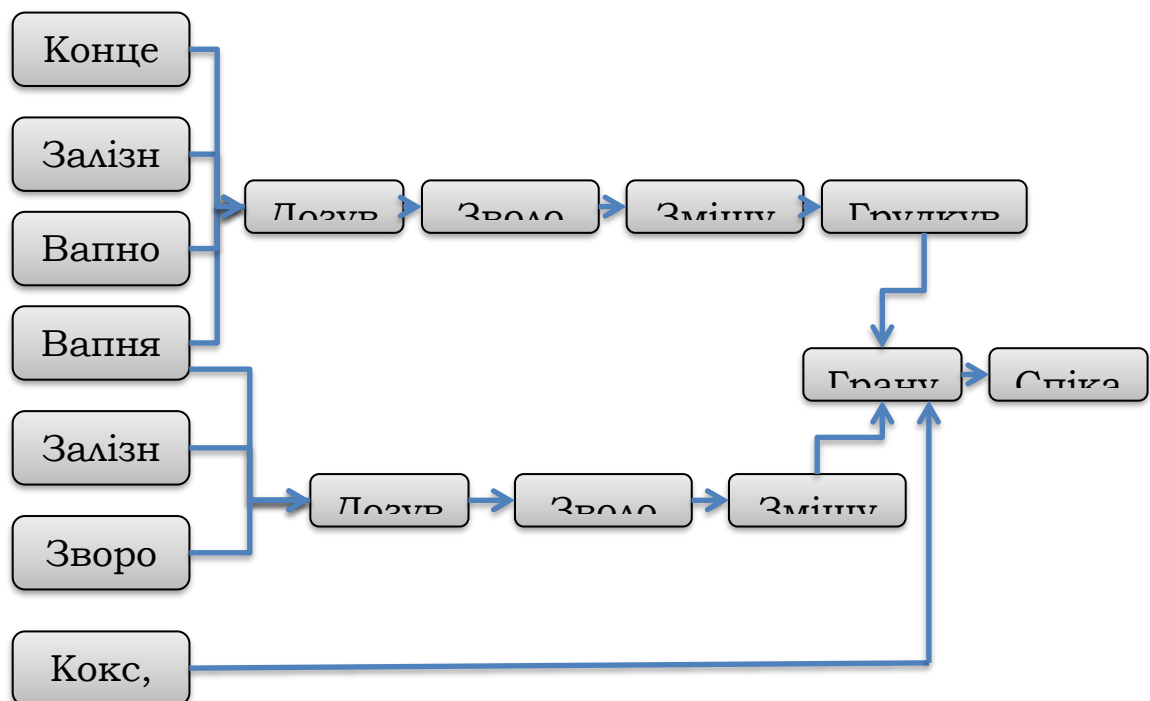


Рис. 2.16 – Запропонована схема підготовки агломераційної шихти

Таблиця 2.5

Показники крупності гранул при різних способах підготовки шихти

Варіант підготовки шихти	Вміст фракції, %						d <sub>екв</sub> , мм	Середньо-квадратичне відхилення	Коефіцієнт варіації
	+ 10 мм	7-10 мм	5-7 мм	3-5 мм	1-3 мм	0-1 мм			
Сумісний	0,05	0,09	0,09	0,14	0,50	0,14	3,38	0,17	0,99
Послідовний	0.33	0.08	0.10	0.10	0.37	0.02	5.72	0.147	0.88
Паралельний	0.13	0.09	0.20	0.24	0.32	0.01	4.93	0.11	0.66

Розглянуто ще один варіант роздільної підготовки шихти, який передбачає розподілення компонентів на дві частини: першу – композит із концентрату (крупністю 0-3 мм), залізної руди (0-3 мм), вапна (0-3 мм) та вапняку (0-3 мм); другу - залишкову шихту із залізної руди (3-10 мм), звороту (0-10 мм) та вапняку (0-3 мм); кожна з яких дозується, зволожується та змішується, а перша частина додатково грудкується, після чого вони спільно гранулюються з додаванням наприкінці твердого палива, крупністю 0-7 мм. Запропонована схема підготовки шихти представлена на рис. 2.16 [96].

Проведено порівняння ефективності роздільної підготовки шихти з використанням композиту «КРВоВк», виконаною: у першому випадку - з послідовним додаванням залишкової шихти до згрудкованого композиту; у другому випадку - паралельною попередньою підготовкою композиту та залишкової шихти з подальшою спільною грануляцією. Результати представлені у табл. 2.5.

Як видно з табл. 2.5, роздільна підготовка шихти, виконана за схемою, представленою на рис. 2.16, характеризується меншим значенням середньо-квадратичного відхилення, коефіцієнта варіації, еквівалентного діаметра та вмісту крупних гранул. Це можна пояснити більш рівномірним розподіленням вологи між компонентами шихти та забезпеченням кращих умов для зародження гранул навколо крупних кусків звороту та руди у залишковій шихті й окремії взаємодії дрібних компонентів з активними поверхневими властивостями у композиті.

Результати спікань представлені у табл. 2.6. Можна зробити висновок, що роздільна підготовка шихти паралельним способом призводить до покращення якості сирих гранул, умов спікання та самого агломерату. Це можна пояснити максимально рівномірною взаємодією з вологою усіх компонентів і створення умов формування зародків гранул навколо крупних кусків матеріалів і під час взаємодії компонентів з активними поверхневими властивостями.

Таблиця 2.6

Показники якості агломерату при різних варіантах підготовки шихти

Вихід агломерату, %	Варіант підготовки шихти		
	Сумісний	Послідовний	Паралельний
Після спікання (+10 мм)	71,8	81,1	81,7
Після випробування на міцність (+5 мм)	83	92,15	93,4
Дріб'язку, після випробування на міцність (0-5 мм)	17	8	6,2

Варто зазначити, що підготовка шихти з використанням композиту з «КРВоВк» дозволяє формувати склад і основність самого композиту та залишкової шихти шляхом зміни вмісту вапняку в них, що впливатиме на розподілення матеріалів у сирих гранулах та на фазовий склад агломерату.

Проведене дослідження, в якому шихту (табл. 2.1) розподіляли на композит і залишкову частину таким чином, аби основність між цими складовими через зміни пропорцій вапняку в них, становила від 0.95 до 1.25 од. та від 1.71 до 1.32 од. відповідно.

Підготовку шихти до спікання проводили за запропонованою схемою, представленою на рис. 2.16.

Як показали результати проведених досліджень (табл. 2.7), найкраща якість агломерату досягається при спіканні шихти, підготовленої з використанням композиту з «КРВоВк», кількість вапняку у якому забезпечує його основність на рівні 0,9-1,0 од., а в залишковій шихті - на рівні 1,6-1,8 од..

Таблиця 2.7

Показники якості агломерату при різних способах підготовки композиту та залишкової шихти

Основність композиту/залишкової шихти, од.	Вихід придатного агломерату, +10 мм, %	Вихід агломерату після випробування на міцність, +5 мм, %	Вміст в агломераті фракції 0-5 мм, %
0,95/1,71	82,05	94,5	5,5
1/1,65	81,74	93	7
1,05/1,59	80,04	91,7	8,3
1,11/1,51	78,55	90,3	9,7
1,15/1,45	77,15	89,2	10,8
1,2/1,39	74,55	87	13
1,25/1,32	72,2	82,5	17,5

Для підтвердження ефективності використання запропонованої технології підготовки шихти до спікання на формування міцної блокової структури зі зв'язкою, котра складається переважно з залізо-кальцієвих олівінів і феритів кальцію проведено мінералогічний аналіз отриманих агломератів за класичною схемою підготовки та запропонованою.

Мінералогічний аналіз відбувався у два етапи.

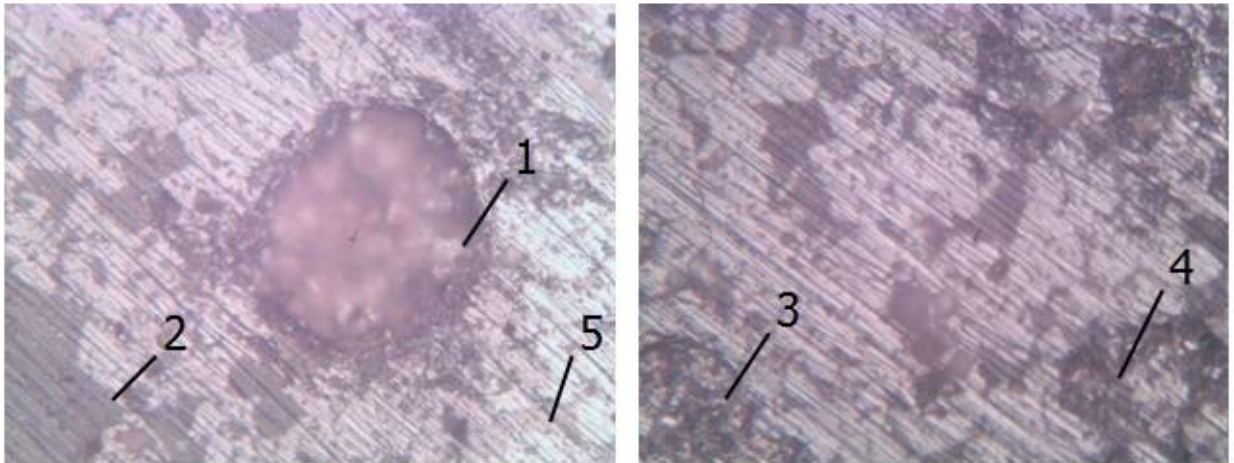


Рис. 2.17 - Структура агломерату, спеченого після сумісної підготовки шихти: 1 – неспечені компоненти; 2 – пори; 3 – силікатне озеро; 4 – олівіни, 5 – магнетит

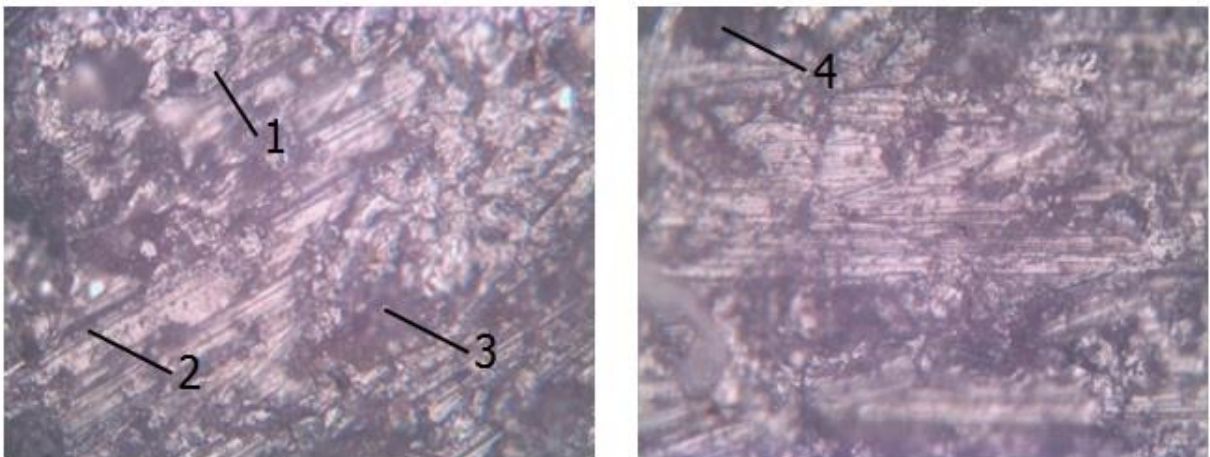


Рис. 2.18 - Структура агломерату, спеченого після підготовки шихти з використанням композиту з «КР'ВоВк'»: 1 – магнетит; 2 – ферити кальцію; 3 - олівіни; 4 – пори

Перший передбачав петрографічний аналіз відшліфованих проб придатного агломерату крупністю 5-10 мм, досліджених під мікроскопом при збільшенні у 400 разів (рис. 2.17 – 2.18) [92].

З рис. 2.17 (А-Б) видно, що агломерат, отриманий за традиційною технологією підготовки та спікання шихти, характеризується значною неоднорідністю мінералогічного складу, наявністю неспечених компонентів та високим вмістом силікатних озер.



Агломерат, спечений з шихти, підготовленої з використанням композиту з «КРВоВк» основністю 0,9-1,0 од. та залишкової шихти основністю 1,6-1,8 од. (рис. 2.18 А-Б), має більш однорідний мінералогічний склад з високим вмістом олівінів та феритів кальцію, які забезпечують йому високу міцність.

На другому етапі, дослідження фазового складу проводили для проб з тих самих спікань, стертих у порошок, за допомогою дифрактограм, які були одержані на дифрактометрі ДРОН -2. Зйомку проводили в нефільтрованому кобальтовому опромінюванні ( $\lambda = 1,78 \cdot 10^{-9} \text{м}$ ). Напруга на трубці сягала 30 кВ при силі анодного струму 15 мА. «Зразок 1» використовувався для агломерату, спеченого після класичної схеми підготовки шихти; «Зразок 2» - для агломерату, спеченого після запропонованої схеми підготовки шихти.

В дифрактометрі ДРОН-2 застосовується схема фокусування по Бреггу-Брентано. Промені фокусуються в точці, якщо відстань від фокуса трубки до зразка дорівнює відстані від зразка до цієї точки і кути променю, який падає та відображається, рівні.

Перед початком зйомки лічильник встановлювався під кутом 10 град. до напрямку первинного пучка променів. При зйомці лічильник обертвся зі швидкістю 2 град/хв навколо вертикальної осі гоніометру, а зразок – зі швидкістю 0,01 град/хв. На лічильнику було встановлено отвір шириною 0,25 мм.

Визначення фазового складу проводили шляхом порівняння таблиць відстаней між плоскостями та відповідних їм інтенсивності відображення променів дослідного зразка із такими таблицями з'єднань, які приведені в довідниках з рентгеноструктурного аналізу [98]. Інтенсивність найбільш сильного дифракційного максимуму приймається за 100%, інтенсивність інших – виражається в долях найбільш сильної лінії.

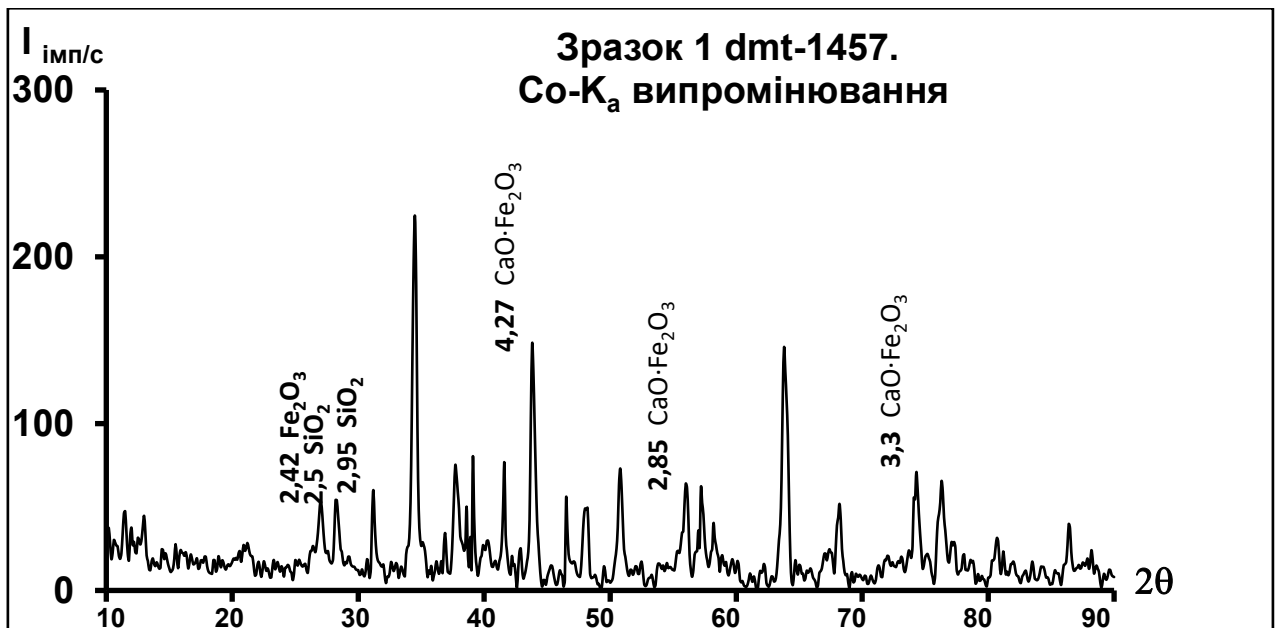


Рис.2.19 – Дифрактограма агломерату, спеченого після стандартної схеми підготовки шихти

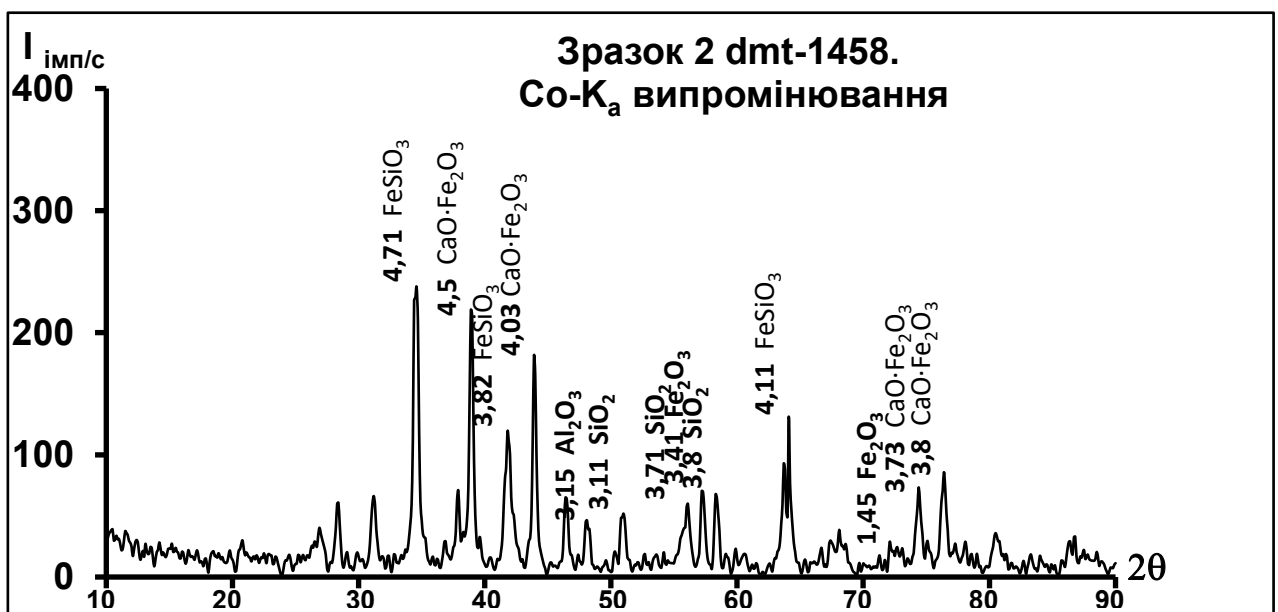


Рис.2.20 – Дифрактограма агломерату, спеченого після запропонованої схеми підготовки шихти

Для встановлення наявності даного хімічного з'єднання в дослідному зразку в таблиці значень цієї сполуки знаходять таку величину, яка відповідає максимальній інтенсивності. Потім це значення необхідно знайти в таблиці відстаней між площинами дослідного зразка. Якщо такого значення немає, то дана сполука відсутня в дослідному зразку. Якщо спостерігається збіг 4-5

найбільш сильних ліній і співвідношення їх інтенсивності в дослідному об'єкті близьке до даних із довідника, тоді можливо стверджувати, що така сполука є в дослідному об'єкті.

Результати дослідження представлені на рис. 2.19-2.20.

На дифракційній кривій рис.2.19, яка відповідає агломерату, спеченому після класичної підготовки шихти, знайдені інтерфракційні максимуми, які відповідають значній кількості в пробі гематиту, діоксиду кремнію та однокальцієвому фериту.

Агломерат, спечений після запропонованої схеми підготовки, як показано на рис.2.12, окрім схожих інтерфракційних максимумів, які відповідають гематиту і діоксиду кремнію, містить значно більші максимуми однокальцієвого фериту, а також значення, які відповідають силікатам заліза та алюмінію. Це підтверджує очікуваний результат від реалізації даного способу підготовки шихти до спікання.

Спікання агломерату, шихта якого підготовлена запропонованим способом у порівнянні з сумісною підготовкою (табл. 2.4), характеризується збільшенням виходу придатного агломерату на 10,25%, збільшенням виходу фракції +5 мм на 11,5% після випробування на міцність та зменшення вмісту фракції 0-5 мм на 11,5%, що є наслідком створення оптимальних умов для спікання та формування фахового складу агломерату.

## 2.5 Висновки по другому розділу

1. На основі термодинамічного аналізу семикомпонентної системи, яка відповідає складу агломераційної шихти, розроблена пропозиція щодо формування міцної міжблокової зв'язки, яка складається переважно з залізокальцієвих олівінів та феритів кальцію. Запропоновано з вихідної шихти формувати дві складові: композит основністю 0.9-1.0 од. для появи максимальної кількості залізокальцієвих олівінів в агломераті, та залишкову шихту основністю 1.6-1.7 од., для появи у зв'язці феритів кальцію.

2. Доведено, що роздільна підготовка шихти з використанням композитів на основі концентрату дозволяє отримувати більш однорідний гранулометричний склад сирих гранул, завдяки створенню умов ефективної взаємодії матеріалів при зволоженні та грудкуванні, та створює можливість оптимального розподілу флюсів у шихті, що дозволяє формувати між блокову зв'язку заданого складу та властивостей.

3. Підтверджено, що найкращі показники якості спеченого агломерату досягаються шляхом підготовки шихти до спікання, який передбачає розподілення компонентів на дві частини: першу – композит основністю 0,9-1,0 од. із концентрату (крупністю 0-3 мм), залізної руди (0-3 мм), вапна (0-3 мм) та вапняку (0-3 мм); другу - залишкову шихту основністю 1,6-1,8 од. із залізної руди (3-10 мм), звороту (0-10 мм) та вапняку (0-3 мм); кожна з яких дозується, зволожується та змішується, а перша частина додатково грудкується, після чого вони спільно гранулюються з додаванням наприкінці твердого палива, крупністю 0-7 мм. Виробництво агломерату після грудкування запропонованим способом характеризується збільшенням виходу придатного агломерату на 10,29 %, збільшенням виходу фракції +5 мм на 11,5% після випробування на міцність та зменшення вмісту фракції 0-5 мм на 11,5%.

## РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ В БАРАБАНО-  
СТАБІЛІЗАТОРІ НА ЯКІСТЬ СПЕЧЕНОГО АГЛОМЕРАТУ, З  
ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

3.1 Можливість стабілізації гранулометричного складу агломерату перед  
потраплянням у робочий простір барабана-стабілізатора

Однією з задач, вирішення якої здатне забезпечити позитивний вплив на роботу барабана-стабілізатора, є вирівнювання гранулометричного складу агломерату на ділянці його транспортування від агломераційної машини до барабана. Наявність значної кількості крупних кусків в барабані-стабілізаторі, які являються найменш міцними, сприяє збільшенню тривалості механічної обробки агломерату та утворенню дрібної фракції у значній кількості.

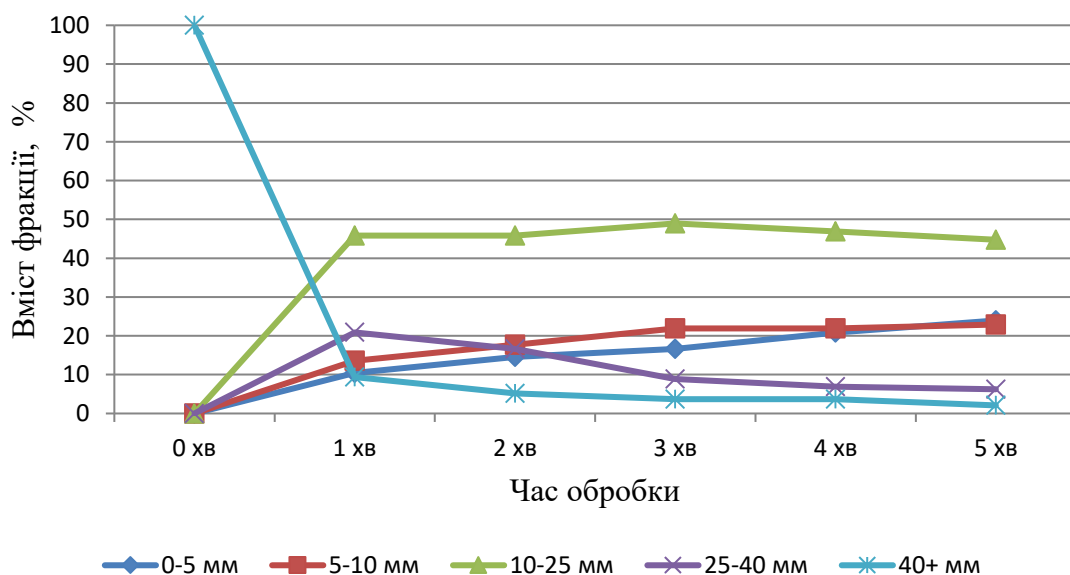


Рис. 3.1 - Дослідження поведінки крупного агломерату при механічних навантаженнях в барабані стабілізаторі

Дослідження поведінки крупного агломерату при механічних навантаженнях в барабані-стабілізаторі проводились в лабораторії НМетАУ. Для досліджень була відібрана проба масою 15 кг, крупність якої складала більше 40 мм. Після кожної хвилини, агломерат розсіювався на ситах, з метою виявлення зміни його гранулометричного складу. Результати представлені на рис. 3.1.

Згідно отриманих результатів, ми можемо наглядно оцінити вплив крупної фракції на показники барабану-стабілізатора. Як видно на графіку, після першої хвилини роботи барабану, вміст фракції більше 40 мм різко знизився, утворивши в значній кількості доволі міцну фракцію 10-25 мм, та в меншій мірі - 25-40 мм, та дрібні фракції 0-5 та 5-10 мм.

Подальше знаходження спеченця в барабані-стабілізаторі лише в незначній кількості зменшувало частку крупного агломерату, але, при тому різко підвищуючи вміст дріб'язку. Вміст фракції 10-25 мм залишався доволі стабільним протягом всього дослідження.

Отже, отримані дані підтверджують те, що знаходження в барабані-стабілізаторі крупних кусків призводить до переподрібнення інших фракцій і збільшує час роботи агрегату. Вирішення цієї задачі мусить полягати у попередній підготовці спеченця до потрапляння в барабан.

Запропоновано [99] на верхніх кромках бокових вертикальних броньованих стінках завантажувального пристрою барабана закріпити поперечні осі на відстані одна від одної, рівній висоті стінок, на яких в шаховому порядку вільно підвісити трикутного перетину біли, що вершинами своїх граней направлені назустріч руху агломерату, при цьому проміжок між білами в одному ряді має дорівнювати максимальному розміру куска агломерату, що транспортується.

Схема завантажувального пристрою барабану-стабілізатора представлена на рис 3.2.

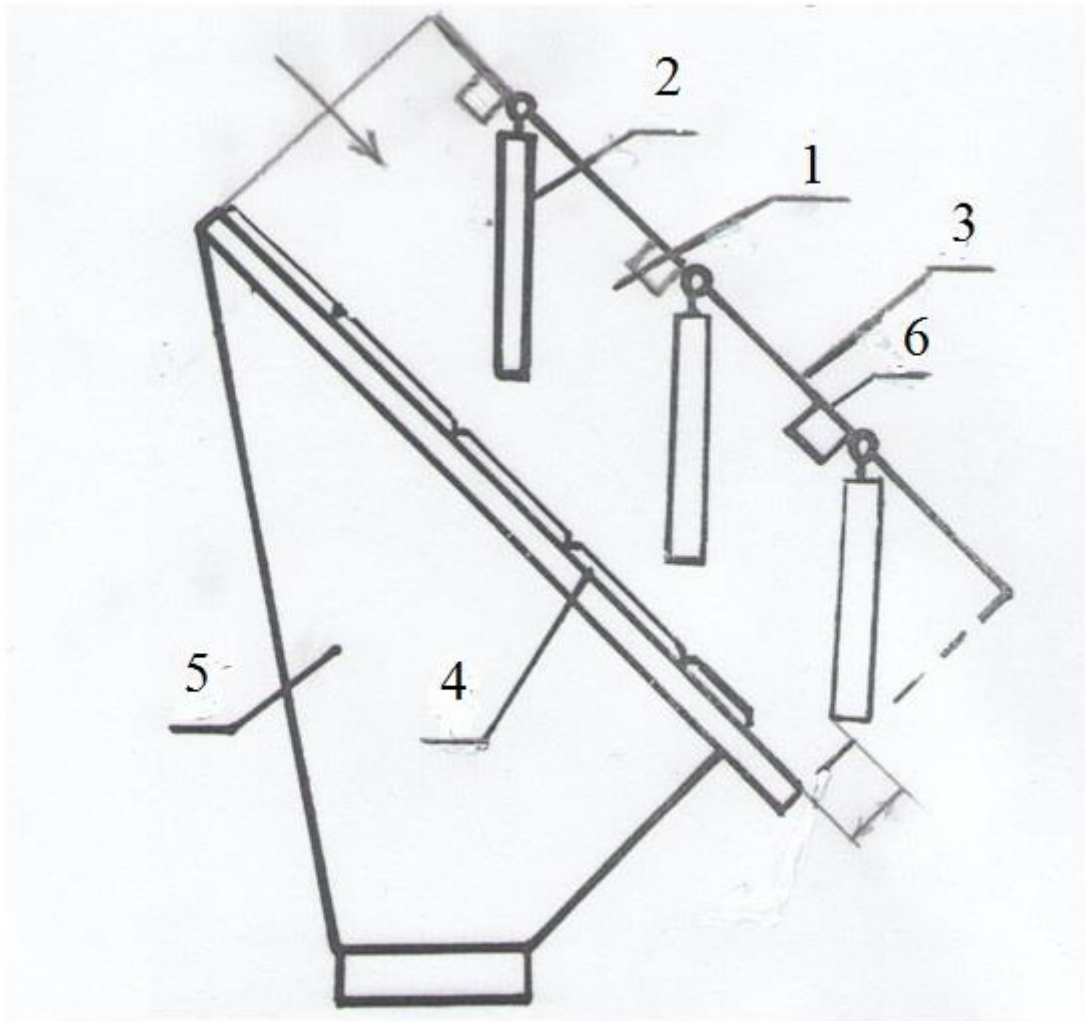


Рис. 3.2 - Завантажувальний пристрій барабану-стабілізатора:  
 1 - жолоб, 2 - металеві біли, 3 - стінки жолоба, 4 - стаціонарний грохот, 5 - бункер звороту, 6 - обмежувачі

Після руйнування спеченого агломерату на зубчатій дробарці, куски крупністю 100-150 мм, рухаючись по жолобу, стикаються з верхніми білами, встановленими на торці вертикальних стінок жолоба, розколюються і, відхиляючись в сторону нижче підвішених біл знову розколюються на більш дрібні куски. В процесі переміщення стаціонарним грохотом, видаляється частина дрібної фракції 6-8 мм в бункера звороту і для подальшої підготовки спеченця в барабані-стабілізаторі інтервал крупності агломерату звужується до 8-50 мм, що дозволяє уникати його подрібнення, отримуючи здебільшого стабілізовану крупність 3-30 мм. Перед білами на хвостовій частині пристрою для транспортування гарячого агломерату встановлюються обмежувачі, які

запобігають їм вдарятись об жолоб при інерційному русі в сталі положення [100-102].

Дослідження ефективності запропонованих заходів проводилося в два етапу. Спершу, зі спеченця, хімічний і гранулометричний склад якого відповідає агломерату, який отримують в Південному ГЗК, вибиралась шихта, вагою 15 кг, крупної фракції. Гранулометричний склад агломерату наведено в таблиці 3.1

Таблиця 3.1

## Гранулометричний склад агломерату

Гранулометричний склад	0-5, %	5-10, %	10-25, %	25-40, %	40+, %
Частка агломерату, %	-	-	-	33,33	66,67

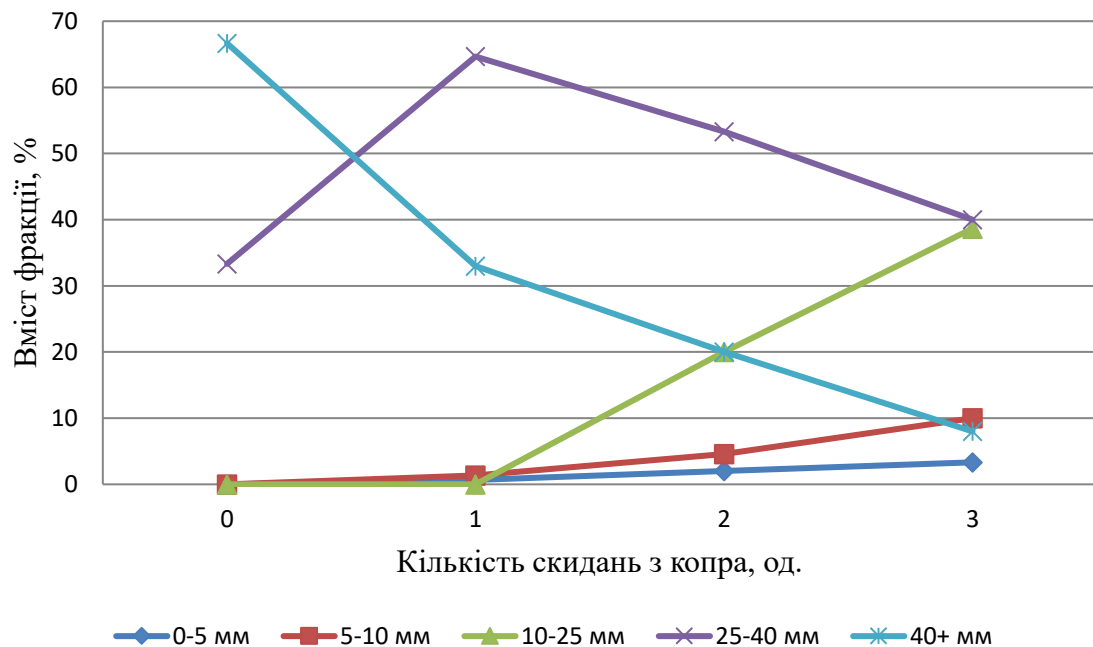


Рис. 3.3 - Зміна вмісту гранулометричного складу агломерату

Далі ця шихта завантажувалась на копер, який був додатково



обладнаний металевими білами, на ділянці падіння агломерату, і з висоти 2 м, скидали на біли.

Зміна вмісту гранулометричного складу агломерату під час проведення дослідження наведена на рис. 3.3.

Як показали дослідження, встановлення металевих біл перед завантажувальним пристроєм барабану-стабілізатора дозволить руйнувати фракцію більше 40 мм, з утворенням значної кількості фракції 25-40 мм, що призведе до запобігання потрапляння крупних кусків агломерату в барабан і переподрібнення матеріалу, тим самим зменшуючи вміст дріб'язку та час обробки.

Фракція більше 40 мм руйнується подібно тому, як веде себе в барабані-стабілізаторі, фракції 10-25 і 25-40 мм ведуть себе також аналогічним чином з барабаном, утворюючись в значній кількості, а через те, що біли не фіксовані, удар з матеріалом проходить недостатньо жорсткий для утворення великої кількості дрібної фракції. Тим самим, використовуючи таку схему обробки, ми можемо отримувати агломерат, з вмістом дріб'язку до 3-4%, та крупної фракції - до 8-10%, що істотно впливає на подальшу обробку в барабані.

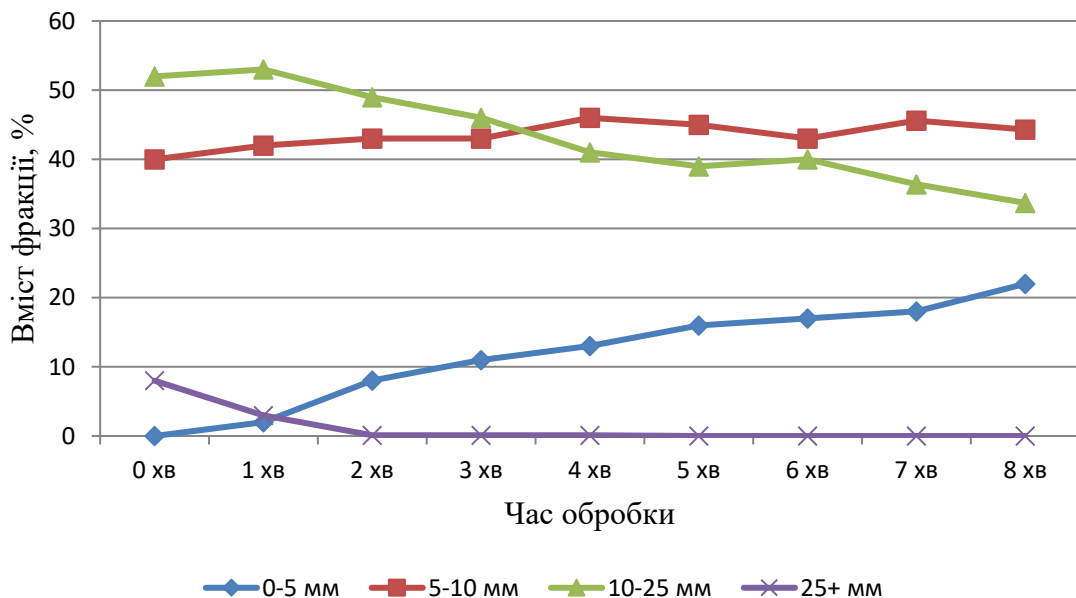


Рис.3.4 - Дослідження стабілізації агломерату в барабані, після проходження повз металеві біли

Для дослідження ефективності використання металевих біл в

завантажувальному пристрої барабана-стабілізатора, було проведено дослідження для порівняння його ефективності механічної обробки агломератів, завантажених без проходження крізь металеві біли (рис. 3.1), та після проходження крізь металеві біли (рис. 3.4).

Порівняння підтвердило той факт, що після проходження агломерату крізь металеві біли і зменшення вмісту крупної фракції – кількість утвореного в барабані дріб'язку зменшується, і стабілізація відбувається більш якісно. Також, попереднє руйнування кусків дозволяє зменшити час роботи барабану.

Однак дане рішення не компенсує потреби оптимізації навантажень у пристрої, необхідних для стабілізації агломерату за крупністю та міцністю.

### 3.2. Розробка математичної моделі руйнування спеченого агломерату в агрегаті барабанного типу

Літературний аналіз показав, що найбільш ефективним агрегатом для механічної обробки спеченого агломерату є барабан-стабілізатор, проте на сьогодні відсутнє достатнє аргументування вибору конструкційних і технологічних параметрів його роботи, що не дозволяє ефективно керувати процесом стабілізації матеріалу.

Для дослідження впливу конструкційних і технологічних параметрів роботи пристрою барабанного типу на руйнування агломерату на етапі механічної обробки, розроблена математична модель, концептуальна схема якої представлена на рис. 3.5 [103-104].

Вона розроблена на основі математичної моделі роботи кульового млина при подрібненні матеріалів металевими шарами однакового розміру [105-106] з урахуванням, що зсередини барабан-стабілізатор має полиці, а в якості тіл дроблення використовуються куски агломераційного спеченця, який характеризується неправильною формою (коефіцієнт форми визначає ступінь наближення форми куска до кулястої).

Математична модель дозволяє визначити частоту обертання барабана, при якій агломерат починає рухатися у водоспадному режимі, кількість цього агломерату, траєкторію, час і швидкість падіння кусків в просторі барабана, а також величину і види енергетичних навантажень, які діють на матеріал при різних технологічних і конструкційних параметрах роботи пристрою. Її вихідними параметрами є величина загальної енергії навантаження, яка складається з енергій удару, стирання та розколювання.

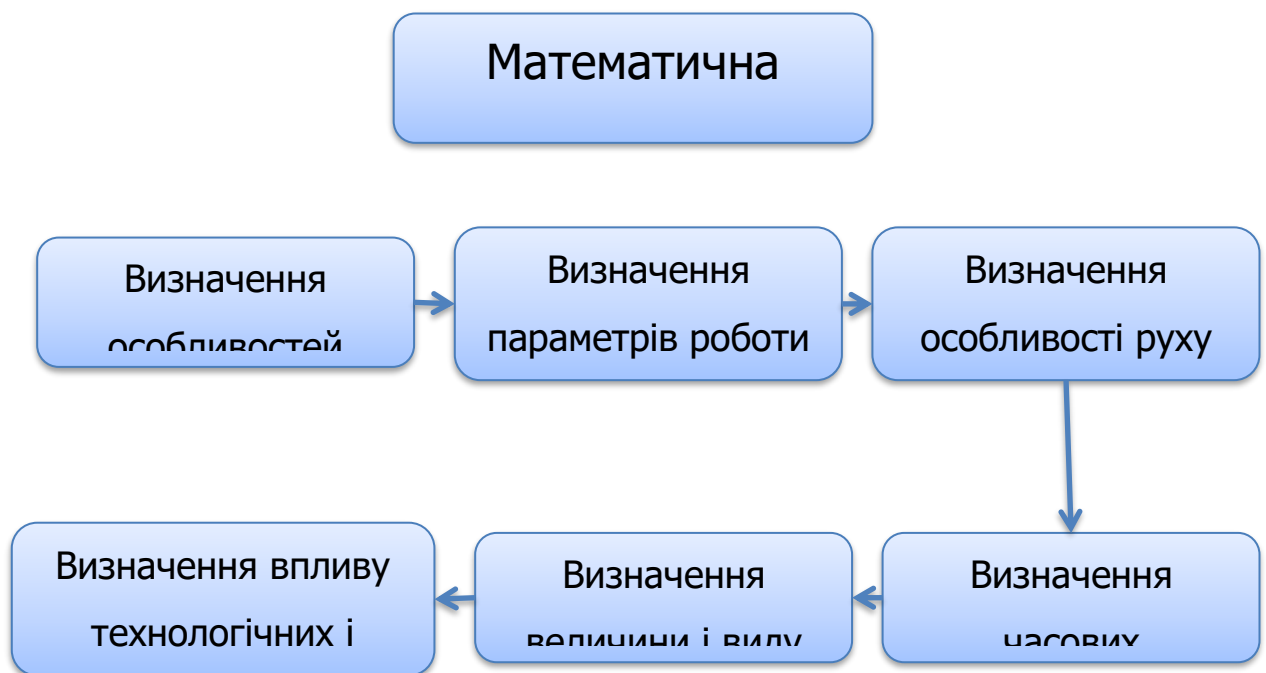


Рис. 3.5 - Концептуальна схема математичної моделі руйнування агломераційного спеченця в агрегаті барабанного типу

Відомо, що механічна обробка спеченця в барабані здійснюється при взаємодії кусків різної крупності, що рухаються по своїх траєкторіях [107]. В залежності від швидкості обертання визначається режим руху цих кусків: каскадний, водоспадний, змішаний та надкритичний.

Каскадний режим руху (лінія 1 на рисунку 3.6) відбувається при низькій частоті обертання барабану шляхом перекошування тіл, які підлягають подрібненню, без польоту. Вони безперервно циркулюють, підіймаючись по круговим траєкторіям з подальшим скоченням паралельними траєкторіями

вниз. Руйнування матеріалу відбувається силами стирання та роздавлювання.

Із підвищенням частоти обертання барабану-стабілізатора, тіла за круговими траєкторіями підіймаються вище, проте режим роботи може лишатися каскадним, доки вони не підіймуться до визначеної, залежно від частоти обертання барабану та радіусу, висоти, з якої почнуть скидатися по параболічним траєкторіям знову на кругові. Такий режим роботи називається водоспадним. Подрібнення матеріалу відбувається головним чином ударним навантаженням в момент падіння.

При водоспадному режимі (лінія 2 на рисунку 3.6) вся траєкторія руху матеріалу ділиться на два етапи: за круговою траєкторією до точки відриву та від точки відриву за параболічною траєкторією до точки падіння [105-106].

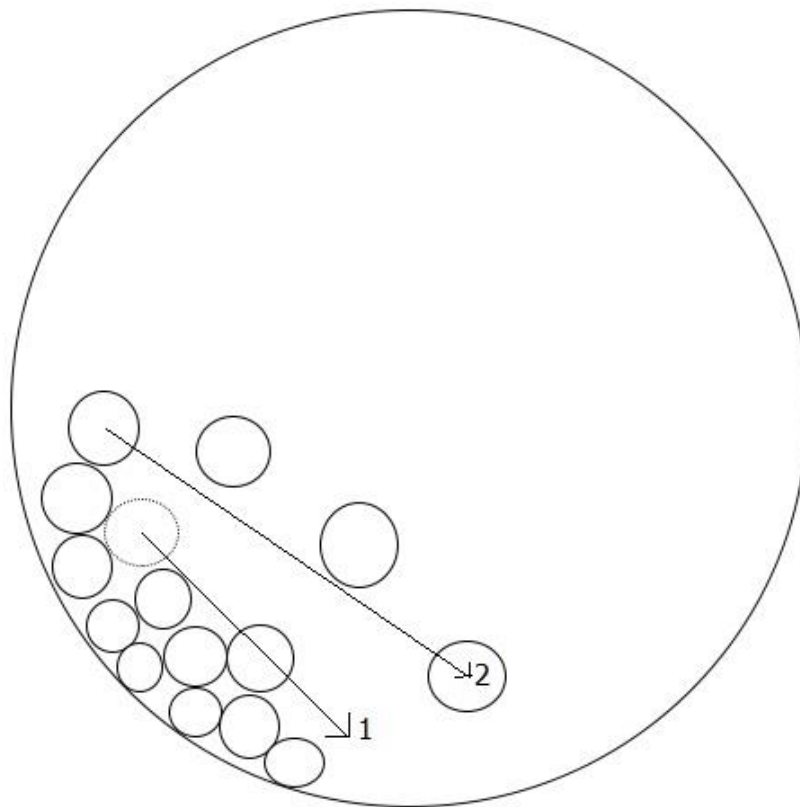


Рис. 3.6 – Каскадний (лінія 1) і водоспадний (лінія 2) режими руху агломерату в пристрої барабанного типу

Круговими траєкторіями шар направляється силами тертя, що виникають між внутрішньою поверхнею барабану-стабілізатора та зовнішнім шаром кусків. Наявність полиць інтенсифікує підйом певної кількості матеріалу, в залежності від своєї ширини, на потрібну висоту для падіння параболічною траєкторією.

Визначення оптимальної частоти обертання барабану-стабілізатора, при якому агломерат переходить з каскадного режиму падіння на водоспадний розраховується за формулою:

$$n = \Phi * \frac{\sqrt{g} * 30}{\pi * \sqrt{R}} * \sqrt{\cos \alpha} , \text{ об/хв} \quad (3.1)$$

$\Phi$  – коефіцієнт форми агломерату;

$R$  – радіус барабану-стабілізатора;

$\alpha$  – кут відриву куска [106].

Ця величина дозволяє провести залежність між швидкістю обертання барабана, його радіусом та кутом відриву агломерату від стінок та полиць. Вона важлива у подальших розрахунках енергетичних навантажень, які діятимуть при падінні на агломерат.

Збільшення частоти обертання дозволяє підіймати матеріал вище, сприяючи більш інтенсивному руйнуванню. Також варто зазначити, що збільшення радіусу барабана-стабілізатора призводить до можливості роботи на меншій швидкості обертання.

Відповідно, залежність кута відриву від радіуса барабану та його швидкості обертання матиме вигляд:

$$\cos \alpha = \frac{n^2 * \pi^2 * R}{\Phi^2 * g * 900} \quad (3.2)$$

Наявність полиць збільшує коефіцієнт тертя, що несуттєво, як і розмір

кусків, впливає на траєкторію руху агломерату в пристрої барабанного типу. [108]. Кут відриву агломерату від полиці становитиме:

$$\cos \alpha = \frac{n^2 * \pi^2 * R}{0.8^2 \Phi^2 * g * 900} , \quad (3.3)$$

де 0,8 – прийнятий коефіцієнт, який враховує зміну коефіцієнту тертя для матеріалу, який підіймається по висоті барабана за допомогою полиці.

Після відриву від футеровки барабану, тіло рухається по параболічній траєкторії з початковою швидкістю  $v$ , рівною її окружній частоті обертання.

Рівняння параболічної траєкторії падіння матеріалу має вигляд:

$$y = x * tg(\alpha) - \frac{x^2}{2 * R * \cos^3 \alpha} , \quad (3.4)$$

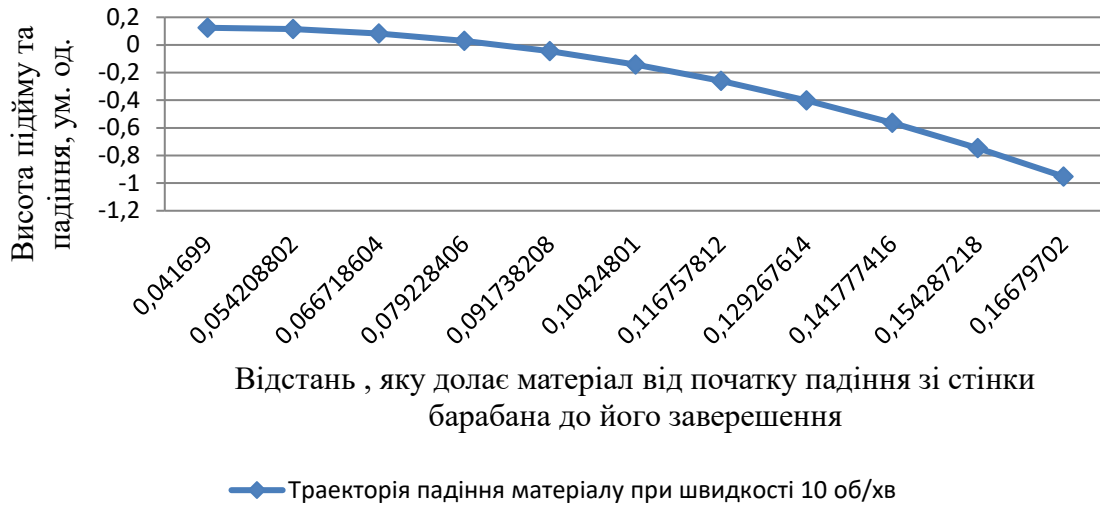
Воно дає змогу знайти координати початкової та кінцевої точки падіння матеріалу.

Проведемо розрахунок траєкторії падіння агломерату зі стінки барабана радіусом 1,5 м, при зміні частоти обертання з 10 до 15 об/хв.

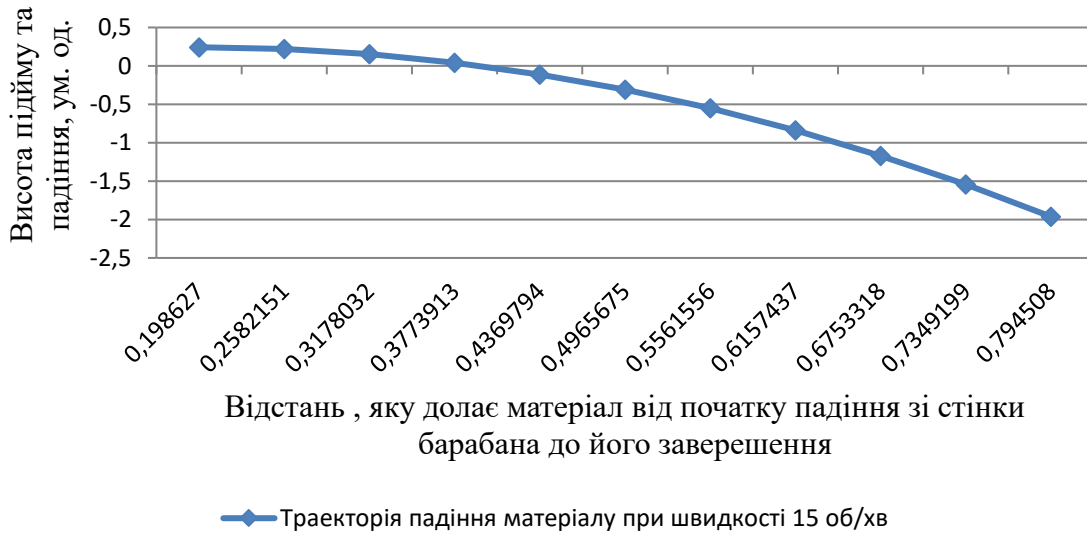
Траєкторія падіння агломерату при різних швидкостях представлена на рис. 3.7.

Координати початкової та кінцевої точки падіння матеріалу доводять, що збільшення швидкості обертання барабана-стабілізатора інтенсифікує підйом матеріалу, та енергію, з якою він падає, що впливає на віддаленість кінцевої точки падіння.

Важливим показником руху шару агломерату в пристрої барабанного типу є відносна кількість матеріалу, який при заданих параметрах роботи агрегату рухається водоспадним та каскадним режимом. Ці співвідношення у подальшому дозволять оцінити інтенсивність та величину кінетичної енергії, яка діє в момент падіння матеріалу.



А)



Б)

Рис. 3.7 - Траєкторія падіння матеріалу при швидкості: а) 10 об/хв, б) 15 об/хв

Відносна кількість агломерату, який рухається водоспадним  $N_p$  режимом розраховується:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{\sin 2\alpha}{(\pi - 2\alpha) + \sin 2\alpha} 100 + n_p * P, \% \quad (3.5)$$

Де  $N_p$  – кількість агломерату, який рухається водоспадним режимом;

$N_s$  – кількість агломерату, який рухається каскадним режимом;

$n_p$  – кількість полиць,

$P$  – робоча поверхня полиці.

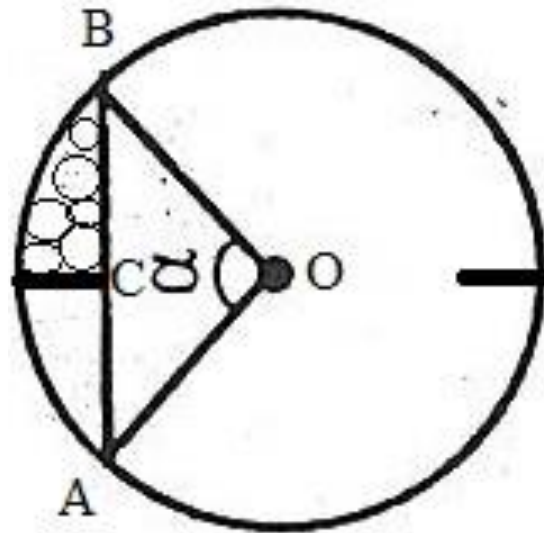


Рис. 3.8 – Робоча поверхня полиці пристрою барабанного типу

Таблиця 3.2

Залежність кількості матеріалу, який рухається параболічною та круговою траєкторією від частоти обертання барабана-стабілізатора

Частота обертання, м/с	$N_p / N_s$ , %	$N_s / N_p$ , %
10	49.46	50.54
13	48.615	51.385
15	47.45	52.55

Відмінність формули від наведеної для математичної моделі роботи барабанного млина полягає у врахуванні кількості матеріалу, який додатково підіймається за допомогою полиць [106]. Величина робочої поверхні полиці визначається її шириною, рис. 3.8.

У табл. 3.2 представлено порівняння відношення кількості матеріалу,



який рухається параболічною та круговою траєкторією від швидкості обертання барабана-стабілізатора без додавання у барабан полиць.

Збільшення частоти обертання призводить до несуттєвого зменшення відносної кількості матеріалу, який знаходиться на параболічній траєкторії.

Цей показник може здатися негативним, але ці наслідки у повній мірі нівелюються встановленням полиць та збільшенню величини енергії руйнування, завдяки більшій швидкості падіння матеріалу.

Час проходження матеріалу параболічною траєкторією розраховується за формулою:

$$t_p = \frac{2 \cdot \sin 2\alpha}{\pi} * t_n, \text{ с} \quad (3.6)$$

де  $t_n$  – час одного оберту барабану.

Час повного шляху, пройденого матеріалом круговою та параболічною траєкторією циклу руху розраховується за формулою:

$$T = \frac{(\pi - 2\alpha) + \sin 2\alpha}{\pi} * t_n, \text{ с} \quad (3.7)$$

Число циклів руху матеріалу за час одного оберту барабана розраховується:

$$\text{Ц} = \frac{t_n}{T} \quad (3.8)$$

Як показано в табл. 3.3, збільшення частоти обертання барабана-стабілізатора призводить до збільшення часових показників руху та зменшення циклів під час одного оберту барабана.

Таблиця 3.3

Часові показники руху матеріалу в залежності від частоти обертання барабана-стабілізатора

Частота обертання, об/хв	$t_p$ , сек	T, сек	Ц
10	1,26	1,27	4,7
13	1.59	1.64	2.8
15	1,78	1,87	2,13

Розрахунок характеристик швидкості падіння також має важливий вплив для знаходження величини та характеру енергетичних навантажень. Швидкість падіння матеріалу параболічною траєкторією в момент удару можна розрахувати за формулою:

$$v_p = v * \sqrt{1 + \sin^2 \alpha}, \text{ м/с} \quad (3.9)$$

Радіальна швидкість, направлена по лінії удару розраховується:

$$v_n = 8 * v * \sin^3 \alpha * \cos \alpha, \text{ м/с} \quad (3.10)$$

Як показано в табл. 3.4, збільшення частоти обертання барабана-стабілізатора призводить до зростання показників швидкості падіння агломерату.

Таблиця 3.4

Показники швидкості падіння матеріалу в залежності від швидкості  
обертання барабана-стабілізатора

Частота обертання, об/хв	V, м/с	V <sub>n</sub> , м/с	V <sub>p</sub> , м/с
10	1.57	2.01	4.62
13	2.04	4.08	5.9
15	2.35	5.64	6.6

Вся кінетична енергія шару матеріалу наприкінці параболічного шляху визначається за формулою:

$$E_k = \frac{m \cdot \frac{N_p}{N_{sn}} \cdot v_{op}^2}{2} + \frac{m \cdot \frac{N_p}{N_{sn}} \cdot v_{np}^2}{2}, \text{ Дж} \quad (3.11)$$

де  $m$  – масова доля загальної кількості матеріалу, що рухається у водоспадному режимі.

Кількість енергії, яка витрачається на подрібнення матеріалу ударом:

$$E_{уд} = \frac{m \cdot \frac{N_p}{N_{s0}} \cdot v_{n0}^2}{2} + \frac{m \cdot \frac{N_p}{N_{sn}} \cdot v_{np}^2}{2}, \text{ Дж} \quad (3.12)$$

Розрахунок кінетичної енергії та ударної на відміну від запропонованої в літературі враховує суму енергетичних навантажень, які діють на частку матеріалу, що падає зі стінки барабана та частку, яку підіймають полиці.

Різницю між кінетичною та ударною енергією складають сили, які діють на стирання та розколювання. Вони утворюється під час перекочування матеріалу та дозволяє надавати агломерату округлої форми, видаляючи гострі

виступи. Це сприяє як і покращенню властивостей в умовах доменної плавки так і більш ефективному розсіюванню дріб'язку.

Таблиця 3.5

Діапазон зміни конструкційних і технологічних факторів впливу на величину та вид енергії навантаження для побудови рівнянь множинної регресії

Фактор	Частота обертання, об/хв	Радіус, м	Кількість полиць, од	Ширина полиць по відношенню до величини радіуса, %	Ступінь завантаження агломератом робочого простору
Діапазон зміни	7	0,75	1	17	27
	8	1,25	2	18	28
	9	1,25	3	19	29
	10	1,5	4	20	30
	11	1,75	5	21	31
	12	2,0	6	22	32
	13	2,25	7	23	33

Отримана математична модель дозволила виділити основні технологічні та конструкційні фактори роботи пристрою барабанного типу, які впливають на величину кінетичної енергії та її вид: радіус барабана, частота обертання, кількість та ширина полиць, ступінь завантаження пристрою агломератом.

Довжина барабана та кут його нахилу впливають на час обробки та загальну величину енергетичних навантажень .

Для кожного з факторів були проведені окремі розрахунки їх впливу на величину та вид енергії навантаження на агломерат в барабані-стабілізаторі

при усереднених значеннях інших факторів, що дозволило отримати добірку величин і знайти залежності впливу для кожного з них.

Діапазон, в якому для розрахунків був змінений кожен фактор, представлений у табл. 3.5.

На основі результатів моделювання отримано рівняння множинної регресії залежності величини загальної ( $E_k$ ) та ударної ( $E_{уд}$ ) енергій від конструкційних і технологічних факторів, які впливають на процес руйнування кусків в барабані:

$$E_k = 0,02927 * n_{об}^{1,61} * R_б^{3,82} * n_{п}^{0,39} * h_{п}^{0,55} * \varphi^{0,57}, R^2=99.6\% \quad (3.13)$$

де  $n_{об}$  – кількість обертів барабана-стабілізатора за хвилину;  $R_б$  – радіус барабана-стабілізатора;  $n_{п}$  – кількість полиць;  $h_{п}$  – ширина полиці;  $\varphi$  – ступінь завантаження.

$$E_{уд} = 4,103 * 10^{-6} * n_{об}^{4,63} * R_б^{5,34} * n_{п}^{0,55} * h_{п}^{0,77} * \varphi^{0,41}, R^2=98.6\% \quad (3.14)$$

Енергія, що витрачається на руйнування стиранням та розколюванням, визначається різницею загальної та ударної енергій.

Використання наведених рівнянь надає можливість обґрунтованого вибору раціональних параметрів конструкції пристрою барабанного типу.

### 3.3 Оцінка і вибір конструкції та технологічного режиму роботи барабана-стабілізатора

Визначено, що енергія навантаження, яка діє на агломерат, залежить від наступних факторів: радіуса барабана, частоти обертання, кількості та ширини полиць, ступеню завантаження пристрою агломератом [104].

Проведений розрахунок впливу кожного з факторів на величину і вид енергії навантаження [109].

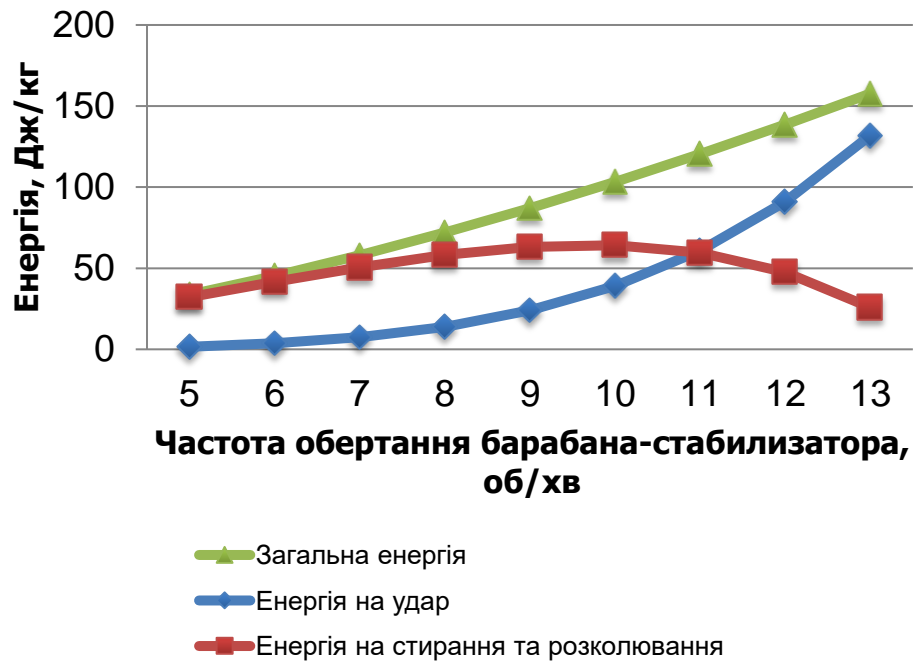


Рис. 3.9 – Вплив частоти обертання барабана-стабілізатора на величину та вид енергії навантаження

Розрахунок проводився шляхом почергової зміни величини кожного окремого фактора при базових показниках усіх інших. За базові показники прийнято: радіус барабана – 1,5 м, частота обертання – 10 об/хв, кількість полиць – 4, ширина полиць – 20% від R, ступень завантаження пристрою агломератом – 30%.

Як показано на рис. 3.9, зміна частоти обертання барабана суттєво впливає на величину та вид енергії навантаження. Зміна частоти до 7 об/хв не призводить до значних змін величини та характеру енергії навантаження. Зі збільшенням частоти обертання до 8-10 об/хв значно зростає величина загальної енергії навантаження за рахунок збільшення ударних сил і

максимальну величину сил стирання та розколювання. Подальше збільшення частоти обертання призводить до значного зростання загальної енергії навантаження за рахунок прудкого росту ударних сил і зменшення сил стирання та розколювання. Це призведе до значного перенавантаження та подрібнення агломерату.

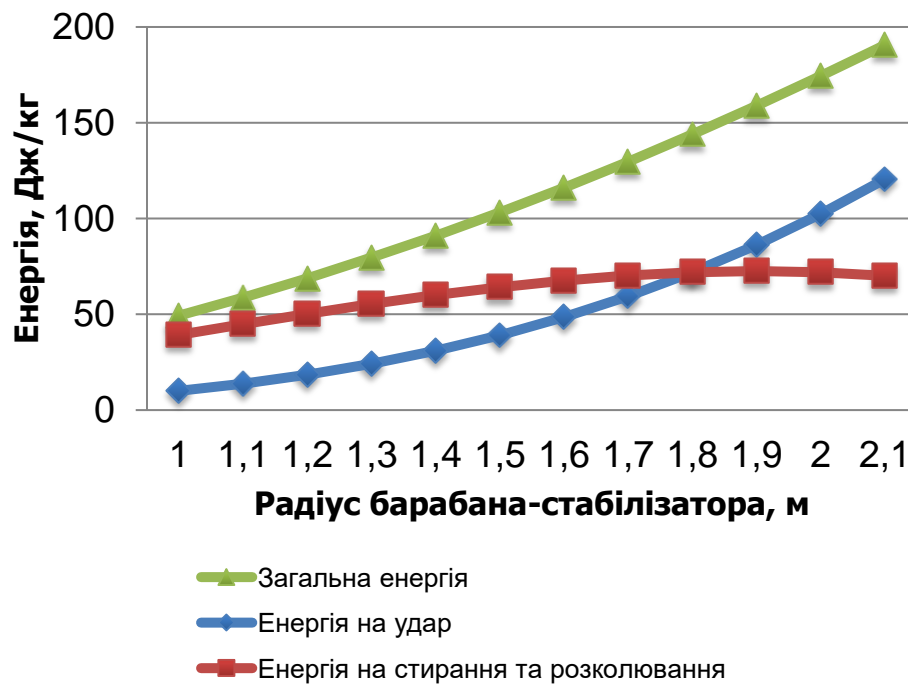


Рис. 3.10 – Вплив радіуса барабана-стабілізатора на величину та вид енергії навантаження

Як видно з рис. 3.10, збільшення радіуса барабана до 1,5 м призводить до плавного зростання енергетичних навантажень на куски агломераційного спеченця. Зі збільшенням радіуса  $>1,5$  м починається активне зростання ударного навантаження по відношенню до сил стирання та розколювання.

Збільшення кількості (рис. 3.11) та ширини (рис. 3.12) полиць призводить до пропорційного росту всіх видів енергії. Пояснюється це тим, що кількість та ширина полиць впливають на динаміку руху кусків в барабані шляхом збільшення частки агломерату, яка рухається водоспадним режимом, а отже, підвищуючи інтенсивність енергетичних навантажень.

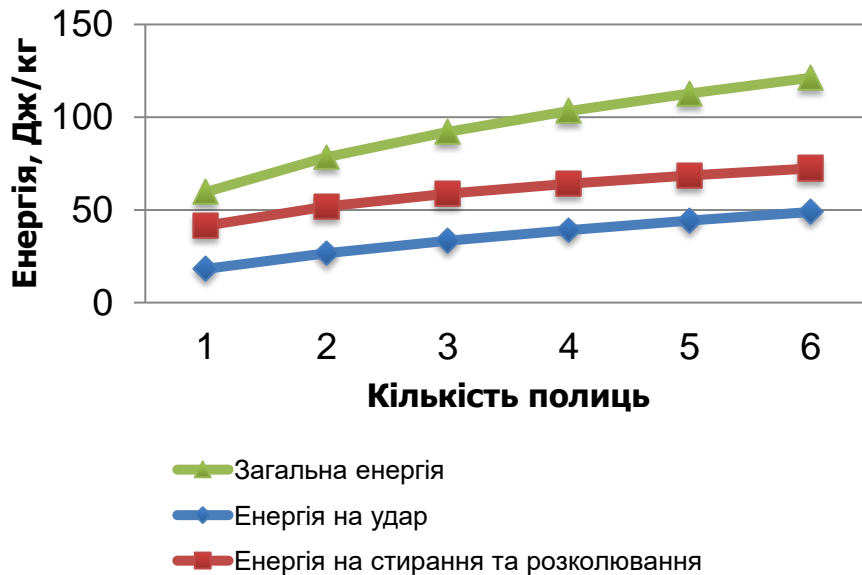


Рис. 3.11 – Вплив кількості полиць в барабані-стабілізаторі на величину та вид енергії навантаження

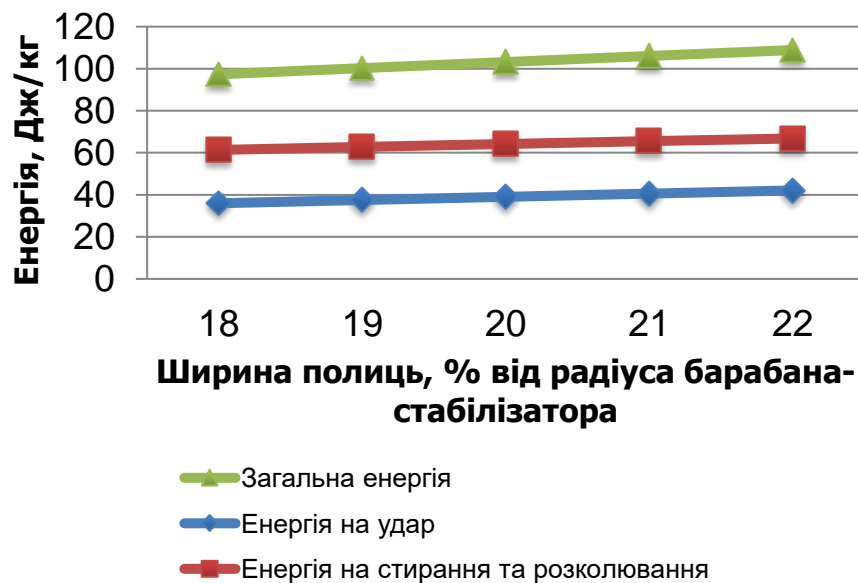


Рис. 3.12 – Вплив ширини полиць в барабані-стабілізаторі на величину та вид енергії навантаження

Як показано на рис. 3.13, зростання ступеня завантаження матеріалом барабана-стабілізатора в незначній мірі призводить до підвищення частки енергії стирання та розколювання. Це відбувається через збільшення кількості агломерату, що рухається водоспадним режимом.



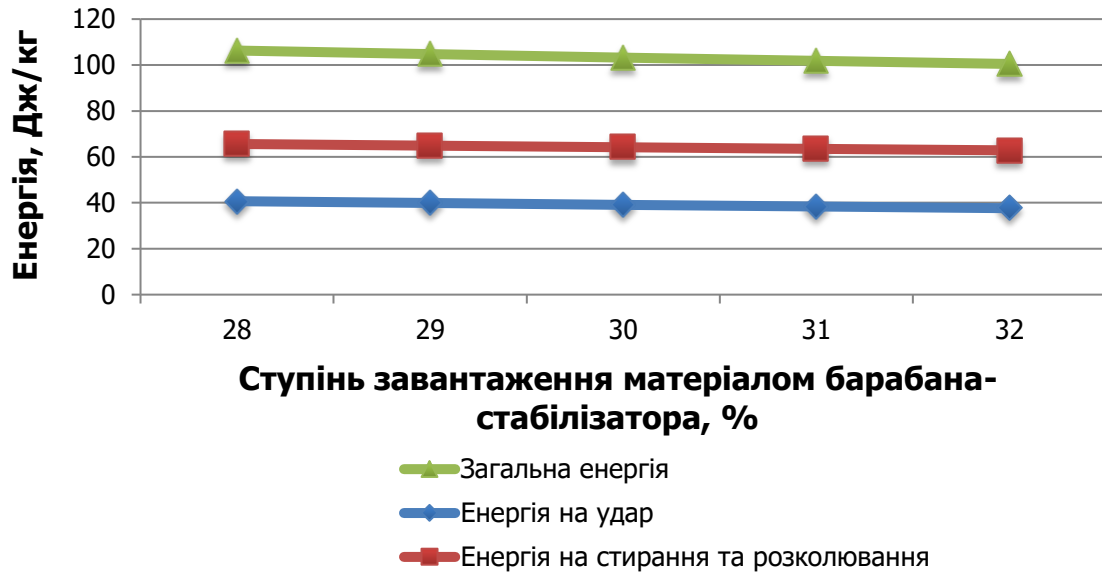


Рис. 3.13 – Вплив ступеня завантаження матеріалом барабана-стабілізатора на величину та вид енергії навантаження

Рекомендується заповнювати робочий простір барабана в межах 15-30%, оскільки з урахуванням ваги самого пристрою збільшується механічне навантаження на привід барабана.

Використання наведених рівнянь надає можливість обґрунтованого вибору раціональних параметрів конструкції пристрою барабанного типу.

Установлено, що для забезпечення оптимальної дії механічних навантажень у барабані (зменшення енергії та виду навантаження по ходу обробки), запропоновано виділити у пристрої три характерні зони з різним механізмом руйнування агломерату: дроблення - з максимальною необхідною величиною загальних та ударних навантажень (70-100 Дж/кг); стабілізації характеристик за крупністю при мінімальному утворенні дріб'язку за рахунок зменшення загальних та ударних навантажень (50-60 Дж/кг); стирання, яке має забезпечити мінімізацію ударних навантажень, з основною дією сил, які дозволяють видалити гострі виступи для надання агломерату кулястої форми (30-40 Дж/кг).

Створення робочих зон в барабані з метою зниження величини енергії руйнування можливе завдяки зміні кількості та ширини полиць в робочих зонах пристрою [110].

### 3.4 Експериментальна перевірка результатів моделювання і уточнення технологічних параметрів роботи барабана

Для перевірки ефективності запропонованих заходів в лабораторії кафедри металургії чавуну НМетАУ проведено експериментальне дослідження зміни гранулометричного складу спеченого агломерату крупністю більше 40 мм в дослідному барабані [111] діаметром 1 м, частотою обертання – 25 об/хв, обладнаному шістьма полицями шириною 21% від радіуса – 105 мм. Маса завантаженої проби агломерату – 15 кг..

У першому випадку (\*) кількість та ширину полиць залишали незмінною. У другому випадку (\*\*) для створення трьох робочих зон у дослідному барабані після хвилини обробки була проведена зміна кількості полиць до 3, а їх ширини – до 19% від радіуса барабана, а після подальших півтори хвилин обробки агломерату - кількість полиць зменшили з 3 до 1, а ширину - до 17% від радіуса барабана.

Зміну гранулометричного складу агломерату досліджували після кожної хвилини обробки шляхом просіювання на ситах, з отворами: 5, 10, 25, 40 мм та подальшого зважування отриманих фракцій.

Результати дослідження зміни крупності агломерату під час обробки у барабані з незмінною кількістю та шириною полиць (\*), та у барабані з робочими зонами (\*\*) представлені у табл. 3.6 [112] .

Як видно з табл. 3.5, в барабанах обох конструкцій основне руйнування крупних фракцій відбувається на початковому етапі механічної обробки. При цьому продуктами руйнування крупних кусків здебільшого є фракції крупністю більше 5 мм (5-10; 10–25; 25–40 мм). Фракція 0-5 мм утворюється в межах 10%, а фракція 10–25 мм - майже 50%. Наведений характер

руйнування свідчить про те, що саме на цьому етапі з крупних кусків починають виділятися більш міцні складові, якими є вищеназвані блоки. Основними причинами руйнування є високий рівень реалізації внутрішніх напружень і руйнування кусків по найбільшим порам та на контактах фаз.

Таблиця 3.6

Вплив механічної обробки агломерату в пристрої барабанного типу на його гранулометричний склад

Час обробки, хв.	Вміст фракції, %									
	0-5 мм		5-10 мм		10-25 мм		25-40 мм		40+ мм	
	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**
0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
1	10,23	10,4	13,62	13,3	45,74	43,9	21,05	22,24	9,36	10,16
2	14,20	13,35	17,4	16,9	45,8	46,2	16,78	16,42	5,82	7,13
3	16,35	15,0	22,1	21,8	48,47	48,7	8,5	9,3	4,58	5,2
4	21	18,05	22,3	22,1	46,17	47,8	6,3	7,45	4,23	4,6

При подальшій обробці агломерату характер руйнування кусків в барабанах дещо змінюється – крім фракції більше 40 мм починає руйнуватися фракція 25–40 мм. При цьому продуктами руйнування даної фракції є в основному куски крупністю 0-5 і 5-10 мм. Подальша механічна обробка призводить до стабілізації найбільш міцних фракцій 5-10 і 10-25 мм. Після 3 хвилин обробки відбувається небажане значне подрібнення спеченця з утворенням дріб'язку 0-5 мм, при відсутності суттєвого покращення його гранулометричного складу.

Зниження навантаження на куски спеченця, починаючи з другої хвилини обробки в барабані з робочими зонами (\*\*), призводить до зменшення кількості дріб'язку у порівнянні з барабаном без зменшення кількості та ширини полиць на 6-9% щохвилино. Вміст агломерату фракцією 5-10 мм

лишається на тому самому рівні, а вміст фракцій 10-25 мм, 25-40 мм, та в незначній мірі фракції більше 40 мм - збільшується.

Порівняння гранулометричного складу показало позитивний вплив використання барабана з різними робочими зонами на механічну обробку агломерату.

Завдяки результатам моделювання та експериментальних досліджень встановлено, що для забезпечення оптимальної механічної обробки та отримання агломерату, стабілізованого за міцністю та крупністю (5-40 мм), пристрій барабанного типу повинен мати наступні характеристики: радіус барабана – 1,25–1,75 м; частота обертання – 8-10 об/хв; кількість полиць – від 6 (1 зона), - 3-5 (2 зона) та - 0-2 (3 зона); ширина полиць - 20-22 % від радіуса барабана (1 зона), - 18-20% (2 зона) та - 16-18 % (3 зона); ступінь завантаження барабана – 15-30%; кут нахилу 4-6 град.; довжина барабана 7,5-10 м [113].

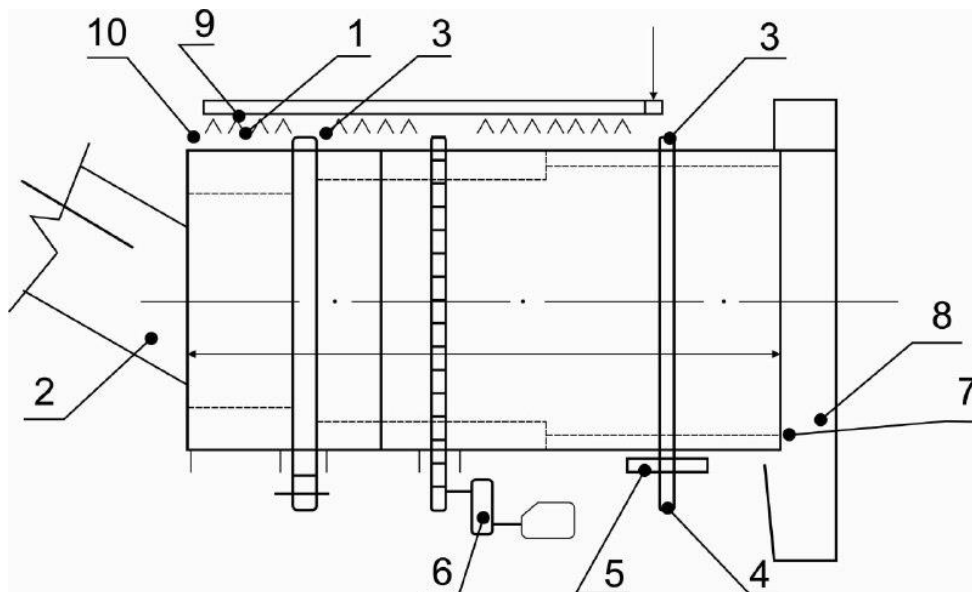


Рис. 3.14 – Схема барабана-стабілізатора: 1 - барабан, 2 - завантажувальна лійка, 3 - бандажі, 4 - опорні ролики, 5 - упорні ролики, 6 - привід, 7 - полиці, 8 - розвантажувальна камера, 9 - форсунки для зрошення пристрою водою, 10 - кільцеві ребра

Дана конструкція, схематично представлена на рис. 3.14, дозволяє

забезпечувати необхідний рівень початкових навантажень на агломерат в межах 70-100 Дж/кг з подальшим зменшенням енергетичних сил до 30 Дж/кг.

Це підтверджується розрахунком енергетичних навантажень на агломерат у барабані радіусом 1,25 м, частотою обертання – 9 об/хв, ступенем завантаження агломератом 30%, зміною в робочих зонах кількості полиць з 6 до 3 і 1, та їх ширини – з 21% до 19% і 17% від радіуса барабана, графічно представленим на рис. 3.15.

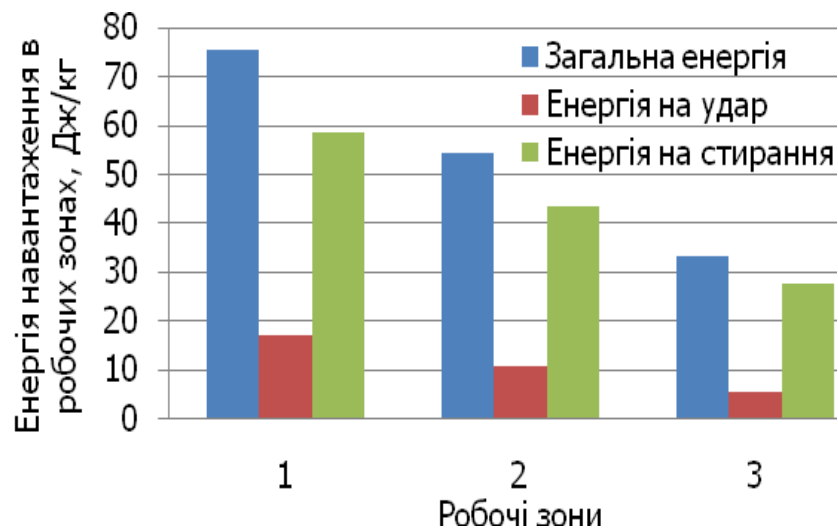


Рис. 3.15 – Залежність енергії руйнування від кількості та ширини полиць в робочих зонах барабана-стабілізатора

Окрім покращення якості агломерату, перевагою запропонованої схеми є те, що використання барабана-стабілізатора як пристрою для ефективної стабілізації та охолодження спеченця дає можливість зменшити кількість етапів та агрегатів механічної обробки, за рахунок втрати необхідності у холодильниках і додаткових грохотах, що позитивно вплине на зниження витрат на будівництво й експлуатацію агрегатів і витрати електроенергії.

### 3.5 Висновки по третьому розділу

1. Розроблена математична модель руйнування агломерату в пристрої барабанного типу. Визначені конструкційні та технологічні фактори, які

впливають на процес руйнування кусків в барабані: його радіус, частота обертання, кількість та ширина полиць, ступінь завантаження барабана матеріалом. Моделювання дозволило визначити характер впливу цих факторів на величину та вид енергії навантаження на агломерат.

2. Доведено, що для стабілізації агломерату за крупністю та міцністю в пристрої барабанного типу необхідно виділити три характерні зони з різним механізмом руйнування, шляхом зменшення величини та кількості полиць в них: дроблення - з максимальною необхідною величиною загальних та ударних навантажень; стабілізації характеристик за крупністю за рахунок зменшення ударних навантажень; стирання, яке має забезпечити мінімізацію ударних навантажень, з основною дією сил, які дозволять видалити гострі виступи для надання агломерату кулястої форми. Запропоновані оптимальні конструкційні та технологічні параметри барабана-стабілізатора, які дозволять забезпечувати необхідний рівень початкових навантажень на агломерат в межах 60-100 Дж/кг з подальшим зменшенням енергетичних сил до 30-40 Дж/кг агломерату.

## ОЦІНКА ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАБІЛІЗОВАНОГО АГЛОМЕРАТУ ТА ЇХ ВПЛИВ НА РОБОТУ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ

### 4.1 Порівняльний аналіз властивостей агломератів, отриманих за різними технологічними схемами

Оцінка ефективності розробленої технології визначалася шляхом порівняння характеристик агломерату, виготовлених за класичною та запропонованою схемою.

Дослідження проводили наступним чином. Першу пробу спікали 10 разів на установці для спікання в лабораторії кафедри НМетАУ після класичної схеми підготовки шихти для отримання вибірки 15 кг усередненого агломерату крупністю більше 10 мм, після чого спеченець проходив механічну обробку шляхом скидання з копра (який забезпечує ударні навантаження) та подальшим грохоченням [101].

Таблиця 4.1

Хімічний та гранулометричний склад агломерату після механічної обробки

Вид агломерату	Хімічний склад, %					
	Fe <sub>заг</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Основність
Класичний	55,8	13,1	11,3	9,28	0,63	1,28
Стабілізований	56,3	13,21	11	9,22	0,635	1,26

Другу пробу готували до спікання за запропонованою технологією підготовки шихти. Механічна обробка усередненої вибірки в 15 кг полягала у тому, що після скидання з копра, куски потрапляли в дослідний барабан з різними робочими зонами, і лише після цього проводилося грохочення.

Порівняння характеристик агломератів, отриманих за класичною та запропонованою технологією представлено у табл. 4.1-4.4 та на рис. 4.1.



Рис. 4.1 – Вид агломерату до (А) та після (Б) механічної обробки в дослідному барабані

Таблиця 4.2

Гранулометричний склад агломерату після механічної обробки

Вид агломерату	Гранулометричний склад, %				
	40+ мм	25-40 мм	10-25 мм	5-10 мм	0-5 мм
Класичний	16,3	18,2	28,5	19,2	17,8
Стабілізований	4,15	13,35	30,5	27,1	24,9

Таблиця 4.3

Гранулометричний склад агломератів після відсіву дріб'язку

Вид агломерату	Гранулометричний склад, %				
	40+ мм	25-40 мм	10-25 мм	5-10 мм	0-5 мм
Класичний	17.54	19.56	30.48	20.42	12
Стабілізований	5.35	16.99	39.18	34.48	4

Таблиця 4.4

Коефіцієнт форми кусків до та після стабілізації



Вид агломерату	Коефіцієнт форми				
	40+ мм	25-40 мм	10-25 мм	5-10 мм	0-5 мм
Класичний	0,78	0,82	0,84	0,86	0,91
Стабілізований	0,83	0,86	0,91	0,94	0,96

Як видно з результатів, агломерат, виготовлений за запропонованою технологією, характеризується: рівномірністю гранулометричного складу, збільшенням коефіцієнту форми кусків, реалізацією внутрішніх напружень, що дозволить запобігти подрібненню агломерату під час транспортування, зберігання та завантаження в доменну піч.

Збільшення вмісту дріб'язку в агломераті після обробки за запропонованою технологією на 7.1% компенсується збільшенням його міцності після спікання шихти, підготовленої з використанням заданого композита [101].

Після грохочення стабілізованого агломерату вміст дріб'язку в ньому складає близько 4%, у той же час як у класичного – 12% (табл. 4.2).

Проведено додаткове випробування на міцність агломератів, отриманих за класичною та запропонованою схемою підготовки, у стандартному барабані [111] та шляхом скидання за металеву плиту [114]. Результати представлені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5

## Показники міцності отриманих агломератів

Вид агломерату	Дослідження в барабані за ДСТУ 3200-95.		Дослідження скиданням за ДСТУ 3199-95.
	Міцність, %	Стирання, %	Міцність, %
Класичний	78	8	87
Стабілізований	89	3	97,5

Представлені результати доводять те, що отримані навантаження в

запропонованому барабані-стабілізаторі дозволяють виділити міцну складову спеченого продукту та уникнути подрібнення агломерату до потрапляння в доменну піч, на відміну від звичайного агломерату.

#### 4.2 Аналіз ефективності використання стабілізованого агломерату в доменній печі

Агломерат, отриманий за запропонованою технологією, є стабілізованим за крупністю, формою кусків, що дозволяє проводити більш якісний відсів дріб'язку. Також він характеризується кращими показниками міцності. Це створює умови для позитивного впливу такого компонента на газопроникність шихти в доменній печі.

В роботі [8] наведені результати досліджень впливу звичайного та стабілізованого агломерату на перепад тиску в шарі шихти. Вони представлені на рис. 4.2-4.4.

З наведених даних видно, що втрата тиску в шарі стабілізованого агломерату по всій висоті шару шихти менша, ніж при використанні звичайного (рис. 4.2), що пояснюється позитивними перевагами газодинамічних властивостей стабілізованого агломерату та зменшення частки утворення дріб'язку.

Перевагами стабілізованого агломерату є і те, що він утворює суміші з іншими матеріалами, які позитивно впливають на газодинаміку. В роботі показано, що використання суміші коксу зі стабілізованим агломератом призводить до зростання газопроникності цієї суміші (рис. 4.3).

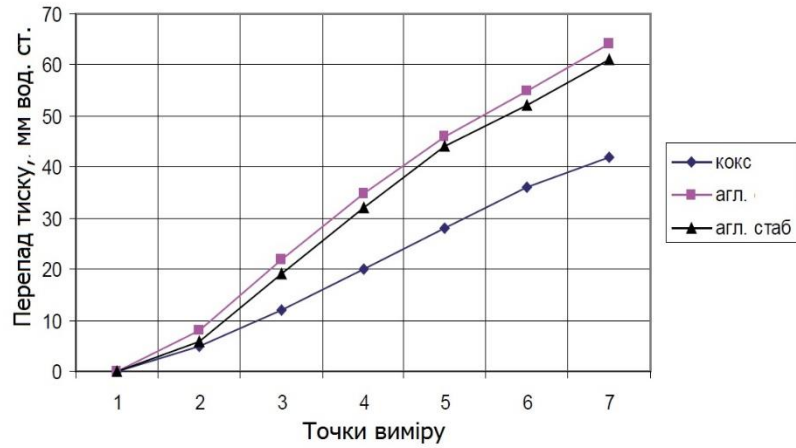


Рис. 4.2 – Залежність перепаду тиску газу в шарі однорідної шихти від виду матеріалу [8]

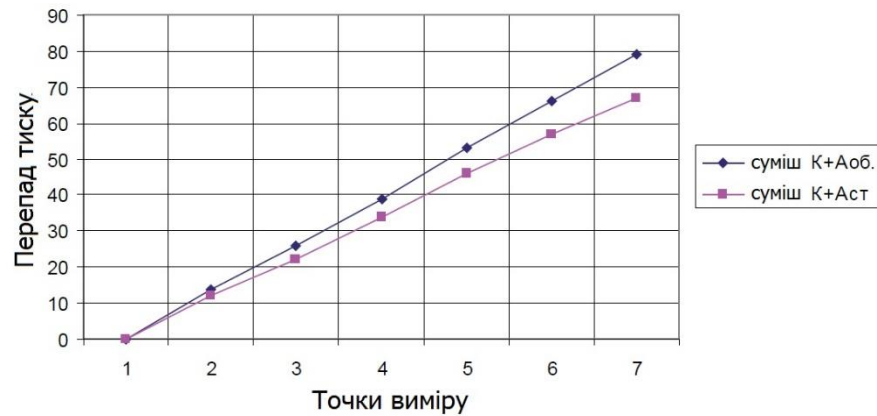


Рис. 4.3 – Втрати тиску газу в шарах сумішей коксу з різними агломератами [8]

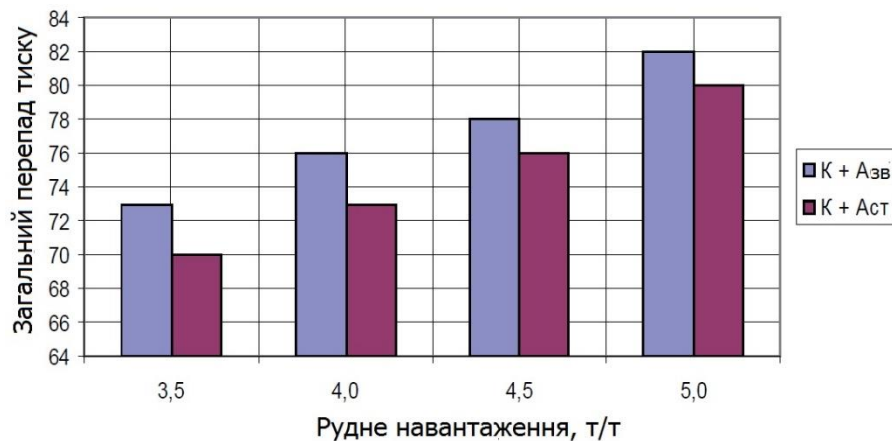


Рис. 4.4 – Порівняльна залежність загального перепаду тиску від рудного навантаження при використанні в шихті звичайного та стабілізованого агломератів [8]

Властивості стабілізованого агломерату позитивно впливають на характер його розподілу в печі. Більш рівномірний розподіл його по радіусу та окружності печі дозволяє збільшувати рудне навантаження (рис. 4.4) за рахунок зменшення питомої витрати коксу без погіршення газопроникності шару шихти, що призведе не лише до економії витрат на тверде паливо, а й збільшення продуктивності роботи доменних печей.

#### 4.3 Розрахунок очікуваного економічного ефекту запропонованих заходів

Для поліпшення показників роботи доменних печей запропоновано на етапі підготовки металургійної сировини до спікання використовувати роздільну підготовку шихти з використанням композиту заданого складу, а на етапі механічної обробки агломерату – барабана-стабілізатора із робочими зонами.

Розрахунки проводилися для умов роботи агломераційних і доменних цехів Придніпров'я, з розрахунком на річне отримання чавуну в базовому періоді у кількості 1000 тис. т.. Для забезпечення такого виробництва необхідно використати 1450 тис. т агломерату (при сумісному використанні 175 тис. т окатишів), собівартістю у базовому періоді 1085,68 грн/т.

Згідно з експериментальними даними, представленими у табл. 2.6-2.7, забезпечення роздільної підготовки шихти до спікання за запропонованою технологією призводить до збільшення виходу придатного агломерату на 10,25%.

Додаткові втрати з дріб'язком під час механічної обробки спеченого агломерату у барабані-стабілізаторі складають 7,1% по відношенню до агломерату, обробленого за класичною технологією.

Сумарний приріст кількості придатного агломерату, підготовленого запропонованою схемою обробки у порівнянні з класичною, складатиме 2,6% та зображений на рис. 4.5.

Запропоновані заходи за рахунок збільшення кількості придатного

агломерату дозволяють зменшити його собівартість на 2,6% - з 1085,68 грн/т до 1058,16 грн/т.

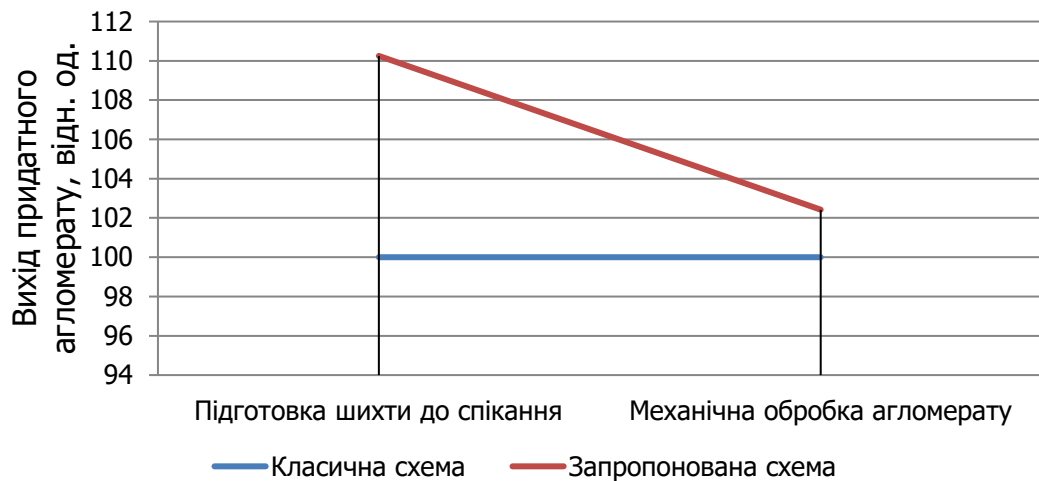


Рис. 4.5 – Співвідношення виходу придатного агломерату в залежності від схеми його отримання

Вартість реконструкції агломераційного цеху та відділу механічної обробки (включаючи вартість устаткування, матеріалів і будівельно-монтажних робіт), за даними «УКРДІПРОМЕЗ» становить 90000,0 тис. грн.

У зв'язку з уведенням у дію нових основних фондів істотно зростуть витрати по статтях «Поточний ремонт і втримування основних коштів» і «Амортизація основних коштів».

Їхні проектні величини ( $PP_{пр}$ , і  $A_{пр}$ ) можна визначити по формулах:

$$PP_{пр} = (PP_{б.} * Q_{б.} + 0,1 * KB) / Q_{пр.}, \text{ грн./т}, \quad (4.1)$$

$$A_{пр.} = (A_{б.} * Q_{б.} + 0,15 * KB) / Q_{пр.}, \text{ грн./т}, \quad (4.2)$$

де  $PP_{б.}$ ,  $A_{б.}$  - базові значення даних статей калькуляції (див. табл. 4.4), грн./т;  
 $Q_{б.}$ ,  $Q_{пр.}$  - базовий і проектний об'єми виробництва агломерату, т;  
 0,1- частка витрат на поточний ремонт і втримування основних коштів від загальної суми капіталовкладень;  
 0,15 - норма амортизації;

КВ - величина капіталовкладень, тис. грн..

$$ПР_{пр} = (5,15 * 1450000 + 0,1 * 90000000) / 1487700 = 11,07 \text{ грн/т}$$

$$А_{пр} = (0,57 * 1450000 + 0,15 * 90000000) / 1487700 = 9,63 \text{ грн/т}$$

Собівартість агломерату з урахуванням усіх факторів впливу запропонованої технології складатиме 1073,14 грн/т чавуну. Це на 1,155% менше вартості агломерату, підготовленого за стандартною технологією.

Отже, використання запропонованих заходів призведе не лише до покращення якості агломерату, що позитивно відобразиться у доменному виробництві, а й до зниження його собівартості.

Річний прибуток від зменшення собівартості може бути визначений за формулою:

$$П = (C_б - C_{пр}) * Q_{пр} = (1085,68 - 1073,14) * 1450000 = 18183000 \text{ (грн.)}; \quad (4.3)$$

Економічний ефект може бути визначений по наступній формулі:

$$E_ф = (C_б - C_{пр}) * Q_{пр} - E_H * КВ \quad (4.5)$$

де  $C_б$  – базова собівартість, грн/т;

$C_{пр}$  – проектна собівартість, грн/т;

$Q_{пр}$  – об'єм виробництва за проектом, т;

$E_H$  – граничний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень (орієнтовно 0,15);

КВ - сума капітальних вкладень, грн;

$$E_ф = (1085,68 - 1073,14) * 1450000 - 0,15 * 90000000 = 4683000 \text{ (грн.)}$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$E_p = (C_{\text{б}} - C_{\text{пр}}) * Q_{\text{пр}} / \text{INV} \quad (4.6)$$

де  $C_{\text{б}}$  – базова собівартість, грн/т;

$C_{\text{пр}}$  – проектна собівартість, грн/т;

$Q_{\text{пр}}$  – об'єм виробництва за проектом, т;

$\text{INV}$  – загальна вартість інвестицій.

$$E_p = (1085,68 - 1073,14) * 1450000 / 90000000 = 0,202$$

$E_p > E_n$  – проект капітальних вкладень є доцільним.

Строк окупності капіталовкладень (Т) складе:

$$T = 1/E_p = 1/0,202 = 4,95 \text{ років} \quad (4.7)$$

Проведена реконструкція позитивно вплине на техніко-економічні показники роботи агломераційного цеху, а саме:

- річний об'єм виробництва агломерату зростає на 2,6% і складе за проектом 1487700 т;
- собівартість агломерату знизиться на 1,155% і становитиме 1073,14 грн/т чавуну;
- термін окупності капіталовкладень у сумі 90 млн. грн. становить 4,95 років.

Проведені дослідження показали, що використання цієї схеми виробництва агломерату дозволить зменшити вміст дрібної фракції з 12 до

4%, що призведе до зниження питомої витрати коксу в доменній печі на 4%, та збільшення її продуктивності на 8%, з урахуванням того, що зниження вмісту дрібної фракції агломерату на 1%, призводить до зменшення питомої витрати коксу на 0,5%, та до підвищення продуктивності роботи доменних печей на 1%.

Отже, позитивний економічний ефект від виробництва стабілізованого агломерату додатково поліпшується через використання його в доменній печі, дозволяючи знизити собівартість чавуну за рахунок кращих металургійних властивостей отриманого матеріалу.

#### 4.4 Висновки по четвертому розділу

1. Підтверджено, що використання розробленої комплексної технологічної схеми отримання агломерату, стабілізованого за крупністю та міцністю, дозволить зменшити вміст дріб'язку в ньому з 12 до 3-4% без збільшення кількості звороту, покращити хімічний склад та коефіцієнт форми кусків, що позитивно впливає на порозність і газопроникність шару шихти, в якій використовується такий матеріал. Його використання в доменному виробництві призведе до зниження питомої витрати коксу на виплавку чавуну на 4%, та збільшення продуктивності доменній печі на 8%.

2. Проведена реконструкція позитивно вплине на техніко-економічні показники роботи агломераційного цеху, а саме:

- річний об'єм виробництва агломерату зростає на 2,6% і складе за проектом 1487700 т, а собівартість агломерату знизиться на 1,155% і становитиме 1073,14 грн/т чавуну;
- термін окупності капіталовкладень у сумі 90 млн. грн. становить 4,95 років.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

*В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача отримання якісного агломерату, стабілізованого за крупністю та міцністю, яка полягає в розробці технології спікання агломерату з шихт, що включають попередньо підготовлені композити заданого складу та властивостей, та механічної обробки, яка дозволяє виділяти міцні компоненти зі спеченого продукту.*

1. На основі літературних даних показано, що отримання якісного агломерату, стабілізованого за крупністю та міцністю, є комплексною задачею, вирішення якої включає формування блокової структури з оптимальним мінералогічним складом міжблокової зв'язки на етапі підготовки шихти до спікання та ефективний спосіб механічної обробки спеченця.

2. На основі термодинамічного аналізу семикомпонентної системи, яка відповідає складу агломераційної шихти, розроблена пропозиція щодо формування міцної міжблокової зв'язки, яка складається переважно з залізокальцієвих олівінів та феритів кальцію. Запропоновано з вихідної шихти формувати дві складові: композит основністю 0.9-1.0 од. для появи максимальної кількості залізокальцієвих олівінів в агломераті, та залишкову шихту основністю 1.6-1.7 од., для появи у зв'язці феритів кальцію.

3. Доведено, що роздільна підготовка шихти з використанням композитів на основі концентрату дозволяє отримувати більш однорідний гранулометричний склад сирих гранул, завдяки створенню умов ефективної взаємодії матеріалів при зволоженні та грудкуванні, та створює можливість оптимального розподілу флюсів у шихті, що дозволяє формувати між блокову зв'язку заданого складу та властивостей.

4. Підтверджено, що найкращі показники якості спеченого агломерату досягаються шляхом підготовки шихти до спікання, який передбачає

розподілення компонентів на дві частини: першу – композит основністю 0,9-1,0 од. із концентрату (крупністю 0-3 мм), залізної руди (0-3 мм), вапна (0-3 мм) та вапняку (0-3 мм); другу - залишкову шихту основністю 1,6-1,8 од. із залізної руди (3-10 мм), звороту (0-10 мм) та вапняку (0-3 мм); кожна з яких дозується, зволожується та змішується, а перша частина додатково грудкується, після чого вони спільно гранулюються з додаванням наприкінці твердого палива, крупністю 0-7 мм. Виробництво агломерату після грудкування запропонованим способом характеризується збільшенням виходу придатного агломерату на 10,29 %, збільшенням виходу фракції +5 мм на 11,5% після випробування на міцність та зменшення вмісту фракції 0-5 мм на 11,5%. (Отримано Патент України на корисну модель)

5. Визначені основні вимоги для ефективної стабілізації агломерату за гранулометричним складом і міцністю під час механічної обробки: спільна дія сил удару, стирання та розколювання; зменшення енергії навантаження по ходу обробки зі 100 до 30-40 Дж/кг зі зменшенням крупності самих кусків.

6. Розроблена математична модель руйнування агломерату в пристрої барабанного типу. Визначені конструкційні та технологічні фактори, які впливають на процес руйнування кусків в барабані: його радіус, частота обертання, кількість та ширина полиць, ступінь завантаження барабана матеріалом. Моделювання дозволило визначити характер впливу цих факторів на величину та вид енергії навантаження на агломерат.

7. Доведено, що для стабілізації агломерату за крупністю та міцністю в пристрої барабанного типу необхідно виділити три характерні зони з різним механізмом руйнування, шляхом зменшення величини та кількості полиць в них: дроблення - з максимальною необхідною величиною загальних та ударних навантажень; стабілізації характеристик за крупністю за рахунок зменшення ударних навантажень; стирання, яке має забезпечити мінімізацію ударних навантажень, з основною дією сил, які дозволять видалити гострі виступи для надання агломерату кулястої форми. Запропоновані оптимальні конструкційні та технологічні параметри барабана-стабілізатора, які

дозволять забезпечувати необхідний рівень початкових навантажень на агломерат в межах 60-100 Дж/кг з подальшим зменшенням енергетичних сил до 30-40 Дж/кг агломерату. (Отримано Патент України на корисну модель)

8. Підтверджено, що використання розробленої комплексної технологічної схеми отримання агломерату, стабілізованого за крупністю та міцністю, дозволить зменшити вміст дріб'язку в ньому з 12 до 3-4% без збільшення кількості звороту, покращити хімічний склад та коефіцієнт форми кусків, що позитивно впливає на порозність і газопроникність шару шихти, в якій використовується такий матеріал. Використання даного агломерату в доменному виробництві призведе до зниження питомої витрати коксу на виплавку чавуну на 4%, та збільшення продуктивності доменній печі на 8%.

1. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. *Металлургия чугуна.* - Киев: Вища школа, 1970. - 488 с.
2. Тарасов В.П. *Газодинамика доменного процесса.* - М.: Metallurgia, 1982. - 224 с.
3. Готлиб А.Д. *Доменный процесс.* - М.: Metallurgia, 1966. - 510 с.
4. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С. *Металлургия чугуна.* М.: Metallurgia, 1978. - 480 с.
5. Лялюк В.П. *Опыт использования высококачественного окускованного железорудного сырья в доменной плавке / В.П.Лялюк, В.А.Шеремет, А.К.Тараканов и др.// Metallургическая и горнорудная промышленность.* - 2010.-№6. -С. 6-9.
6. Лялюк В.П. *Главное направление инновационного совершенствования доменной технологии – использование одного вида железорудного сырья, сочетающего лучшие свойства агломерата и окатышей / В.П.Лялюк, А.К.Тараканов, Журавлев Ф.М., Кассим Д.А., Чупринов Е.В. // Сталь. – 2018.- №1. - С. 6-11.*
7. Гиммельфарб А.А., Котов К.И. *Процессы восстановления и шлакообразования в доменных печах.* - М.: Metallurgia, 1982.- 328 с.
8. Бочка В.В., Куприков Р.А., Сулименко С.Е., Вылупко Е.Е. *Влияние предварительной механической обработки агломерата на газопроницаемость столба шихты в доменной печи, Metallургическая и горнорудная промышленность.* - 2012. - № 3. - С. 8-11.
9. Чернавин А.Ю., Нечкин Г.А., Чернавин Д.А., и др. *Моделирование поведения шихтовых материалов в нижней части доменной печи. Сталь №5,* 2010. С. 20-23.
10. Дворниченко И.Ф. *Сравнительная характеристика металлургических свойств агломерата и окатышей разных предприятий / Дворниченко И.Ф, Журавлев Ф.М., Астафьев В.Д. и др. // Сталь. – 1986. – №10. – С. 21-23.*

11. Журавлев Ф.М., Лялюк В.П., Кассим Д.А., Ляхова И.А., Чупринов Е.В. Окискованный, полностью офлюсованный железорудный материал для доменной плавки с лучшими металлургическими характеристиками агломерата и окатышей. Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015;(1):31-39.
12. Потебня Ю.М., Толстунов В.Л., Рихтер Р.Г. Исследование механизма разрушения агломерата при нагреве в условиях, близких к наблюдаемым в доменной печи//Сталь.-1979.-№4.-с.248-250.
13. Балон И .Д. Фазовые превращения материалов при доменной плавке./ Балон И .Д., Буклан И.З. Муравьев и др. -М.:Металлургия. 1984.-152с.
14. Томаш, А.А. Изменение порозности многокомпонентной доменной шихты при размягчении /А.А. Томаш, В.П. Тарасов, В.Б. Семакова, А.В. Зотов // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 1999. – Вып. 8. – С. 9-14.
15. Гаврилко, С. А. Исследование размягчаемости восстановленного агломерата различных фракций / С. А. Гаврилко, А. А. Киселев, Г. А. Громак и др. // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2009. – Вип. (3) 29. – С. 1-6.
16. Б.М. Старшинов та ін. - Сталь 1970, №11. с.974-979.
17. Петерс К. Х., Бееп Г., Беппер Э. и др. Получение и переплав агломерата с низким содержанием кремнезема // Черные металлы. 1989. №22. С. 11-18.
18. Хопунов Э.А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья. Екатеринбург: УИПЦ, 2013. 429 с.
19. Вегман Е.Ф., Крахт Л.Н. Некоторые итоги исследования блочной текстуры железорудного агломерата, Изв. ВУЗ-ов ЧМ 9, 1983, 11-18 стр.
20. Похвиснев А.Н., Шаров С.И., Вегман Е.Ф. и др.. – «Сталь», 1969, №10, с. 873-877.
21. Вегман Е.Ф. Исследование структуры агломерата. Бюлл. инст. Черметинформация, 1966, № 23, с.38-39.

22. Миллер В. Я. Исследование прочности агломерата. Текст. / В. Я. Миллер, С. В. Базилевич [и др.] // Сталь. 1961. -№ 9. - С. 769-777.
23. Сова А. В. Дослідження причин утворення внутрішнього напруження в агломераті, та пошук оптимальної енергії руйнування спеченця / А. В. Сова, В. В. Бочка, А. В. Двоєглазова та ін. // 43-тя Міжнародна науково-технічна конференція молоді. – 2016. – С. 17.
24. Браутман Л. Разрушение и усталость. – М.: Metallurgy, 1978. – 483 с.
25. Алексеева Н.П., Кашин В.В. К оценке влияния на прочность агломерата микроструктурных напряжений, возникающих при его спекании. Сообщ. 1//Изв.вузов. Черная металлургия.-1978.-№8.-с.29-31.
26. Алексеева Н.П., Кашин В.В. Влияние некоторых факторов на структурные напряжения. Сообщ. 2//Изв.вузов. Черная металлургия.-1978.-№6.-с.17-19.
27. Бочка В.В. Особенности формирования напряженного состояния и разрушения агломерата / В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова и др. // Металл и Литьё Украины. – 2017. - №6-7. – С. 1-4.
28. Ковалев Д. А., Теоретические основы производства окускованного сырья: учебное пособие для высших учебных заведений / Д.А. Ковалёв, Н.Д. Ванюкова, В.П. Иващенко, Б.П. Крикунов, М.В. Ягольник, М.Н. Бойко – НМетАУ. – Днепропетровск: ИМА-пресс. – 2011. – 476 с.
29. Лившиц Б.А., Васильев Г.С. Исследование механических свойств основных компонентов железорудных агломератов / Б.А. Лившиц, Г.С. Васильев // Известия-ВУЗов 1964 г, №6 .-с.23-25;
30. Васильев Г.С., Лившиц Б.А. О прочности минеральных фаз железорудных материалов//Изв.вузов. Черная металлургия.-1982.-№10.-с.6-8.
31. Иванов А.И. Исследование свойств агломерата с различной основностью / Иванов А.И., Самойленко Л .В.Горова О.Н./ Известия вузов.Черная металлургия. -1988. -№1.- с.7-10.

32. Алексеева Н.П. Влияние основности агломерата на структурные напряжения. Сообщение 1. / Алексеева Н.П., Кашин В.В. и др. // Известия вузов. Черная металлургия.-1978.-№4.-с.26-28.
33. Дорофеев В.Н., Ровенский И.И., Русанов И.Ф. Исследование свойств агломерата разной основности. // Известия вузов.Черная металлургия.-1982.-№3.-с. 15-17.
34. Малышева Т.Я. Влияние минералогического состава связок на прочностные свойства агломератов различной основности / Т.Я. Малышева, Р.М. Павлов // Известия Высших Учебных Заведений. Черная Металлургия. 2012; 55(11): С. 6-10.
35. Малышева Т.Я. Механизм минералообразования и металлургические свойства агломератов основности 1,1 - 3,1 в условиях ММК / Т.Я. Малышева [и др.] // Сталь. – 2007. – №2. – С. 19-22.
36. Иванов А.И., Самойленко Л.В., Горовая О.Н. Исследование свойств агломерата с различной основностью // Изв.вузов. Черная металлургия.-1988.-№1.-с.7-10.
37. Алексеев Л.Ф., Горбачев В.А., Майзель Г.М. Исследование напряжений в системе гематит феррит кальция//Изв. вузов. Черная металлургия.-1979.-№10.-с.22-24.
38. Алексеев Л.Ф., Горбачев В.А., Майзель Г.М. Исследование напряжений в системе магнетит фаялит//Изв. вузов. Черная металлургия.-1979.-№6.-с.13-16.
39. Малышева Т.Я., Лядова В.Я. О механизме формирования железорудного агломерата// Изв. вузов. Черная металлургия.-1983.-№9.-с. 19-21.
40. Коротич В.И., Каплун Л.И. По поводу теории блочной текстуры агломерата// Изв. вузов. Черная металлургия.-1983.-№9.-с. 26-29.
41. Коротич, В. И. Микронеоднородность структуры железорудных агломератов. Текст. / В. И. Коротич, В. Т. Баранов [и др.] // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1968. - № 8. - С. 39-44.

42. Шурхал В.А. О блочной структуре железорудного агломерата// Изв. вузов. Черная металлургия.-1983.-№9.-с. 22-26.
43. Cheng, Z., Yang, J., Zhou, L., Liu, Y., & Wang, Q. (2016). Sinter strength evaluation using process parameters under different conditions in iron ore sintering process. *Applied Thermal Engineering*, 105, 894–904. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.03.034
44. Lu, L., & Ishiyama, O. (2015). Iron ore sintering. *Iron Ore*, 395–433. doi:10.1016/b978-1-78242-156-6.00014-9
45. Сулименко С.Е. Перспективные направления создания экологически чистой технологии получения агломерата повышенного качества в современных условиях. Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Днепропетровск, 2014, - Выпуск 4 (93), с. 32-38.
46. Коротич В.И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке.-М: Металлургия. 1978.-208 с.
47. Ефименко Г.Г. Теоретические основы и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке / Ефименко Г.Г. Симонов О.А., Губанов В.И. и др.//Бюллетень "Черная металлургия". МЛ-1981.-№2.-с. 12-27.
48. L. Lu. Important iron ore characteristics and their impacts on sinter quality – a review. *Minerals & Metallurgical process*, 2015, 32, 88-96.
49. Litster, J.D., Waters, A.G., 1990. Kinetics of iron ore sinter feed granulation. *Powder Technol.* 62, 125–134.
50. O. Komatsu, H. Noda, H. Fukuyo, N. Sakamoto, Evaluation of granulation characteristics and properties of quasi-particles using a large amount of iron ore fines, *CAMP-ISIJ* 5 (1992) 1042–1045.
51. Малыгин А.В. О получении однородного гранулометрического состава агломерационной шихты из тонкоизмельченных материалов / А.В.Малыгин, Л.И. Александров// Изв. Вузов. Черная металлургия. -1986. № 5. - с. 14-18.
52. Oliveira, V. de M., Resende, V. G. de, Domingues, A. L. A., Bagatini, M. C., & Castro, L. F. A. de. (2019). Alternative to deal with high level of fine materials in



iron ore sintering process. *Journal of Materials Research and Technology*. doi:10.1016/j.jmrt.2019.07.032

53. Han, H., & Lu, L. (2017). Recent advances in sintering with high proportions of magnetite concentrates. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 39(4), 217–230. doi:10.1080/08827508.2017.1415206

54. Komatsu, O., Noda, H., Fukuyo, H., Sakamoto, N. (1992). *CAMP-ISIJ*, 5, 1042-1045.

55. Попов Г.Н., Плетнев М.В., Капуста А.И. Селективная грануляция агломерационной шихты. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*, 1983, № 3, с. 11-14.

56. Пазюк М.Ю., Гранковский В.И., Выбор рациональных параметров цилиндрического окомкователя, *Известия ВУЗов. Черная металлургия*, 1982, № 10, с. 30-33.

57. Коротич, В. И. Исследование твердофазного спекания железорудных материалов. Текст. / В. И. Коротич, В. Т. Баранов // *Известия АН СССР. Металлы*. 1968. -№ 4. - С. 10-15.

58. Вегман Е.Ф. Агломерация / Е. Ф. Вегман Е.Ф, С. В. Базилевич. // *Металлургия*. – 1967 г. – 368 С.

59. Беляков В.Н. Напряженное состояние и характер разрушения железорудного агломерата / В.Н. Беляков, В.А. Горбачев, Ю.А. Кабанов, А.В. Малыгин, Т.В. Сапожникова, С.В. Шаврин // *Изв.вузов. Черная металлургия*.- 1988.-№6.-с.7-

60. Исследование прочности агломерата в зависимости от режима его охлаждения./ Базилевич С.В., Башков В.А., Базилевич Т.Н., Гриценко Г.Б. // *Сталь*.-1966.-№ 10.-С.873-878.

61. Бочка В.В. Вдосконалення технології агрегатів для механічної обробки спеку/ В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова та ін. // 41-ша Міжнародна науково-технічна конференція молоді. – 2014. – С. 16.

62. Малыгин А.В. Формирование гранулометрического состава агломерата при механической обработке спека/ А.В. Малыгин, Э.А. Хопунов и др. // Сталь. 1990. - № 8. - с. 6-11.
63. Фридман Я. Б., Прочность и деформация в неравномерных температурных полях. Сборник научных работ под. ред. Я.Б. Фридмана. М., Госатомиздат, 1962, с. 3-29.
64. Коморников Г.И., Коротич В.И., Александров Л.И., Малыгин А.В., Каплун Л.И. Анализ работы барабанных окомкователей при окомковании тонкозернистых шихт// Сталь.-1977.-№8.-с. 685-688.
65. Романенко В.П. Технология двухстадийного окомкования агломерационной шихты / В.П. Романенко, Г.Н. Попов // республиканская научно-техническая конференция «Теоретические основы и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке, Днепропетровск, 1980, с. 13-15.
66. Коршиков Г.В. Влияние способа подачи топлива, его вида и крупности на показатели процесса спекания из руд КМА. Сообщение 1 / Г.В. Коршиков, С.И. Шаров, Г.Г. Лукашов и др. // Изв. вузов. Чёр. металлургия. - 1971. -№ 6. - С. 39-42.
67. Коршиков Г.В. Влияние способа подачи топлива, его вида и крупности на показатели процесса спекания концентрата КМА. Сообщение 2 / Г.В. Коршиков, С.И. Шаров, Г.Г. Лукашов и др. // Изв. вузов. Чёр. металлургия. - 1971. - № 8. - С. 37 - 39.
68. Вылупко Е.Е. Получение окускованного железорудного материала блочно-ячеестого строения / Е.Е. Вылупко, Н.В. Игнатов, О.В. Губа, В.А. Усенко, А.П. Белова // “Сучасні проблеми металургії”, № 14, – 2011 г, ст. 50-57.
69. Ефименко Г.Г. Влияние способа подачи топлива разных видов на показатели процесса агломерации / Г.Г. Ефименко, С.ГТ. Ефимов, А.К. Рудков и др. // Сталь. - 1976. -№ 3. - С. 200-204.

70. Колокольцов, Б.И. Накатывание топлива на гранулы агломерационной шихты / Б.И. Колокольцов, П.А. Ляхов, В.И. Кретинин // *Металлург.* - 1979. - № 1.-С. 9-11.
71. Коршиков Г.В. Опыт освоения подачи топлива в конце окомкования на Новолипецком металлургическом заводе / Г.В. Коршиков, С.П. Ефимов, Е.В. Невмержицкий и др.//*Сталь.*-1981.-№ 10.-С. 17-20.
72. Худяков А.Ю., Бойко М.Н., Баюл К.В., Ващенко С.В., Полякова Н.В., Петренко В.И. Альтернативные способы грануляции тонкоизмельченных железорудных концентратов. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.* 2018;1(1):48-53.
73. Кривенко С. В. Рациональное распределение флюса по высоте агломерируемого слоя / С. В. Кривенко, Г. Г. Божков // *Металл и литье Украины.* - 2015. - № 6. - С. 23-25.
74. N. Sakamoto, A. Kumasaka, O. Komatsu, M. Shimizu and H. Noda: Proc. 5th Int. Symp. on 'Agglomeration', Brighton, UK, September 1989, The Institution of Chemical Engineers (IChemE), 269–278.;
75. Sakamoto N., Kumasaka A. The development of the hybrid pelletised sinter (HPS) process. - *NKK Technical Review*,1989. - №57.- С. 65-73.
76. Jiang, T., Li, G. H., Wang, H. T., Zhang, K. C., & Zhang, Y. B. (2010). Composite agglomeration process (CAP) for preparing blast furnace burden. *Ironmaking & Steelmaking*, 37(1), 1–7. doi:10.1179/174328109x462995;
77. T. Jiang, G. Li, Y. Hu, K. Zhang, J. Wu, Z. Huang, X. Fan, D. Zhu, Y. Zhang, B. Xu, Y. Guo, Y. Yang, H. Dong, M. Liu, J. Pan, Z. Zhu and H. Wang: Patent number(s) CN200510032095•6.;
78. G. Li, T. Jiang, X. Fan, Y. Guo, B. Xu, Y. Yang, Z. Zhu, Y. Zhang, M. Liu, H. Dong, Z. Huang and Y. Chen: Patent number(s) CN200710034842•9
79. В.Я. Борщев. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учебное пособие, Тамбов: издательство Тамбовского Государственного Технического Университета, 2004. 75 с.

80. Кольга А.Д., Айбашев Д.М. Возможности снижения нагрузок в щековых дробилках // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. Магнитогорск. 2013. № 4. С. 77-80.
81. Л.Р. Мигуцький, А.Н. Лихорадов, Д.М., Малюта та ін. Досвід одержання стабілізованого сортованого агломерату і проведення дослідної доменної плавки на ньому, є наведені в роботі - Бюлетень ЦНІІЧМ, №18 (516) , 1965, с.4-6.
82. Суліменко С.Є. Стабілізатор гранулометричного складу агломерату / С.Є. Суліменко, В.І. Верещак, В.В. Бочка, М.В. Ігнатов, В.М. Ковшов, В.О. Петренко // Патент України № 26446, МПК С22В 1/26, опубліковано: 25.09.2007
83. Бочка В.В. Дослідження особливостей взаємодії кусків агломераційного спеченця в барабані-стабілізаторі / В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова та ін. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2016. - №5. – С. 8-11.
84. Бочка В.В. Стабілізатор гранулометричного складу гарячого агломерату / В.В. Бочка, Р.О. Купріков, В.М. Ковшов, С.Є. Суліменко // Патент України на корисну модель № 72711, 2012 р.
85. HSC Chemistry 5.1 software, Finland.
86. Семиохин И. А. Физическая химия / И. А. Семиохин. – Москва: МГУ, 2001. – 272 с.
87. Іващенко О.Д. Хімія і методи дослідження сировини та матеріалів: Навч. посіб. Рекомендовано МОН / Іващенко О.Д., Нікозять Ю.Б., Дмитренко В.І. — К., 2011. — 606 с.
88. Герасимов А.Г. К вопросу о влаге в агломерационной шихте // *Сталь*, №12, 1952 г.
89. Коморников Г.И., Коротич В.И., Александров Л.И., Малыгин А.В., Каплун Л.И. Анализ работы барабанных окомкователей при окомковании тонкозернистых шихт // *Сталь.*-1977.-№8.-с. 685-688.

90. Бочка В.В. Удосконалення технології виробництва якісного агломерату / В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова, М.О. Ващенко // VIII Міжнародна науково-практична конференція «Металлургия 2019», м. Запоріжжя, 21-23 травня, ст. 256-257.
91. Бочка В.В. Особливості спікання агломерату при використанні шихти з попередньо підготовленими композитами / В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова та ін. // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. – 2019. - №22. – С. 3-12.
92. Сова А.В. Вплив роздільного огрудкування шихти на якість агломерату / А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В. Двоєглазова, М.В. Ягольник // 45 Міжнародна науково-технічна конференція молоді, м. Запоріжжя - 2018. – С. 19.
93. Kieush, L., Yaholnyk, M., Boyko, M., Koveria, A., Ihnatenko, V. (2019). Study of biomass utilization in the iron ore sintering. Acta Metallurgica Slovaca, 25, 1, 55-64. DOI: 10.12776/ams.v25i1.1225
94. Бочка В.В. Улучшение качества агломерата путем усовершенствования способа подготовки шихты / В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В. Двоєглазова // Металли и Литьё Украины. – 2019. - №1-2. – С. 3-10.
95. Пјана, М., Кемppainen, А., Раananen, Т., Mattila, О., Pisilä, Е., Kondrakov, М., & Fabritius, Т. (2015). Effect of adding limestone on the metallurgical properties of iron ore pellets. International Journal of Mineral Processing, 141, 34–43. doi:10.1016/j.minpro.2015.06.004
96. Бочка В.В. Спосіб підготовки агломераційної шихти до спікання. Патент на корисну модель №136868 Україна // В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В. Двоєглазова, М.В. Ягольник, М.М. Бойко.
97. Бочка В.В. Удосконалення технології виробництва якісного агломерату / В.В. Бочка, А.К. Тараканов, А.В. Сова, М.М. Бойко, М.В. Ягольник, А.В. Двоєглазова // Теорія і практика металургії. – 2019. - №1. – С. 5-14. doi:10.34185/tpm.1.2019.01

98. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу / Л. И. Миркин. – Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. – 864 с.
99. Сова А.В. Вдосконалення конструкції завантажувального пристрою для барабану-стабілізатора/ А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В.Двоєглазова та ін. // V Міжнародна науково-практична конференція «Металлургия. Литьє 2016». – 2016. – С. 418.
100. Суліменко С.Є. Барабан-стабілізатор із завантажувальним пристроєм. Патент на корисну модель №100418 Україна // С.Є. Суліменко, В.В. Бочка, Є.І. Суліменко, А.В. Сова // опубл. 27.07.2015 р. Бюл. №14.
101. Бочка В.В. Поведінка агломерату при механічних навантаженнях / В.В. Бочка, А.В. Двоєглазова, А.В. Сова та ін. // Матеріали конференції «Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти», присвячена 100-річчю Г.Г.Єфіменко. – 2017. – С. 233-237.
102. Сова А.В. Пошук оптимальної схеми реалізації внутрішніх напружень в агломераті/ А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В.Двоєглазова та ін. // VI Міжнародна науково-практична конференція «Металлургия 2017». – 2017. – С. 408.
103. Сова А.В. Розробка математичної моделі руйнування агломераційного спеченця в агрегаті стабілізаторі барабанного типу / А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В.Двоєглазова та ін. // 44-та Міжнародна науково-технічна конференція молоді. – 2017. – С. 14.
104. Bochka V. Modeling of the mechanical processing of an agglomerate in the drum type device / V. Bochka, A. Sova, A. Dvoiehlazova // 13th International symposium of Croatian metallurgical society. Sibenik, Croatia, June 24-28, 2018.
105. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Киев: Вища школа, 1975. — 282 с.
106. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых - М.: Недра, 1980. - 415 с.

107. Сова А.В. Дослідження особливостей виробництва стабілізованого за крупністю агломерату/ А.В. Сова, В.В. Бочка, А.В.Двоєглазова та ін. // 42-га Міжнародна науково-технічна конференція молоді. – 2015. – С. 14.
108. Рябчиков М.Ю., Гребенникова В.В., Рябчикова Е.С., Богданов Н.В. Модель разрушения металлургического агломерата, Изв. ВУЗ-ов Черная металлургия №3, 2016 г. – С. 159 – 166. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-3-159-166>
109. Бочка В.В. Исследования оптимальной механической обработки агломерата/ В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова // XIX INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE «New technologies and achievements in metallurgy, materialengineering and production engineering», a collective monograph, Czestochova, 2018. P. 129-133.
110. Бочка В.В. Можливості отримання стабілізованого агломерату / В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова // VII Міжнародна науково-практична конференція «Металлургия 2018». – 2018. – С 240-242.
111. ДСТУ 3200-95. Руди залізні і марганцеві, агломерати і окатки. Метод визначення міцності в обертковому барабані : чинний від 2000-01-01.
112. Бочка В.В. Исследование особенностей процесса разрушения агломерата в устройстве барабанного типа / В.В.Бочка, А.В. Сова, А.В.Двоєглазова // Металл и Литьё Украины. – 2018. - №11-12. – С. 1-8.
113. Бочка В.В. Пристрій для стабілізації агломерату за крупністю. Патент на корисну модель №129583 Україна// В.В. Бочка, А.В. Сова, А.В. Двоєглазова.
114. ДСТУ 3199-95 Руди залізні і марганцеві, агломерати і окатки. Метод визначення міцності на скидання.