

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

**ДВОЄГЛАЗОВА АЛІСА ВІКТОРІВНА**

УДК 669:162.1:662:788.3

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ КОМПЛЕКСНОГО  
ФЛЮСУ НА ОСНОВІ ВАПНЯКУ ТА ЗАЛІЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ  
ПРИ ЇХ СПІЛЬНІЙ ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ**

05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів»

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеню  
кандидата технічних наук

Дніпро - 2018

Дисертацією є рукопис  
Робота виконана в Національній металургійній академії України  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** Доктор технічних наук, професор  
**БОЧКА Володимир Васильович**  
Національна металургійна академія України,  
професор кафедри металургії чавуну

**Офіційні опоненти:** Доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**МУРАВЙОВА Ірина Геннадіївна,**  
Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова  
НАН України (м. Дніпро),  
зав. відділом технологічного обладнання та  
систем управління

Кандидат технічних наук, доцент  
**РУДЕНКО Микола Романович**  
Дніпровський державний технічний університет  
(м. Кам'янське),  
доцент кафедри металургії чорних металів.

Захист відбудеться "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2018р. о \_\_\_\_\_ на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 08.084.03 при Національній металургійній академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.  
Факс +38(0562)47-44-61. E-mail: [lydmila\\_kamkina@ukr.net](mailto:lydmila_kamkina@ukr.net).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розіслано "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2018р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 08.084.03  
доктор технічних наук,  
професор

Л.В. Камкіна

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Використання окускованої залізорудної сировини сприяє суттєвому підвищенню ефективності металургійних підприємств. Практика доменного виробництва показала, що, незважаючи на суттєве збільшення використання окатишів, основною залізорудною сировиною для доменних печей є офлюсований агломерат. Пояснюється це порівняно простою технологією виробництва та невисокими вимогами до гранулометричного складу вихідної сировини, її вологості та ін. У той же час слід зазначити, що агломерат має невисоку міцність і значний вміст дріб'язку. Так, вміст фракції 0 – 5 мм в агломераті різних фабрик досягає 10,2 - 26,0%, а при надходженні в доменний цех цей показник зростає до 11,1 - 26,5%. Значний вміст дріб'язку в агломераті суттєво обмежує інтенсифікацію доменного процесу.

Підвищення якості агломерату та зменшення енерговитрат на його виробництво є основним завданням сучасних агломераційних підприємств України. Однією з основних причин руйнування офлюсованого агломерату є збільшення об'єму двокальцієвого силікату при його модифікаційних перетвореннях в процесі охолодження. У роботах В.А.Уткова, Г.Г.Єфіменко, Д.А. Ковальова та ін. показано, що одно- та двокальцієві ферити, захищають спеченець від руйнування, за рахунок стабілізації двокальцієвого силікату. Одним із можливих способів введення феритів кальцію до складу агломераційної шихти є використання комплексних флюсів. При цьому ефективність реалізації даного заходу значною мірою залежить від способу отримання комплексного флюсу.

У зв'язку з цим удосконалення технології виробництва комплексного флюсу є **актуальним** питанням для підвищення ефективності процесів окускування залізорудної сировини для доменної плавки.

**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 «Наукове обґрунтування та розробка ефективних тепло-масообмінних процесів в інноваційних металургійних технологіях» (номер державної реєстрації 0115U003176). Дисертаційна робота виконувалася в рамках науково-дослідної діяльності кафедри металургії чавуну Національної металургійної академії України (НМетАУ).

**Мета та завдання дослідження.** Розробка технології виробництва комплексного флюсу шляхом поєднання процесів отримання вапна та феритних сполук.

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

➤ аналіз сучасних технологій отримання комплексного флюсу, їх ефективності, переваг і недоліків;

- визначення найбільш раціональних шихтових матеріалів для отримання комплексного флюсу на основі термодинамічного аналізу реакцій взаємодії, що протікають між ними;
- визначення оптимального співвідношення шихтових матеріалів та їх крупності на основі експериментальних досліджень;
- визначення механізму температурно-теплової обробки комбінованих гранул;
- проведення лабораторних спікань для визначення оптимальних показників технології отримання комплексного флюсу (вологості шихти, витрати палива, часу запалювання шихти);
- аналіз впливу виду флюсуючої добавки на процеси окускування матеріалів;
- аналіз техніко-економічних показників виробництва агломерату та окатишів при використанні комплексного флюсу.
- визначення ефективності використання агломерату на основі комплексного флюсу в доменній печі.

**Об'єкт дослідження.** Технологія виробництва комплексного флюсу за рахунок поєднання процесів випалу вапняку та виробництва феритів кальцію.

**Предмет дослідження.** Вплив типу залізовмісного матеріалу, хімічного та гранулометричного складу шихтових матеріалів на властивості та мінералогічний склад комплексного флюсу, вплив крупності шматочків вапняку на товщину накатаного шару залізовмісного матеріалу та визначення ефективності заміни традиційних флюсів комплексним у процесах окускування металургійної сировини.

**Методи дослідження.** Аналітичні та теоретичні дослідження реакції дисоціації вапняку в присутності залізовмісного матеріалу базуються на фундаментальних положеннях фізичної хімії та теорії металургійних процесів. Аналіз основних термодинамічних показників реакції дисоціації вапняку в присутності залізовмісних матеріалів проводили за допомогою програмного комплексу. Дослідження вибору оптимального гранулометричного складу вапняку і палива та визначення ефективності заміни традиційних флюсів комплексним проводили в експериментальній чаші для спікання агломерату у лабораторії кафедри металургії чавуну НМетАУ. Проведення хімічного аналізу отриманого комплексного флюсу проводились в лабораторії кафедри фізичної хімії УДХТУ. Дослідження мікроструктури комплексного флюсу та окатишів, що були отримані із використанням комплексного флюсу, а також визначення товщини накатаного шару залізовмісного матеріалу проводились в науково-дослідній лабораторії кафедри термічної обробки НМетАУ. Для досягнення поставленої мети та вирішення сформульованих задач в роботі використані прикладні програми планування експерименту та методи математичного моделювання і математичної статистики. Усі експериментальні дослідження виконані із використанням повіреного і сертифікованого обладнання та устаткування.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Встановлено та підтверджено теоретичними розрахунками першочергове утворення силікатів кальцію при їх спільному знаходженні у вихідній шихті, що містить залізовмісні матеріали, кінетичні можливості відповідної реакції силікатуутворення визначаються концентрацією реагуючих речовин та температурою в реакційному просторі, лімітуючою ланкою процесу утворення є відсутність значних контактних взаємодій між розподіленими частками у реагуючій системі, що компенсується застосуванням накатування вихідної шихти.

2. Отримали подальший розвиток теоретичні основи випалу вапняку в присутності таких матеріалів як залізна руда та магнетитовий концентрат. Встановлено, що при термічній обробці комбінованих гранул за рахунок взаємодії вапна та оксидів рудних матеріалів суттєво підвищується швидкість та ступінь дисоціації вапняку за рахунок протікання екзотермічних реакцій взаємодії свіжовипаленого вапна з оксидами, що входять до складу залізовмісного матеріалу.

3. Розвинуті уявлення щодо впливу типу залізовмісної сировини на мінералогічний склад комплексного флюсу. Встановлено, що отримання комплексного флюсу із високим вмістом феритів кальцію залежить від вмісту  $\text{SiO}_2$  в нерудній частині залізовмісного матеріалу, завдяки чому можливо контролювати кількість реагуючих контактів між  $\text{SiO}_2$  та  $\text{CaO}$  та вмістом заліза  $\text{Fe}^{3+}$ , взаємодія якого з  $\text{CaO}$  має істотні термодинамічні та кінетичні переваги.

### **Практична цінність отриманих результатів.**

1. Запропонована технологія виробництва комплексного флюсу на конвеєрній машині та технологія виробництва комплексного флюсу в індукційній печі, які дозволяють одержувати комплексний флюс без встановлення додаткового технологічного обладнання та суттєвих змін роботи металургійного виробництва.

2. Розроблені практичні рекомендації щодо вибору технологічного режиму виробництва комплексного флюсу. Показано, що для отримання комплексного флюсу із високим вмістом феритів кальцію крупність вапняку та твердого палива повинна бути, відповідно, в межах 3 - 10 та 0 – 5 мм, крупність залізовмісного матеріалу - до 0,01 мм, вологість шихти 5 - 6%, витрата твердого палива на процес 8 - 9%.

3. Результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи були використані при розробці проекту реконструкції агломераційних фабрик України в державному підприємстві «Укрдїпромет», а також використовуються у навчальному процесі на кафедрі металургії чавуну Національної металургійної академії України при вивченні дисципліни «Підготовка металургійної сировини» спеціальності 136 - «Металургія».

**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 - 4] – аналіз стану процесів виробництва окускованої сировини та підготовку планів експериментів, аналіз і обробку отриманих результатів; [5, 13] – проведення термодинамічного аналізу реакції дисоціації вапняку при наявності залізовмісних матеріалів, обробку даних щодо впливу різних оксидів на основні термодинамічні характеристики; [6- 7] – аналіз існуючих технологій, проведення експериментів та обробку експериментальних даних; [8 - 12, 14] – проведення експериментів щодо визначення впливу виду флюсу на техніко-економічні показники спікання агломерату.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали роботи були представлені в доповідях на: Міжнародній конференції молоді (м. Запоріжжя 2014, 2015, 2016 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Литво. Металургія» (м. Запоріжжя, 2015, 2016 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра» (м. Київ, 2017 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти», присвяченій 100-річчю Г.Г.Єфіменко (м.Дніпро, 2017р.).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковані 14 робіт, із них 4 - статті у спеціалізованих наукових виданнях, затверджених ВАК України, 1 - стаття у наукових виданнях інших держав, 2 – патенти на корисну модель, 7 – матеріалів наукових конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Матеріал дисертації викладений на 133 сторінках, включаючи 48 рисунків, 17 таблиць та 2 додатків. Бібліографічний список містить 102 найменувань робіт вітчизняних і закордонних авторів.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність роботи, вказані мета і завдання роботи, сформована наукова новизна отриманих результатів та їх практичне значення, відзначено особистий внесок автора, викладені результати апробації розробок, наведена структура і обсяг роботи.

У **першому розділі** наведені дані щодо сучасного стану металургійного виробництва. Показано, що флюси є важливим компонентом шихт металургійних процесів.

Найбільш поширеним видом основного флюсу є вапняк. Його використання в шихті для спікання агломерату після попереднього подрібнення до крупності 0 - 3 мм є технологічно простим і доволі ефективним. Основними недоліками його використання є велика нерівномірність розподілу в об'ємі шихти, а також значна витрата теплоти на розкладання вапняку в процесі спікання агломерату. Більш ефективним є використання вапна, яке окрім флюсоуючої функції, виконує

також функції в'язучої речовини та гранулоутворюючого центру. Ефективність використання вапна значною мірою визначається якістю випалу вапняку, кількістю і способом подачі вапна в шихту та його вартістю. Тому витрата вапна в шихту суттєво обмежується, і вапно використовується, як правило, спільно з вапняком.

В умовах підвищення ефективності сучасного агломераційного процесу та зменшення енерговитрат актуальними є розробка і використання в процесах окускування металургійної сировини нового типу флюсу – так званого комплексного флюсу. Основною відмінністю цього флюсу є те, що він вносить в аглошихту значний набір мінералогічних сполук (ферити-, силікати- та алюмінати кальцію і інші), які суттєво покращують умови спікання і якість агломерату. До таких флюсів відносять феритні суміші, залізофлюси та ін. Реалізація даних технологій обмежується необхідністю будівництва додаткових відділень підготовки сумішей та через суттєве підвищення собівартості агломерату.

На основі аналізу літературних даних показано, що одним із напрямків виробництва комплексного флюсу заданого складу та властивостей є отримання комбінованих гранул шляхом поєднання процесів випалу вапняку та утворення феритів кальцію.

У **другому розділі** наведено результати термодинамічного аналізу реакцій дисоціації вапняку в різних умовах. Теоретичний аналіз проводили за допомогою програмного комплексу. Дисоціацію вапняку при наявності різноманітних добавок оцінювали величиною відносної зміни основних термодинамічних показників, таких як ентальпія (кількість енергії або теплоти, необхідної для протікання реакції) та вільна енергія Гіббса (характеризує повноту протікання реакції). Як добавки були використані оксиди  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що входять до складу рудного мінералу та пустої породи залізистих матеріалів. Ступінь дисоціації вапняку оцінювали як відношення утвореного  $\text{CaO}$  до загальної кількості  $\text{CaO}$  в вапняку. Швидкість дисоціації вапняку визначали відносною кількістю  $\text{CaCO}_3$ , що розклалася за одиницю часу. Результати термодинамічного аналізу наведено на рис.1 а, б.

На рис.1 а наведена залежність вільної енергії Гіббса від температури. Видно, що дисоціація чистого вапняку характеризується максимальною величиною енергії Гіббса, яка дещо зменшується при збільшенні температури в реакційному просторі. Добавка в реакційний простір окремо  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  призводить до значного зниження величини вільної енергії реакції дисоціації вапняку в порівнянні з дисоціацією чистого вапняку, що свідчить про можливість більш повного протікання даної реакції. Зменшення енергії Гіббса в свою чергу тим більше, чим більша температура і чим сильніші у того чи іншого оксиду кислотні властивості. Найбільше зменшення цієї енергії забезпечує  $\text{SiO}_2$  – кислотний оксид, дещо менше зниження має місце для оксидів  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3$  зі слабо вираженими амфотерними властивостями.

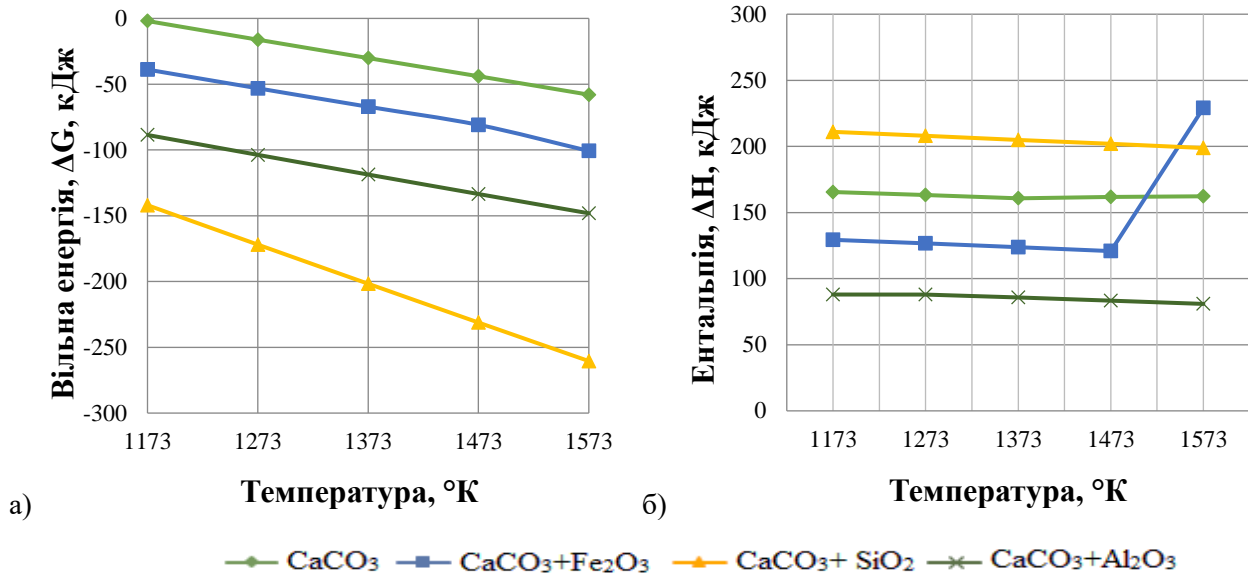


Рис.1 – Залежність вільної енергії Гіббса(а) та ентальпії (б) від температури

Залежність ентальпії від температури наведена на рис.1 б. Видно, що величина ентальпії суттєво відрізняється для різних умов протікання реакцій дисоціації вапняку. Найменша величина ентальпії відповідає реакціям розкладу вапняку в присутності оксидів Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а найбільша – для чистого вапняку з добавкою до нього оксиду SiO<sub>2</sub>. Ентальпія майже не залежить від температури

в реакційному просторі. Винятком є процес розкладання вапняку в присутності Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Як видно з рисунка, величина ентальпії стрибкоподібно збільшується при температурі 1473°K. Різкий стрибок ентальпії свідчить про появу рідкої фази та про поліморфне перетворення.

Основною причиною значних коливань величин енергії Гіббса та ентальпії при дисоціації вапняку в присутності добавок є взаємодія свіжовипаленого вапна з оксидами і утворення нових мінералів. Було проведено дослідження системи Ca-O-Fe-Si-Al з метою визначення фазового

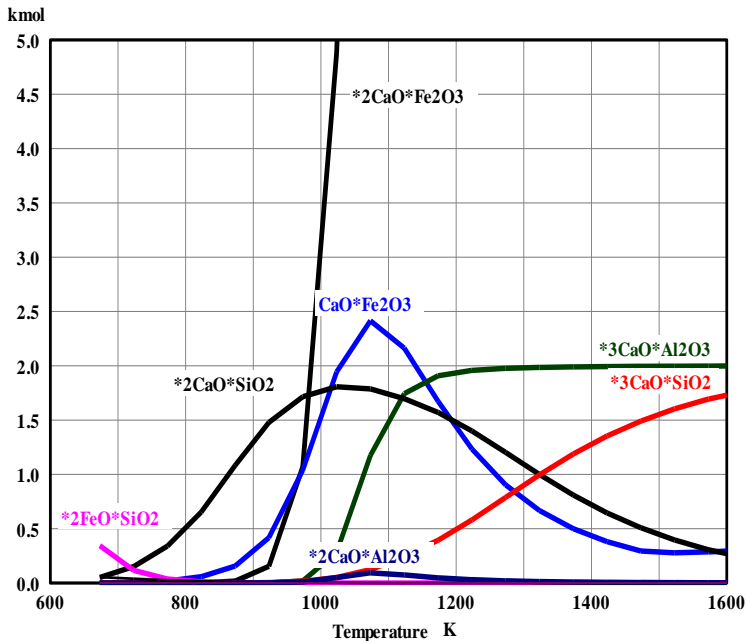


Рис.2. – Теоретично можливі сполуки, які утворюються при взаємодії вапняку із різними оксидами

стану продукту. На рис.2 наведена діаграма сполук, які утворюються, їх кількість (кмоль) та температура утворення. Видно, що при дисоціації вапняку в присутності різноманітних оксидів, що входять до складу залізовмісної



сировини, утворюються різні сполуки на основі кальцію, такі як ферити та силікати. При температурі близько 623°K починає утворюватися однокальцієвий ферит кальцію, який при досягненні температури 1473°K розкладається на складові. При температурі близько 673°K утворюється двокальцієвий ферит кальцію. Двокальцієвий силікат утворюється при температурі близько 653°K.

Результати аналізу термодинаміки системи показали, що при спільному випалюванні вапняку із залізовмісними матеріалами може відбуватися взаємодія вапна, що утворюється при дисоціації вапняку, з присутніми в реакційному просторі оксидами з появою залізокальцієвих та інших мінералогічних структур, що суттєво прискорює розкладання вапняку.

У **третьому розділі** були проведені експериментальні дослідження дисоціації вапняку в присутності залізовмісних матеріалів. Ці дослідження направлені на перевірку даних теоретичного аналізу та повинні визначити, як змінюється процес розкладання вапняку при добавці до нього залізовмісного матеріалу.

Дослідження проводили в 3 етапи. На першому етапі вивчали процес дисоціації чистого вапняку. На другому етапі аналізували особливості термічного розкладу вапняку в суміші із залізорудним концентратом. Для проведення дослідження використовували тонкоподрібнений (до 0,1 мм) вапняк і залізорудний концентрат, із яких формувалась суміш у співвідношенні концентрат-вапняк, %: 0 - 100, 25 - 75, 50 - 50, 75 - 25, яку потім спресовували у брикети розміром 10x10x10 мм. На третьому етапі досліджували процес дисоціації вапняку в гранулах, утворених кусочками вапняку крупністю 3-10 мм та оболонкою товщиною 0,25 - 0,90 мм із залізорудних матеріалів (концентрат, залізна руда). Після отримання зволжених гранул їх змішували з твердим паливом (кількість палива - 8%).

Кусочки чистого вапняку, брикети та гранули завантажували окремо в лабораторну установку, забезпечену ваговим пристроєм і аналізатором складу відхідних газів. Досліди проводили при різних температурах, °C: 900, 1000, 1100, 1200 і 1300. Оцінювали зміну ступеня та швидкості дисоціації вапняку в різних умовах. Хімічний склад шихтових матеріалів наведений в таблиці 1.

Таблиця 1

## Хімічний склад шихтових матеріалів

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	69,33	28,95	58,31	9,85	0,65	0,74	0,34	0,65
Залізна руда	54,05	1,5	75,55	11,5	1,60	1,65	0,62	1,82
Вапняк	0,28	-	0,40	1,34	0,56	53,2	0,92	43,56
Зола коксу	12,66	-	18,09	49,4	26,6	4,48	1,40	-

На рис. 3а-г наведено результати дослідження ступеня дисоціації брикетів із суміші вапняку та концентрату в порівнянні з чистим вапняком.

Видно, що ступінь дисоціації залежить від температури в реакційному просторі та кількості концентрату. При температурі 900°C (рис.3 а) максимальна ступінь дисоціації є у брикетів із суміші, що містить 75% концентрату і 25% вапняку, та складає більше 80%. Для чистого вапняку при таких же умовах ступінь дисоціації складає 43%.

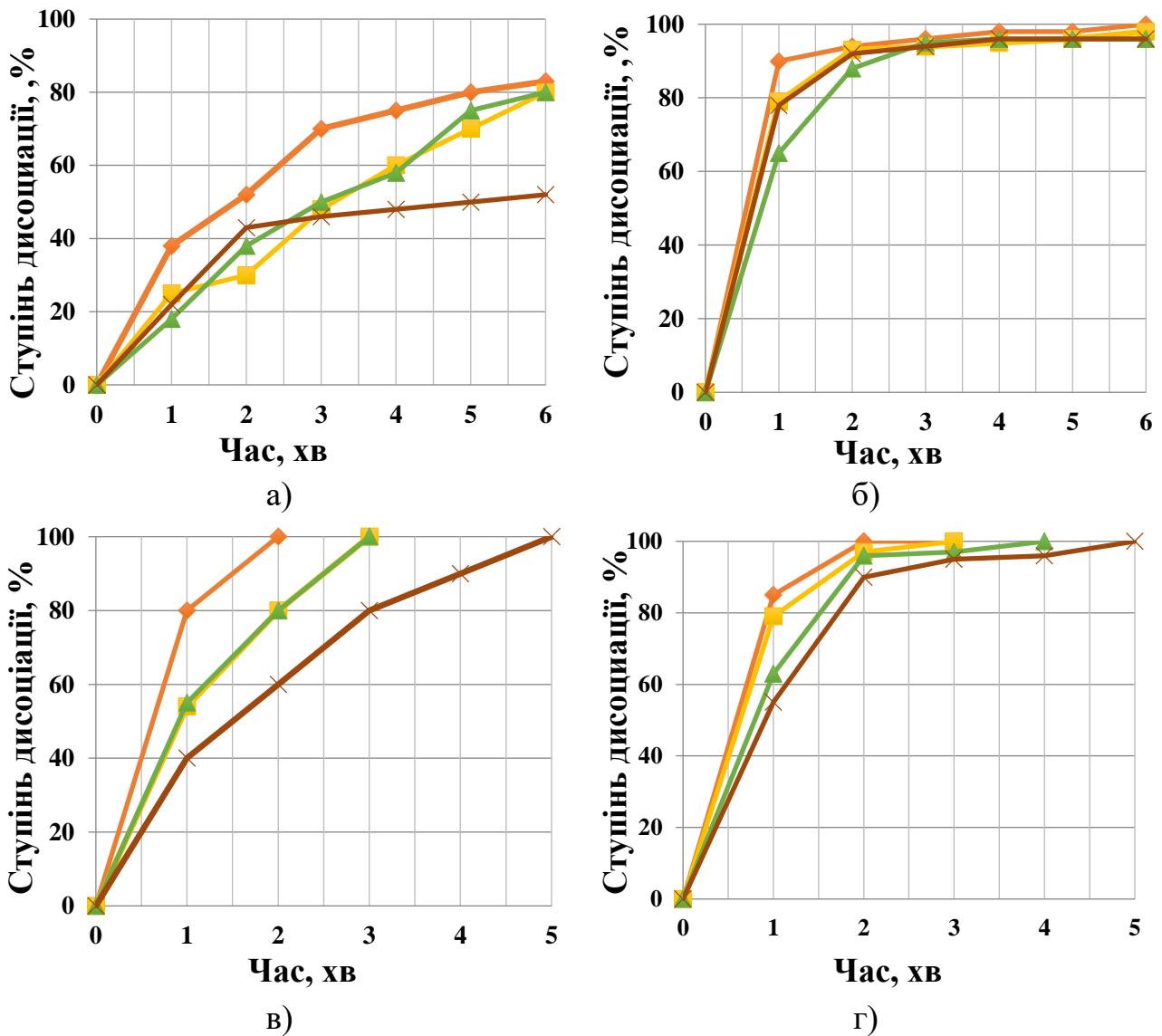


Рис.3 - Залежність ступеня дисоціації вапняку від кількості концентрату при різних температурах: а) 900°C; б) 1000°C; в) 1100°C; г) 1200°C

При температурах 1000°C і 1100°C (рис.3 б, в) ступінь дисоціації брикетів з чистого вапняку наблизився до ступеня дисоціації брикетів з суміші, але час

досягнення одного і того ж ступеню розкладання для чистого вапняку був набагато більше. При температурі 1200°C (рис.3 г.) ступінь повної дисоціації брикетів із суміші вапняку з концентратом досягається при меншому часі витримки (приблизно 2 хвилини), що свідчить про активне протікання процесів взаємодії знов утвореного вапна з оксидами залізовмісного матеріалу.

На рис.4 а, б наведені залежності ступеня дисоціації чистого вапняку та вапна в гранулах. З цих даних видно, що при температурі 900°C наявність на вапняку оболонки з концентрату не надає інтенсифікуючої дії на процес дисоціації вапняку. Ступінь дисоціації для чистого вапняку досягає 40% при 6-ти хвилинах ізотермічної витримки, так само як і при наявності покриття. При температурах 1000 - 1300°C наявність покриття з концентрату має помітний вплив на ступінь дисоціації вапняку. Так, ступінь дисоціації, який дорівнює 100% для чистого вапняку при температурі 1300°C досягається за 4 хвилини, а для вапняку з покриттям за 2 хвилини. Ці факти підтверджують технологічність обраного напрямку виробництва комплексного флюсу шляхом поєднання процесів випалу вапна та утворення феритів кальцію.

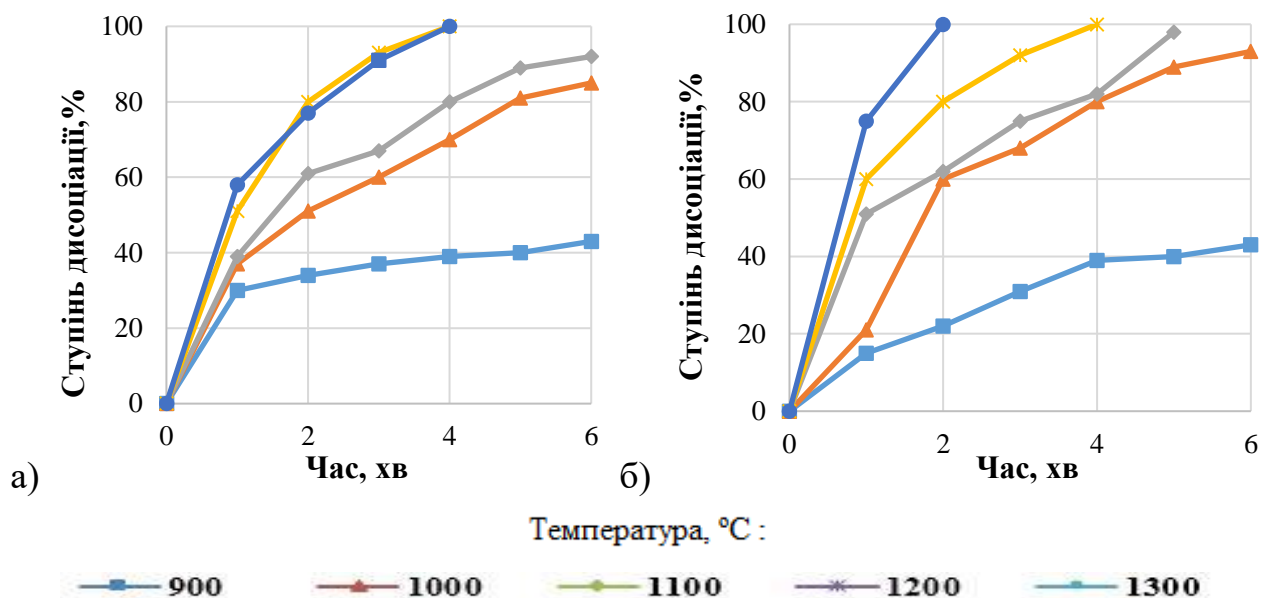


Рис.4 - Залежність ступеня дисоціації чистого вапняку (а) та вапняку із накатом (б) від температури

Для гранул з покриттям характерна більш висока швидкість дисоціації при температурах 1100 - 1300°C, що говорить про те, що в даних умовах можливе отримання флюсу згідно запропонованої технології.

Для порівняння були проведені дослідження особливості випалу вапняку та утворення феритів з гранул, оболочку яких утворює шар залізної руди крупністю 0 - 10 мм, що вміщує менше рудного мінералу і більше пустої породи. Досліди проводили при певному співвідношенні залізної руди, вапняку та палива, а саме, вапняк/руда/паливо: 100/0/12, 90/10/10, 80/20/12, 70/30/10. Окомковану шихту спікали в агломераційній чаші. Якість виробленого комплексного флюсу

оцінювали величиною питомої продуктивності установки по CaO та ступеня випалу вапняку.

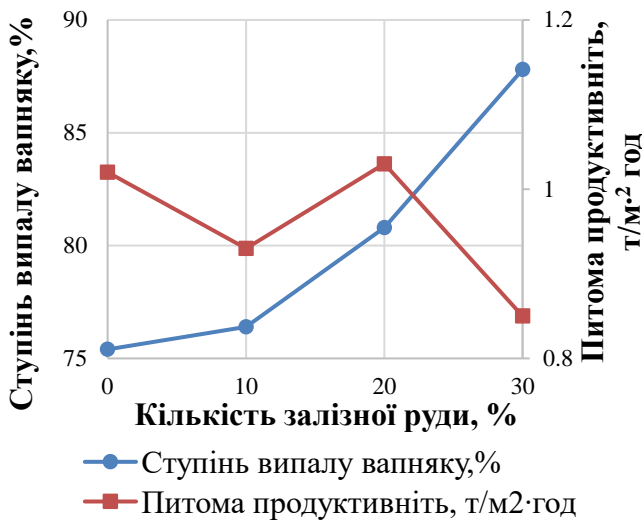


Рис.5 - Зміна ступеня випалу вапняку та питомої продуктивності установки від вмісту залізної руди.

Результати досліджень приведені на рис. 5. З даних, наведених на рис.5 видно, що при спіканні лише чистого вапняку із паливом, ступінь випалу складає - 75,4%;, а продуктивність установки CaO - 1,02 т/м<sup>2</sup>·год. При введенні 10% залізної руди спостерігається підвищення ступеня випалу вапняку до 76,4%, але продуктивність по CaO залишається незмінною - 1,02 т/м<sup>2</sup>·год.

При введенні 20% залізної руди ступінь випалу вапняку склала близько 80,8%, продуктивність по CaO складає - 0,89 т/м<sup>2</sup>·год.

Зниження продуктивності установки по питомій продуктивності CaO пояснюється тим, що частина вільного оксиду кальцію вступає в реакцію з основними оксидами, які входять до складу руди, та утворює різні сполуки: ферити кальцію, алюмінати та силікати кальцію. При введенні в шихту 30% залізної руди ступінь випалу вапняку склав близько 87,8%, продуктивність по CaO складала 0,84 т/м<sup>2</sup>·год.

При температурах 1100-1300°C має місце утворення розплаву, який починає взаємодіяти із компонентами залізновмісного матеріалу та свіжовипаленим вапном. В момент закінчення розкладання і охолодження вапняку переріз гранули має багат шарову структуру: шар змішаного матеріалу (зовні), шар проміжного продукту і шар обпаленого вапна в ядрі гранули в кількості 15 - 25% від вмісту вапна у вапняку.

Наведений механізм процесів формування структури гранул підтверджується результатами петрографічного аналізу мікроструктури зразків випалених гранул із концентрату та гематитової руди (рис.6).

На рис.6 а наведена мікроструктура комплексного флюсу на основі вапняку та залізородного концентрату. Світла зона на границі із залишками вапняку – сірі із кавернами. Серед утвореного розплаву призматичні кристали силікатів кальцію та евтектика з однокальцієвого фериту та гематиту (біле), чорне кругле та каверноподібне – пори.

На рис.6 б представлена характерна мікроструктура та розподіл різних фаз, які утворилися на площі взаємодії вапняку та гематитової руди. На рис.6 в представлена мікроструктура краю одержаної гранули. З краю – ферити, всередині округлі зерна – вапно. Головною фазою є вапно, потім ферити кальцію та незначна частина силікатів. Вапно має округлу форму зерен, які торкаються один одного або оточені оболонкою із феритів кальцію.

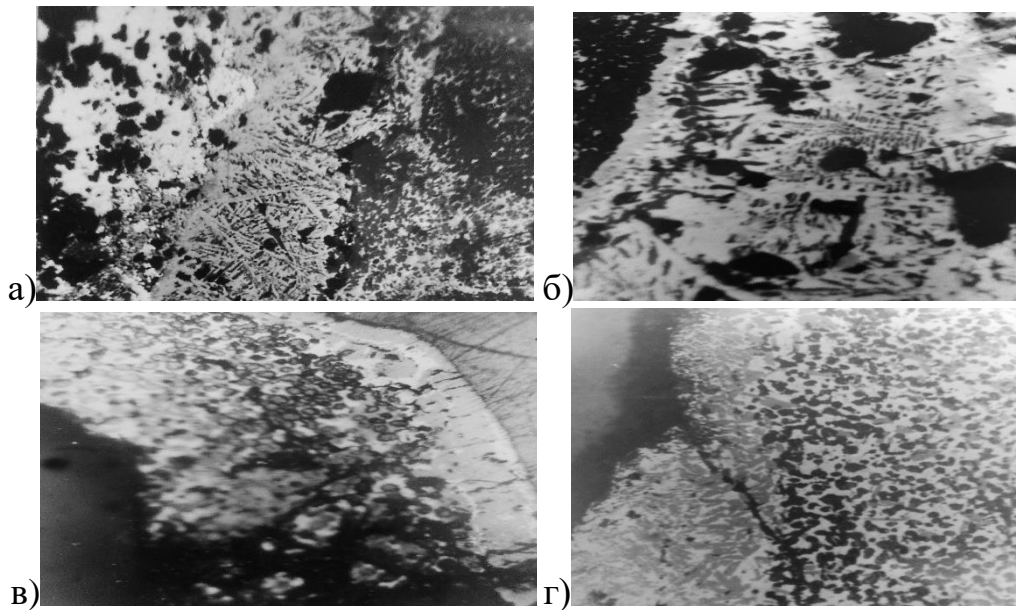


Рис.6 - Мікроструктура зразків комплексного флюсу із концентрату(а,в) та гематитової руди(б) та мікроструктура комплексного флюсу, який витримували на повітрі (г)

Світло-сіре – ферити кальцію, темно сірі – вапно, чорні – вапно, яке окиснене вологою повітря

На рис.6 г представлена мікроструктура комплексного флюсу, який витримували певний час на повітрі. Зерна вапна мають тут чорний колір, у зв'язку із тим, що вапно прореагувало із вологою повітря та утворило плівку із гідрату кальцію.

У зразках комплексного флюсу із вапняку та гематитової руди кількість рідких фаз значно більша, ніж при спіканні комплексного флюсу із концентрату, що пояснюється впливом значної кількості пустої породи.

Результати проведених досліджень підтверджують технологічність обраного напрямку виробництва комплексного флюсу за рахунок поєднання процесів випалу вапна та феритних спеків.

Отримані в дослідженнях матеріали покладені в основу при розробці математичної моделі процесу обпалювання комбінованих гранул на конвеєрній машині. Для цього були використані математичні рівняння, які враховують ступінь розкладання вапняку, ступінь окиснення магнетиту та вигорання твердого палива. Також враховувались технологічні параметри роботи конвеєрної машини: довжина машини, висота шару, що обпалюється та кількість зон.

Після введення параметрів роботи машини та властивостей одержаних комбінованих гранул, програма розраховує ступінь дисоціації вапняку та ступінь окиснення магнетиту при різному часу випалу, температуру гранул в шарі та температуру відхідних газів.

Результати розрахунків підтвердили адекватність даної моделі реальному процесу випалу вапняку в присутності оксидів заліза. Важливим результатом використання моделі є те, що вона показує поведінку оксидів заліза в

концентраті та залізних рудах. Якщо залізо в концентраті є окиснене до  $Fe_2O_3$ , то залізо в умовах випалу вапняку не окислюється, а вступає у взаємодію з вапном або іншими оксидами. У випадку, коли залізо в концентраті окиснене до  $Fe_2O_3$ , то при випалі вапняку таке залізо швидко окислюється до  $Fe_2O_3$  і далі активно взаємодіє з вапном. Результати даної моделі можуть бути використані для визначення температурно-теплових режимів технологічного процесу виробництва комплексного флюсу.

У четвертому розділі були проведені вибір та обґрунтування технологічних параметрів технології виробництва комплексного флюсу заданого складу та властивостей.

У механізм формування комбінованих гранул закладено теоретичні основи гранулоутворення при окомкуванні агломерату та формуванні окатишів. Відмінність полягає в тому, що при формуванні гранул є жорстке ядро крупністю  $> 3$  мм з одного матеріалу, на поверхню якого накочується тонкодисперсний залізозмісний матеріал. Після зволоження поверхні вапняку водою на його поверхні виникають капілярні сили, які забезпечують зчеплення частинок у вологому матеріалі. Для розрахунку товщини шару концентрату, що накочується, була використана відома методика, за якою приймалось те, що кусочки вапняку мають кулясту форму. Розрахунок показав, що при незмінній кількості накочуваного матеріалу на поверхню кусочків вапняку, товщина накатаного концентрату зі збільшенням діаметра гранули вапняку зменшується. При формуванні гранул з однаковою товщиною шару наката зі збільшенням діаметра кусочка вапняку діаметр гранул збільшується. Експериментальним шляхом відбору гранул після їх випалу було встановлено, що товщина шару залізозмісної сировини, що накочується, становить 0,1 - 0,9 мм, частка накатаного матеріалу на гранулі складає 25 - 40% від її загальної маси.

При розробці технології виробництва комплексного флюсу з гранул вапняку з накатаними шаром залізозмісного матеріалу велике значення має правильний вибір крупності вапняку та палива. Для отримання комплексного флюсу використовували вапняк крупністю від 0,1 до 12мм. Однак відсутнє технологічне обґрунтування вибору крупності вапняку та її впливу на показники процесу отримання комплексного флюсу. Тому виникає необхідність дослідження впливу гранулометричного складу вапняку на технологічні показники процесу отримання комплексного флюсу. У зв'язку з цим було проведено дослідження особливостей спікання комплексного флюсу з гранул при використанні вапняку різної крупності.

Для оцінки впливу крупності вапняку та палива було прийнято показник питомої продуктивності установки по виробництву активного оксиду кальцію:

$$Q_{\text{акт}} = \frac{0,06 \cdot \Pi (\text{CaO}_{\text{акт}} + \text{CaO}_{\text{карб}})}{S \cdot \tau}, \text{ т/м}^2 \cdot \text{год}, \quad (1)$$

$\Pi$  – вага спеку, кг;

$\text{CaO}_{\text{акт}}$  - вміст активного оксиду CaO, %;

$\text{CaO}_{\text{карб}}$  – вміст оксиду кальцію у складі  $\text{CaCO}_3$ , %;

$S$  – площа спікання,  $\text{м}^2$ ;  $S$  - 0,075 $\text{м}^2$

$\tau$  – час спікання, хв.

В якості шихтових матеріалів було використано: вапняк крупністю, мм: 3 - 12, 3 - 10, 3 - 8; тонкоподрібнений вапняк крупністю менше 0,1 мм для формування суміші, що йде в накат, а також паливо крупністю, мм: 0 - 12, 0 - 5, 0 - 3. Дослідження проводили за схемою послідовного симплексного планування при числі змінних чинників рівному 5. Змінювали наступні фактори:

	-x	$x_0$	+x
$x_1$ – витрата палива, %	8,0	9,0	10,0
$x_2$ – крупність палив, мм	0-4	0-8	0-12
$x_3$ – крупність вапняку, мм	3-8	3-10	3-12
$x_4$ – час запалювання шихти, хв	0,5	1,0	1,5
$x_5$ – вологість шихти, %	4,0	5,0	6,0

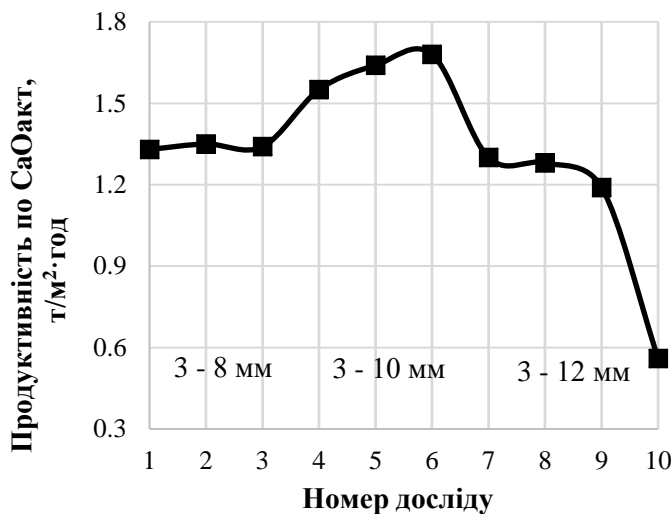


Рис.7 – Залежність питомої продуктивності установки від крупності вапняку

Як видно з рис.7, найкращі показники процесів отримання комплексного флюсу були досягнуті в дослідах 4-6 при використанні вапняку розміром 3-10 мм. Максимальна продуктивність (1,68 т/м²·годину) була досягнута в 5-му досліді (при крупності палива 0-5 мм та його кількості 10%). Найнижчі показники були отримані в 7 - 10 варіантах спікання при використанні вапняку розміром 3 -12 мм. Основною причиною такого погіршення є недостатня кількість теплоти на дисоціацію

вапняку і фізико-хімічні перетворення гранул в комплексний флюс. Тому для технології виробництва комплексного флюсу необхідно використовувати вапняк крупністю 3 – 10 мм та паливо крупністю 0 – 5 мм.

Також для розробки технології виробництва комплексного флюсу необхідно визначити й інші технологічні параметри, такі як вміст концентрату в суміші, кількість суміші, що йде в накат, вміст палива, вологість шихти та висота шару, що спікається. Дослідження для визначення цих параметрів проводили у відповідності до методу центрально-композиційного ротабельного планування другого порядку. В якості змінних прийняли:

$x_1$  – вміст концентрату в суміші з вапняком, крупністю 0,1 мм, що накочується на вапняк розміром 3 - 10 мм, %;

$x_2$  - кількість суміші, що накочується в % від маси вапняку розміром 3-10 мм;

$x_3$  – вміст палива в шихті, %;

$x_4$  – вологість шихти, %;

$x_5$  – висота шару шихти, мм.

Матриця центрально-композиційного ротабельного планування другого порядку для п'ятифакторного експерименту наведена в таблиці 2.

На основі результатів проведених спікань було отримано рівняння множинної регресії в критеріальній формі, що описує залежність питомої продуктивності установки  $y$  (функція відгуку) від досліджуваних факторів:

$$y = 0,53 + 0,05 \cdot x_1 - 0,03 \cdot x_2 + 0,06 \cdot x_3 - 0,03 \cdot x_2^2 - 0,03 \cdot x_3^2 - 0,07 \cdot x_4^2 - 0,03 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,03 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,02 \cdot x_2 \cdot x_4 \quad (2)$$

$$R^2 = 0,76$$

Таблиця 2

Матриця центрально-композиційного ротабельного планування

Фактор	-2x	-x	$x_0$	+x	+2x
$x_1$	0,0	25,0	50,0	75,0	100,0
$x_2$	5,0	15,0	25,0	35,0	45,0
$x_3$	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
$x_4$	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
$x_5$	200,0	300,0	400,0	500,0	600,0

Для пошуку екстремального значення функції відгуку використовували метод послідовної оптимізації факторів варіювання, для чого спочатку рівняння регресії з кодованого виду перетворювали в натуральний:

$$y = -4,6025 + 0,011 \cdot K + 0,026 \cdot C - 0,0003 \cdot C^2 + 0,675 \cdot T - 0,03 \cdot T^2 + 0,65 \cdot V - 0,07 \cdot V^2 - 0,0012K \cdot T - 0,003C \cdot T + 0,002C \cdot V, \quad (3)$$

$K$  – кількість концентрату в суміші, %;

$C$  - кількість суміші в шихті, %;

$T$  – витрата палива, %;

$V$  – вологість шихти, %.

Потім рівняння (2) було перетворено в чотири рівняння чистої регресії (3 – б), які дозволяють оцінити вплив кожного параметру, що досліджується, на питому продуктивність установки.

$$y_k = 0,49 + 0,0014 \cdot K; \quad (4)$$

$$y_c = 0,4475 + 0,012 \cdot C - 0,0005 \cdot C^2; \quad (5)$$

$$y_T = -1,80 + 0,54 \cdot T - 0,03 \cdot T^2; \quad (6)$$

$$y_v = -1,19 + 0,07 \cdot V - 0,07 \cdot V^2. \quad (7)$$

Після цього було проведено дослідження функцій  $y_k$ ,  $y_c$ ,  $y_T$ , та  $y_v$  на екстремум. В роботі прийнято, що значення аргументу, при яких функція відгуку набуває екстремального значення, відповідають раціональним параметрам процесу спікання комплексного флюсу. Результати досліджень наведені на рисунку 8.



На рис.8 а представлена залежність питомої продуктивності від вмісту концентрату в накаті. З графіку видно, що вказана залежність має лінійний характер і максимальна продуктивність установки  $0,63 \text{ т/м}^2 \cdot \text{год}$  досягається при накаті на кусочки вапняку 100-% концентрату.

На рис.8 б наведена залежність питомої продуктивності установки від кількості наколеної суміші. При вмісті в шихті 8 - 9% палива і 5% вологи максимальна питома продуктивність установки відповідає вмісту в шихті 15 - 25,0% суміші (від маси вапняку фракції 3 - 10 мм). При даній кількості суміші створюються найкращі умови для її наколювання на поверхню кусочків вапняку.

На рис.8 в представлена залежність питомої продуктивності від вмісту палива в шихті. При використанні 8 - 9% палива в шихті досягається максимальна продуктивність. Така витрата палива забезпечує необхідну кількість теплоти для протікання реакцій феритоутворення і випалу вапняку.

На рис.8 г наведена залежність питомої продуктивності від вологості шихти. Найкращі результати були отримані при вологості шихти 5%. При такій вологості на поверхні вапняку утворюється кірка із наколеного концентрату заданих розмірів і міцності.

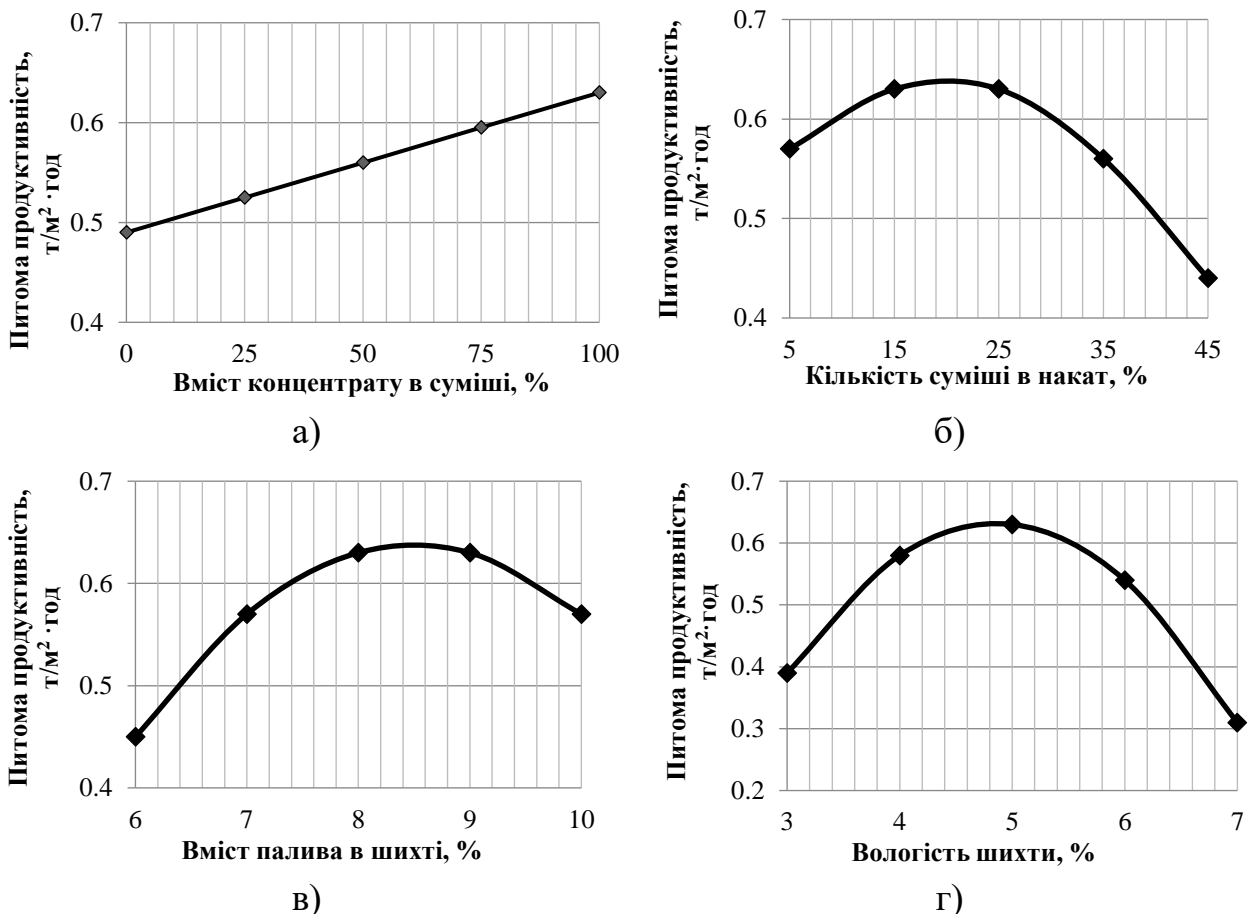


Рис.8 – Залежність питомої продуктивності установки від різних факторів

Аналізуючи результати дослідження та рівняння множинної регресії видно, що висота шару шихти не впливає на параметр, що досліджується. Це говорить про те, що шихта для отримання комплексного флюсу має високу

газопроникність, що нівелює вплив висоти шару, що спікається на питому продуктивність установки.

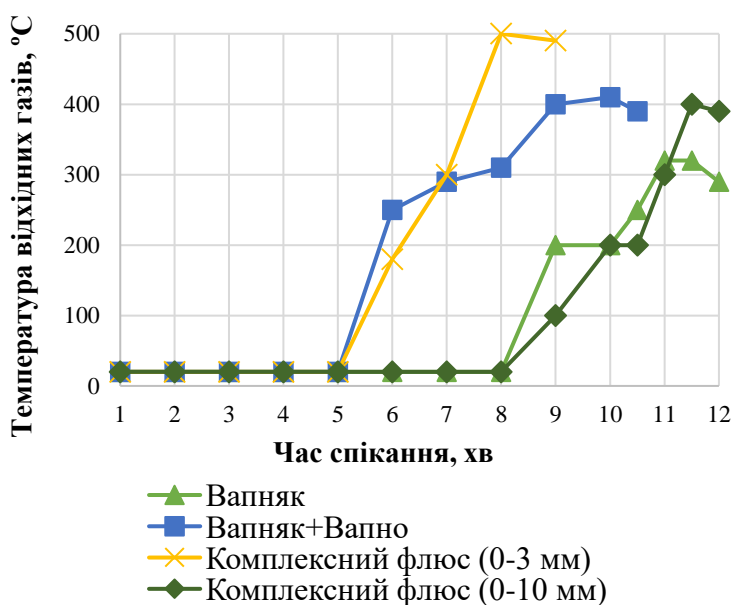
Таким чином, отримане рівняння множинної регресії дозволило встановити раціональні параметри процесу спікання комплексного флюсу:

- вміст концентрату в суміші – 100%;
- вміст суміші в шихті – 15 - 25%;
- вміст палива в шихті – 8 - 9%;
- вологість шихти – 5%.

Крім того, експерименти дозволили встановити, що для отримання 1 т комплексного флюсу необхідно витратити 1100 – 1200 м<sup>3</sup> повітря при розрідженні в колекторі 400 - 450 мм вод.ст. Основність одержаного продукту становить 10,5 од. Комплексний флюс, отриманий по даній технології, містить 23,0% заліза, 16,5% оксиду заліза(II) і до 42% СаО активного. Зовнішній вигляд комплексного флюсу отриманого за даними технологічними



Рис.9 – Зовнішній вигляд комплексного флюсу у вигляді окремих гранул та спечених друзів



(спікання 6 - 7).

Рис.10 - Зміна температури відхідних газів при спіканні агломерату

На рис.10 наведена характеристика процесу спікання агломерату з різними видами флюсів. Видно, що при використанні комплексного флюсу суттєво змінюється характер спікання агломерату. Так, при добавці в шихту комплексного флюсу крупністю 0-3 мм суттєво підвищуються температури відхідних газів. Це свідчить про покращення умов твердо- та рідкофазного спікання.

параметрами наведених на рис.9.

Для перевірки ефективності використання комплексного флюсу в процесах окускування сировини була проведена серія досліджень впливу виду флюсоуючої добавки на процес виробництва агломерату та окатишів. Для проведення експерименту при спіканні агломерату були використані вапняк (спікання 1-2), суміш вапна та вапняку (спікання 3), комплексний флюс крупності 0 – 3 мм (спікання 4-5) та 0-10 мм

На рис.10 наведена характеристика процесу спікання агломерату з різними

На рис.11 наведений графік залежності виходу годного агломерату для кожного варіанту спікання. Кращий вихід годного мають варіанти спікання шихти з комплексним флюсом (4 - 7). Найгірші показники виходу годного має 2-е спікання із використанням вапняку.

Підтвердженням позитивного впливу заміни звичайних флюсів на комплексний є підвищена продуктивність аглопроцесу.

На рис 12. наведена залежність питомої продуктивності установки від виду флюсоуючої добавки. Максимальна продуктивність -  $1,98 \text{ т/м}^2 \cdot \text{год}$  була досягнута при використанні комплексного флюсу крупністю 0 - 3 мм, а найгірша –  $1,20 \text{ т/м}^2 \cdot \text{год}$  при використанні комплексного флюсу крупністю 0 -10 мм. Основною причиною зниження продуктивності є те, що флюс даної крупності утворює в шихті гранули діаметром до 15 - 20 мм, які негативно проявляють себе в процесі спікання.

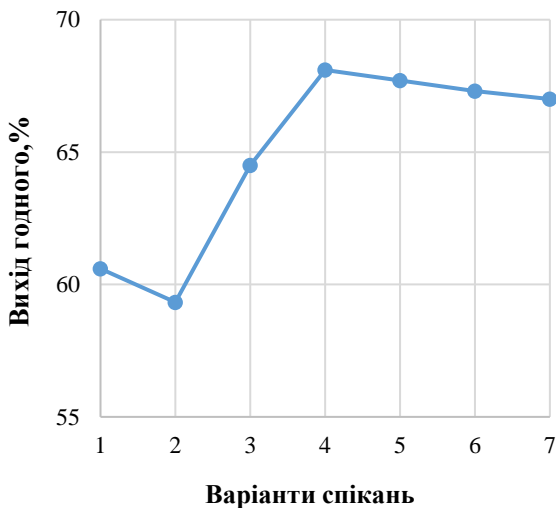


Рис.11 – Залежність виходу годного від варіанту спікання

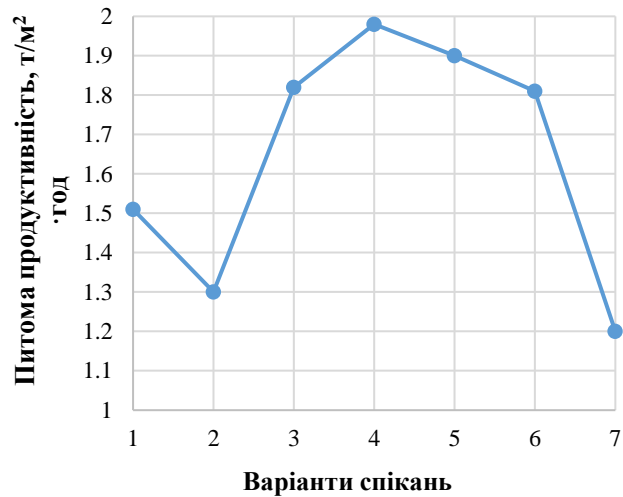


Рис.12 – Залежність питомої продуктивності установки від варіанту спікання

Це вказує на те, що для інтенсифікації процесу спікання агломерату крупність комплексного флюсу повинна бути в межах 0-3 мм.

Враховуючи результати досліджень були проведені розрахунки теплового балансу процесу спікання агломерату та витрати палива при частковій та повній заміні вапняку комплексним флюсом крупністю 0 - 3 мм. Результати розрахунків приведені на рис.13.

З приведених графіків видно, що при використанні комплексного флюсу знижуються теплові затрати на процес спікання агломерату. Це пояснюється тим, що при спіканні агломерату із комплексним флюсом відсутні витрати теплоти на процес дисоціації карбонатів. За рахунок цього знижується витрата палива із 5% до 3,7%.

Були також проведені дослідження впливу добавки комплексного флюсу на ефективність виробництва окатишів основністю 1,2 од. Їх основні властивості порівнювались зі звичайними окатишами основністю 0,7од. Окатиші на основі

комплексного флюсу одержували за стандартною технологією. Для отримання окатишів на основі комплексного флюсу використовували концентрат та комплексний флюс.

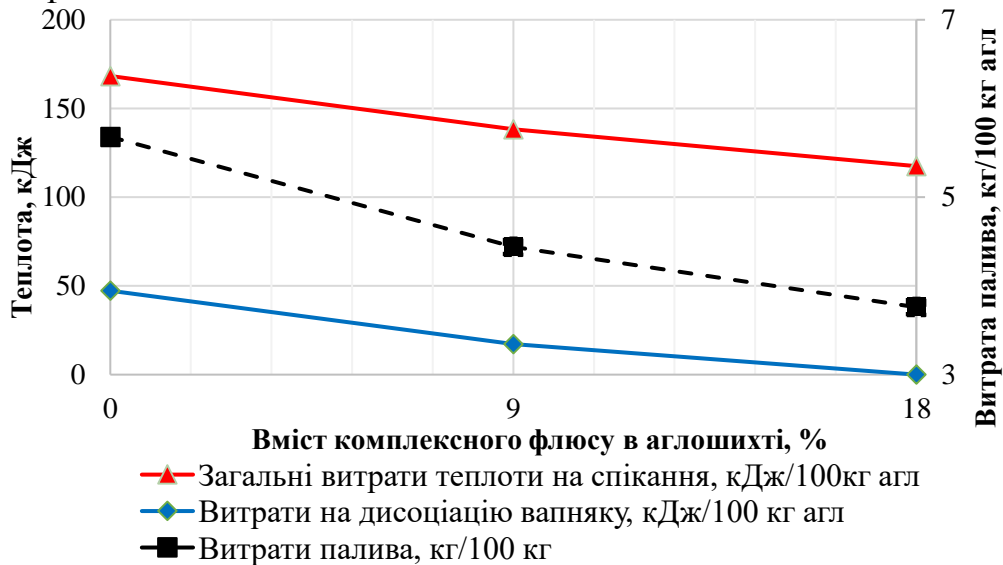


Рис.13 - Залежність теплового балансу та витрати палива від вмісту комплексного флюсу в аглошихті

Бентоніт до складу шихти не додавали. Звичайні окатиші одержували із концентрату та суміші вапняку із бентонітом.

У результаті досліджень було встановлено, що відновність окатишів на основі комплексного флюсу складає 66,7%, в той час як відновність звичайних окатишів – 42,6%. Ці результати показують, що за рахунок додавання до окатишів феритів кальцію, покращується відновність та можливе більш повне використання відновного потенціалу доменних газів із покращенням техніко-економічних показників доменної плавки.

Крім того, проведені дослідження дали змогу визначити також наступні характеристики окатишів: температури початку плавлення та повного розплавлення, а також ступінь відновлення при температурі 1000 °С та витримці при цій температурі протягом 3-х годин. Результати зведені до таблиці 3.

Таблиця 3

Високотемпературні властивості досліджуваних матеріалів

Матеріали	Вихідні матеріали		Відновлені матеріали		
	Т-ра початку плавл., °С	Т-ра повного розпл., °С	Ступінь відновн., %	Т-ра початку плавл., °С	Т-ра повного розпл., °С
Окатиші звичайні	1408	1778	80,9	1363	1723
Окатиші на основі комплексного флюсу	1433	1763	94,8	1413	1713

З таблиці видно, що температурний інтервал повного розплавлення окатишів на основі комплексного флюсу дещо нижчий, ніж у звичайних. Це пов'язано із підвищення температури початку плавлення даних окатишів. Також із таблиці видно, що ступінь відновлення в окатишів із комплексного флюсу вища, ніж у звичайних.

Крім того, дослідження окатишів під мікроскопом показали, що у звичайних окатишах співвідношення гематиту та магнетиту в структурі складає 1:1. Для дослідних окатишів це співвідношення складає 9:1, що свідчить що гематит є основним оксидом заліза, який активно впливає на процеси мінералоутворення.

Фазовий склад звичайних та окатишів на основі комплексного флюсу наведений на рис.15.

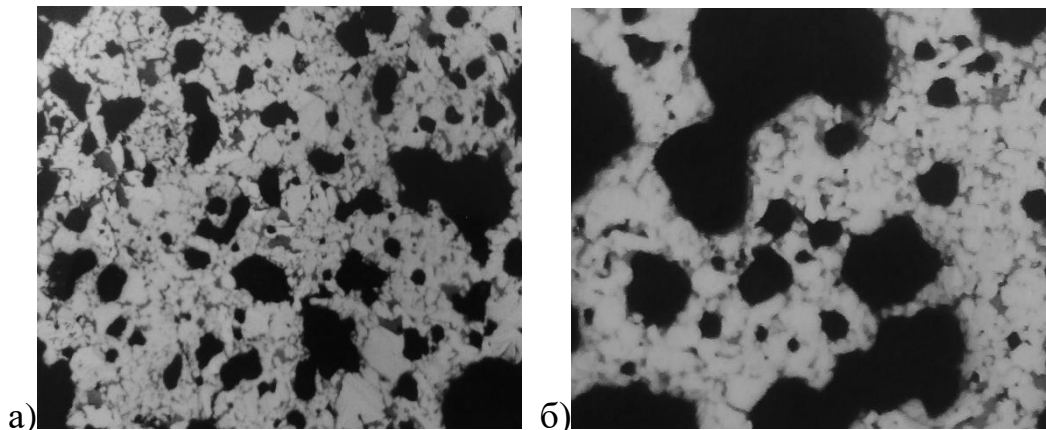


Рис.15 – Мікрофотографія структур окатишів на основі комплексного флюсу (а) та звичайних (б)  
Світло-сіре - магнетит, біле – гематит, темно-сіре – зв'язка, чорне – пори.

З рис.15 видно, що звичайні окатиші та окатиші на основі комплексного флюсу мають зональну структуру. Пори в звичайних окатишах крупніші та роз'єднані між собою, а пористість окатишів на основі комплексного флюсу виражена більш дрібними порами. Структура окатишів на основі комплексного флюсу наближається до агломератовидної, що і знайшло відображення у величині температурного інтервалу розплавлення.

Ці дані показують, що, як і при спікання агломерату, так і при отриманні окатишів використання в шихті комплексного флюсу є дієвим фактором підвищення ефективності виробництва та покращення якості окатишів.

Результати проведених досліджень показують високу ефективність використання комплексного флюсу, виробленого при суміщенні процесів випалу вапняку та утворення феритів кальцію. Використання в доменній шихті агломерату та окатишів, вироблених при використанні комплексного флюсу, дозволить підвищити ефективність доменної плавки за рахунок суттєвого покращення їх якості.

## ВИСНОВКИ

*У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача, яка полягає у розробці технології виробництва нового типу матеріалу – комплексного флюсу для підвищення ефективності процесів окискування металургійної сировини.*

1. На основі літературного аналізу показано, що сучасний підхід до вибору флюсів не враховує в повній мірі особливості їх поведінки в процесах твердо- та рідкофазного спікання залізородних матеріалів. На окремих підприємствах України в процесах підготовки металургійної сировини використовують новий флюсовий матеріал - комплексний флюс, але ефективність його використання є недостатньо високою через відсутність теоретичного та експериментального обґрунтування оптимальних схем його виробництва і використання.

2. Встановлено, що комплексний флюс високої якості може бути отримано шляхом поєднання в один двох важливих процесів таких, як випал вапняку та утворення феритів кальцію. Цей процес реалізується шляхом спікання на конвеєрній машині за агломераційною технологією комбінованих гранул, які включають кусочки вапняку крупністю 3-10 мм з накоченим на них шаром тонкоподрібненого залізовмісного матеріалу. Термодинамічний аналіз показав високу ймовірність взаємодії свіжовипаленого в процесі дисоціації вапняку вапна із оксидами рудного матеріалу з утворенням комплексного флюсу заданого складу і властивостей.

3. Показано, що ефективність взаємодії свіжовипаленого вапна та оксидів залізовмісних матеріалів в реакційному просторі визначається характеристиками рудних матеріалів, їх крупністю та способом накочення, крупністю вапняку та вологістю шихти, величиною температури та кількості теплоти, які забезпечуються ефективним спалюванням твердого палива. Встановлено, що при спільному випалі вапняку та залізовмісного матеріалу при температурах 1100 - 1300 °С спікання комплексного флюсу відбувається через процес плавлення евтектики на основі феритів кальцію. Мікроструктура зразків випалених гранул із концентрату та залізної руди підтверджують вищесказане

4. Визначено механізм температурно-теплової обробки комбінованих гранул. Розроблено математичну модель процесу обпалювання гранул на конвеєрній машині, яка забезпечує можливість проведення розрахункової оцінки ефективності протікання теплових та хімічних перетворень в реакційному просторі в процесі утворення комплексного флюсу.

5. Розроблено основні параметри технологічного режиму виробництва комплексного флюсу. Показано, що для отримання комплексного флюсу заданого складу та властивостей крупність вапняку та твердого палива повинна бути, відповідно, в межах 3 - 10 та 0 - 5 мм, крупність залізовмісного матеріалу до 0,01 мм, вологість шихти 5 - 6%, витрата твердого палива на процес 8 - 9%.

6. Визначена ефективність використання комплексного флюсу в процесах окискування металургійної сировини. Заміна вапняку в аглошихті комплексним флюсом призвела до того, що вихід годного агломерату збільшився на 8,37%,

індекс на удар збільшився на 2,96%, а питома продуктивність аглоустановки - на 16,02%. При заміні вапняку та вапна в аглошихті комплексним флюсом вихід годного збільшився на 4,97%, індекс на удар на 0,17%, а питома продуктивність зросла на 3,31%. Заміна вапняку та бентоніту при виробництві окатишів призвело до зростання їх відновності на 25% та зниження температурного інтервалу повного розплавлення окатишів, пористість окатишів на основі комплексного флюсу виражена наявністю пор малого розміру, а також структура таких окатишів наближається до агломератовидної.

7. Показано, що основною причиною суттєвого покращення показників процесів виробництва агломерату та окатишів є зниження витрат теплової енергії, зокрема на дисоціацію вапняку, а також суттєве покращення процесів в зонах твердо- та рідкофазного спікання. При заміні вапняку комплексним флюсом при спіканні агломерату знижуються витрати твердого палива на 1,3 - 1,5%.

8. Використання в доменних печах агломерату, виготовленого із використанням комплексного флюсу, призведе до покращення техніко-економічних показників роботи доменної печі, а саме: підвищення продуктивності печі на 8% та зниження витрат коксу на 4%.

### **Основний зміст дисертації відображено в наступних публікаціях:**

#### **1. Фахові видання:**

1. Бочка В. В. Особенности поведения известняка в присутствии железосодержащего материала при совместном спекании / В. В. Бочка, А. В. Двоеглазова, А. А. Сова. // *Металл и Литьё Украины*. – 2016. – №7. – С. 17–19

2. Бочка В. В. Влияние крупности известняка на технологические показатели процесса спекания комплексного флюса / В. В. Бочка, А. В. Двоеглазова, А. В. Сова. // *Металл и Литьё Украины*. – 2016. – №11-12. – С. 12–15.

3. Бочка В.В. Разработка технологических показателей процесса спекания комплексного флюса из комбинированных гранул // В.В Бочка, А.В. Двоеглазова, А. В. Сова и др. // *Металл и Литьё Украины*. – 2017. – №8-10. – С. 39–42.

4. Бочка В.В. Исследования влияния добавки железосодержащего материала на степень и скорость диссоциации известняка. // В.В Бочка, А.В. Двоеглазова, А. В. Сова // *Теория и практика металлургии*. – 2017. - №3-4. – С. 10-14

#### **2. Статті у наукових виданнях інших держав:**

5. Бочка В.В Исследование процесса термической диссоциации известняка в присутствии железорудного концентрата. // В.В. Бочка, А.В. Двоеглазова, А.В. Сова // *Коллективная монография №56 «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. – Poland-Częstochowa, 2016. - №56 – P. 33-36.*

#### **3. Патенти на корисну модель:**

6. Спосіб отримання комплексного флюсу (залізофлюсу). Патент на корисну модель №117158 Україна // В.В Бочка, А.В. Двоеглазова, А. В. Сова та ін. // опубл. 26.06 2017 Бюл. №11.

7. Спосіб отримання комплексного флюсу. Патент на корисну модель №115725 Україна - В. В. Бочка, *А.В. Двоєглазова*, А.В. Сова та ін. //опубл.25.04.2017 Бюл.№8.

#### **4. Матеріали наукових конференцій:**

8. Бочка В. В. Дослідження впливу комплексного флюсу на показники агломераційного процесу / В. В. Бочка, *А. В. Двоєглазова*, А. В. Сова та ін. // Матеріали конференції «Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти. – 2017. – С. 238–243.

9. Бочка В.В. Обоснование и выбор параметров технологии получения комплексного флюса / В. В. Бочка, *А. В. Двоєглазова*, А. В. Сова и др. // Матеріали 15-тої Всеукраїнської науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра. – 2017. – №1. – С. 268–279.

10. Бочка В.В. Дослідження особливостей аглопроцесу при використанні в шихті комбінованого флюсу. / В. В. Бочка, *А. В. Двоєглазова*, А. В. Сова та ін. //Матеріали 41-ої Міжнародно науково-технічної конференції молоді, м. Запоріжжя. 20-21 листопада 2014р. – Запоріжжя:ВАТ «Запоріжсталь». - С.15.

11. Двоєглазова А.В. Особенности формирования минералогического состава агломерата различной основности / *А. В. Двоєглазова*, В. В. Бочка, С. Е. Сулименко // Материалы XI Международной научно-практической конференции «Литье. Металлургия 2015». г. Запорожье. 26-28 мая 2015 г. – Запорожье: ЗТПП. - С. 325.

12. Двоєглазова А.В. Дослідження впливу особливостей отримання залізофлюсу високої основності/ *А. В. Двоєглазова*, Т. В. Кожанов // Матеріали 42-ої Міжнародно науково-технічної конференції молоді м. Запоріжжя. 26-27 листопада 2014р. – Запоріжжя: ВАТ «Запоріжсталь». - С.14.

13. Двоєглазова А.В. Анализ термодинамических характеристик реакции разложения известняка. / *А. В. Двоєглазова*, В. В. Бочка, А. В. Сова та ін. Материалы XII Международной научно-практической конференции «Литье. Metallургия 2016». г. Запорожье. 24-26 мая 2016 г. – Запорожье: ЗТПП. - С. 337.

14. Двоєглазова А.В. Технологія виробництва комплексного флюсу. / *А. В. Двоєглазова*, В. В. Бочка, А. В. Сова та ін. // Матеріали 43-ої Міжнародно науково-технічної конференції молоді, м. Запоріжжя. 10 - 11 листопада 2016р. – Запоріжжя: ВАТ «Запоріжсталь». - С.14.

#### **Анотація**

Двоєглазова А.В. «Удосконалення технології одержання комплексного флюсу на основі вапняку та залізовмісних матеріалів шляхом їх спільної термічної обробки». – Рукопис.

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-2018.



Метою роботи є розробка технології виробництва комплексного флюсу шляхом поєднання процесів одержання вапна та феритних сполук.

При розробці технології одержання комплексного флюсу заданого складу та властивостей були сформульовані основні вимоги до гранулометричного складу та співвідношення шихтових компонентів. Встановлені основні параметри технологічного режиму виробництва комплексного флюсу.

Також були проведені дослідження щодо заміни вапняку в складі агломераційної шихти комплексним флюсом. Це призвело до збільшення виходу годного на 8,37%, збільшення індексу на удар на 2,96%, росту питомої продуктивності - 16,02%. При заміні вапняку та бентоніту при виробництві окатишів комплексним флюсом зросла їх відновність на 25%, зменшився температурний інтервал повного розплавлення окатишів. У пористій структурі окатишів переважали пори малого розміру, а структура таких окатишів наблизилась до агломератовидної.

**Ключові слова:** комплексний флюс, феритно-кальцієва суміш, концентрат, вапняк, залізна руда, вапно, агломерат, гранулометричний склад, рівняння регресії, комбіновані гранули.

### **Absract**

Dvoeihlazova A. "Improvement of the technology of the complex flux obtaining, based on the joint heat treatment of limestone and ore-containing materials". – The manuscript.

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 - 2018.

The aim of this work is the development of the obtaining of the complex flux technology, which is based on the combination of the lime and ferrite compounds production processes.

Requirements for the granulometric and the ratio composition of charge components have been formulated. The basic parameters of the technological mode of complex flux production have been established.

The research of the replacement of limestone in the composition of sinter charge by the complex flux was conducted. The results were in the 8,37% increasing of the sinter quality yield, the 2,96% increasing of the sinter strength, and the 16,02% increasing of the specific productivity. The replacing of limestone and bentonite in the pellet charge by the complex flux increased the pellets reduction index by 25% and decreased the temperature range of the complete melting of the pellets. The structure of a porosity of the pellets is expressed in the presence the pores of smaller size, and the structure of these pellets is approaching to agglomerative.

**Keywords:** complex flux, ferrite-calcium mix, concentrate, limestone, iron ore, lime, agglomerate, particle size distribution, the regression equation, combined granules.

**ДВОЄГЛАЗОВА АЛІСА ВІКТОРІВНА**

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ КОМПЛЕКСНОГО  
ФЛЮСУ НА ОСНОВІ ВАПНЯКУ ТА ЗАЛІЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ  
ПРИ ЇХ СПІЛЬНІЙ ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ**

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеню  
кандидата технічних наук