

УДК 622.781

№ держреєстрації 0124U004175

Товариство з обмеженою відповідальністю  
«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
69008, м. Запоріжжя вул. Південне шосе 80



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

проректор з науково-дослідної роботи  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Володимир КУХАР  
«04» липня 2025 року

**ЗВІТ**  
**ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ**  
**«Удосконалення процесів підготовки залізорудної сировини**  
**для металургійних підприємства України»**  
**(проміжний)**

Етап 1. Удосконалення процесів агломерації та виробництва окатишів

Науковий керівник, к.т.н., доцент

Юрій РЕКОВ  
«30» червня 2025 року

2025

Рукопис закінчено «30» червня 2025 року

Результати роботи розглянуто Науково-технічною радою  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»,  
протокол № 12 від «04» липня 2025 року

## СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР,  
к.т.н., доцент



Реков Ю.В.

Відповідальний  
виконавець,



Семірягін С.В.

к.т.н., доцент

Виконавець,

Чупринов Є.В.

к.т.н., доцент

Виконавець,



Ягольник М.В.

к.т.н., доцент

Виконавець,



Бойко М.М.

к.т.н., доцент

Виконавець,



Копитько О.Г.

ст. гр. 136А-23-1м

Виконавець,



Омельченко М.М.

ст. гр. 136А-23-1м

Виконавець,



Уманський М.А.

ст. гр. 136А-23-1м

## РЕФЕРАТ

**ЗВІТ про НДР: 30 с., 4 джерела.**

**Ключові слова:** окатиші, агломерат, металургія, технологія, спікання, паливо, бентоніт

**Об'єкт дослідження** – металургійна промисловість України.

**Мета роботи** – аналіз потенціальних шляхів покращення технологій підготовки залізородної сировини для доменних печей України.

**Предмет дослідження:** процеси виробництва агломерату та залізородних окатишів.

**Результати та їх новизна:** в рамках даної науково-дослідної роботи досягнуто значних результатів, спрямованих на підвищення ефективності аглодоменного виробництва. Новизна полягає у розробці та підтвердженні ефективності кількох інноваційних технологічних рішень, які не потребують значних капіталовкладень. Зокрема, розроблено технологію двошарової шихти для спікання агломерату з диференційованим завантаженням палива, що дозволило оптимізувати розподіл теплоти, знизити питому витрату палива та підвищити якість агломерату. Досліджено та підтверджено можливість ефективного використання вітчизняних лужноземельних бентонітових глин (Черкаське родовище) для виробництва окатишів, що є заміною імпорتنій сировині. Також розроблено унікальний підхід до управління донною та бортовою постіллю в обпалювальних агрегатах: використання обпалених окатишів, діаметр яких на 1–3 мм перевищує максимальний діаметр готової продукції. Це рішення значно покращує міцність на удар і стирання придатної фракції при відновленні, оскільки запобігає розкристалізації заліzosилікатної зв'язки окатишів, які використовуються як постіль. Крім того, запропоновано та обґрунтовано технологію отримання нового типу

залізорудної сировини з підвищеним вмістом заліза та залишкового вуглецю для доменної плавки, а також оптимізовано паливний баланс доменних печей шляхом поєднання кускового антрациту з природним газом та офлюсованими спеками.

**Інформація щодо впровадження** – розроблені та запропоновані технології проходять випробування та впровадження на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та підприємствах гірничо-металургійного комплексу «Метінвест».

**Рекомендації щодо використання** – для підвищення конкурентоспроможності ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та інших металургійних підприємств рекомендується негайне впровадження розроблених технологій. Першочергово слід модифікувати процес спікання агломерату шляхом впровадження технології двошарової шихти, що легко реалізується на існуючих потужностях без суттєвої реконструкції. Також критично важливим є перехід на використання вітчизняних бентонітових глин (зокрема, Черкаського родовища) для виробництва окатишів, що вимагає оптимізації вологості шихти. Для виробництва окатишів для металізації рекомендується змінити параметри грохотів для виділення окатишів більшого діаметру (+1-3 мм) для використання в якості донної та бортової постілі. Це дозволить суттєво покращити якість готової продукції. Нарешті, слід впровадити оптимізований паливний баланс доменних печей, що включає використання нового типу залізорудної сировини та поєднання кускового антрациту з природним газом.

**Сфера застосування:** розроблені технологічні рішення мають пряме застосування в аглодоменному виробництві металургійних підприємств повного циклу. Зокрема, вони орієнтовані на оптимізацію процесів на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», але можуть бути масштабовані та впроваджені на будь-яких аналогічних підприємствах, які прагнуть модернізувати своє агломераційне та

доменне виробництво. Ці технології особливо актуальні для підвищення якості вихідної сировини для подальших процесів металізації та покращення показників доменної плавки. Крім металургії, дослідження щодо використання вітчизняних бентонітових глин відкривають можливості для розвитку гірничодобувної галузі в Україні та зниження залежності від імпорту.

**Економічна та соціально-економічна ефективність роботи:** впровадження запропонованих рішень забезпечить значну економічну ефективність. Технологія двошарової шихти дозволяє знизити витрату дорогого палива, а використання вітчизняних бентонітових глин замість імпортних суттєво покращить імпорто-експортний баланс підприємства та країни. Оптимізація паливного балансу доменних печей (поєднання кускового антрациту з природним газом) дозволяє досягти світових показників продуктивності, скоротивши при цьому витрату коксу до 322,68 кг/т. Найважливіше, що ці результати досягаються без значних капіталовкладень, оскільки реалізуються на існуючому обладнанні з мінімальними модифікаціями. Соціально-економічна ефективність проявляється у створенні нових робочих місць у видобувній галузі (використання Черкаського родовища) та підвищенні екологічності виробництва.

**Значимість роботи:** значимість роботи полягає у її прямому внеску у відновлення та сталий розвиток української металургійної галузі в умовах воєнного часу та глобальної конкуренції. Дослідження надають конкретні, економічно обґрунтовані шляхи для модернізації виробництва, підвищення його конкурентоспроможності та зниження залежності від зовнішніх факторів. Зокрема, підвищення якості продукції та зниження собівартості є критичними для виживання та успішного функціонування металургійних підприємств, таких як ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Робота також підкреслює

важливість раціонального використання внутрішніх ресурсів та інноваційних підходів для забезпечення високих техніко-економічних показників виробництва.

**Висновки, пропозиції щодо розвитку об'єкта дослідження й доцільності продовження досліджень:** висновки, пропозиції щодо розвитку об'єкта дослідження й доцільності продовження досліджень.

Проведені дослідження переконливо доводять значний потенціал для підвищення ефективності аглодоменного виробництва шляхом впровадження інноваційних рішень, що не потребують значних капіталовкладень. На основі отриманих результатів, об'єкт дослідження (ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг») має всі можливості для сталого розвитку завдяки своєму інтегрованому циклу та сировинній базі.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП   | 8  |
| 1. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ДВОШАРОВОГО СПІКАННЯ АГЛОМЕРАТУ  | 10 |
| 2. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІТЧИЗНЯНИХ БЕНТОНІТІВ   | 15 |
| 3. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ЗА РАХУНОК ПОКРАЩЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВКИ ДОННОЇ ТА БОРТОВОЇ ПОСТІЛІ | 26 |
| ВИСНОВКИ  | 29 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ  | 30 |

## ВСТУП

Українська металургійна галузь перебуває в критичній ситуації, спричиненій руйнівними наслідками повномасштабного вторгнення, що призвело до дестабілізації виробничих потужностей, порушення логістичних ланцюгів та енергетичної інфраструктури. Ці фактори, поряд із дефіцитом робочої сили, зростанням вартості енергоносіїв та сировини, а також посиленням глобальної конкуренції, створюють значні перешкоди для відновлення та сталого розвитку галузі. Незважаючи на це, існує значний потенціал для модернізації та підвищення конкурентоспроможності шляхом впровадження інноваційних технологій, ефективного використання внутрішніх ресурсів та оптимізації виробничих процесів.

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є одним з найбільш значущих та конкурентоспроможних підприємств в українській металургії завдяки своїй інтегрованій структурі, що включає власну сировинну базу (родовища залізної руди), а також потужні коксохімічне, доменне та сталеплавильне виробництва. Однак, наявність значної частки зливкового переділу та застаріле прокатне обладнання вимагають невідкладного переходу на використання безперервнолитої заготовки та комплексного вдосконалення технологічних процесів на всіх етапах, зокрема в аглодоменному виробництві. Це включає не лише оптимізацію виробництва агломерату та окатишів, але й підвищення їхніх металургійних властивостей, особливо для процесів металізації, що висувають жорсткіші вимоги до якості вихідної сировини.

Дана науково-дослідна робота має на меті всебічний аналіз та розробку технологічних рішень, спрямованих на підвищення конкурентоспроможності українських металургійних підприємств на прикладі ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» шляхом вдосконалення

аглодоменного виробництва. Дослідження охоплюють оптимізацію процесу спікання агломерату, розширення використання вітчизняної сировини для виробництва окатишів, поліпшення якості окатишів для металізації через управління розміром постілі, а також розробку нового типу залізорудної сировини та оптимізацію паливного балансу для доменної плавки. Кінцевою метою є покращення якості продукції, зниження її собівартості, мінімізація екологічного впливу та забезпечення високих техніко-економічних показників.

## 1. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ДВОШАРОВОГО СПІКАННЯ АГЛОМЕРАТУ

В рамках даної науково-дослідної роботи було проведено комплексний аналіз та експериментальні дослідження за декількома взаємопов'язаними напрямками, спрямованими на підвищення ефективності аглодоменного виробництва.

Одним з ключових напрямків стала оптимізація процесу спікання агломерату. Існуюча проблема нерівномірного розподілу теплоти в агломераційному шарі призводить до зниження металургійних характеристик продукції та підвищеної витрати дорогого палива. Для усунення цього недоліку була розроблена технологія двошарової шихти, що передбачає диференційоване завантаження твердого палива з різною реакційною здатністю: високореакційне паливо концентрується у верхній половині шару, а паливо з низькою реакційною здатністю – у нижній. Лабораторні дослідження підтвердили, що такий підхід дозволяє значно покращити якість агломерату, знизити питому витрату палива та збільшити продуктивність процесу. Важливою перевагою є можливість впровадження цієї схеми без суттєвої реконструкції та капітальних вкладень на діючих аглофабриках.

Для відпрацювання оптимальної технології спікання агломерату проведені дослідження з вивчення режимів спікання двошарових шихт з різними кількістю і реакційною здатністю твердого палива в верхньому і нижньому шарах шихти, що спікається. Дослідження проводилися на напівпромислових лабораторних установках типу «аглочаша», що дозволяють моделювати промисловий процес: лабораторній напівпромисловій установці агломераційного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» з внутрішнім розміром 300 × 300 мм, висотою шару, що спікається, 300-500 мм) (рис. 1); лабораторній

напівпромислової установці Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій з внутрішнім діаметром 100 мм, висотою шару, що спікається 300 мм (рис. 2).



Рисунок 1 - Лабораторна напівпромислова установка агломераційного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»



Рисунок 2 - Лабораторна напівпромислова установка ННТІ Державного університету економіки і технологій

Методикою проведення роботи передбачалося, що кількість і фізико-хімічні характеристики залізорудної і флюсової складової в верхньому і нижньому шарах аглошихти у всіх випробуваннях були постійними. Хімічний склад і теплотехнічні характеристики використовуваних твердих палив в шарах аглошихти також не змінювалися. Змінювалися лише кількість і реакційна здатність твердого палива у верхньому і нижньому шарах завантажуваної в аглошашу шихти, що агломерується. Газодинамічні та температурні параметри спікання аглошихти у всіх випробуваннях також витримувалися незмінними. В якості палива з низькою реакційною здатністю використовували антрацит, а з високою реакційною здатністю – коксовий дріб'язок.

В першу чергу було здійснено спікання базової шихти, в яку вводилася вся задана кількість твердого палива з однаковою середньою ( $CRI = 36,7 \%$ ) реакційною здатністю і крупністю (0-3 мм). Режим спікання базової шихти відповідав прийнятим режимам на діючих аглофабриках. У всіх дослідах для перевірки достовірності проводили по три спікання, при цьому, отримані результати практично не відрізнялися між собою. У таблиці представлені середні арифметичні характеристики отриманого агломерату з базової шихти. Якість агломерату, отриманого за розробленими технологіями, порівнювалася з агломератом з базової шихти.

Потім у дослідну вихідну шихту вводили 10-30 % від усього розрахованого необхідного загального значення питомої витрати вуглецю, яке вносилося високореакційним ( $CRI > 37 \%$ ) твердим паливом. Після цього, в процесі укладання огрудкованої шихти на спікальні візки у верхню половину аглошару шихти вводили додатково вуглець у твердому паливі також з високою ( $CRI > 37 \%$ ) реакційною здатністю в кількості на 5-15 % більше середнього розрахункового значення вуглецю у всьому шарі, а в нижню половину шару вводили вуглець у твердому паливі з низькою ( $CRI < 37 \%$ ) реакційною здатністю в кількості на 10-20 % менше середнього розрахункового значення вуглецю у всьому шарі.

Уведення 10-30 % від розрахованого необхідного загального значення питомої витрати вуглецю, яке вноситься високореакційним ( $CRI \geq 37 \%$ ) твердим паливом у вихідну шихту для верхньої половини шару і рівномірний його розподіл в огрудкованій шихті по висоті всієї верхньої половини агломераційного шару, за рахунок його займання при менших температурах, дозволить раніше створювати джерело теплоти та сприяти повному вигорянню в цій частині шару низькорекційного палива. Збільшена кількість високореакційного палива у верхній половині шару дозволяє отримати необхідну

температуру і необхідну кількість теплоти для якісного спікання шихти в цій частині шару до моменту різкого охолодження агломерату холодним повітрям. Результати випробувань, наведені в таблиці 1, показують, що оптимальні показники відповідають дослідним періодам 2 і 3 із зазначеними співвідношеннями вмісту вуглецю в шихті, а також у верхній і нижній половинах агломераційного шару шихти, що містять тверде паливо з високою ( $CRI \geq 37\%$ ) і низькою ( $CRI < 37\%$ ) реакційною здатністю. Отримані результати дозволяють підвищити питому продуктивність аглочаші з 1,41 до 1,45-1,46  $t/m^2 \cdot год$ ; питому витрату вуглецю твердого палива знизити з 52,3 до 50,6-51,1 (кг С)/т, вміст залишкового вуглецю в агломераті зменшити з 1,6 до 0-0,1 %, вміст дріб'язку в агломераті знизити з 8,5 до 6,7-7,2 %, а також покращити характеристики міцності агломерату.

Таблиця 1 - Вплив кількості, крупності та реакційної здатності твердого палива у верхньому та нижньому шарах аглошихти на технологію спікання та якість агломерату

| Періоди досліджень           | Питома продуктивність аглочаші, $t/m^2 \cdot ч$ | Загальна питома витрата вуглецю, кг/т агломерату | Вміст вуглецю, %                     |                          | Вміст залишкового вуглецю в агломераті, % |
|------------------------------|---|--|--------------------------------------|--------------------------|---|
|                              |   |  | розрахований у всьому шарі аглошихти | у шарах шихти в аглочаші |   |
| Базовий:                     | 1,41  | 52,3   | 4,36                                 |                          | 1,6                                       |
| верх шару ( $CRI = 36,7\%$ ) |   |  |                                      | 4,36                     | 2,8                                       |
| низ шару ( $CRI = 36,7\%$ )  |   |  |                                      | 4,36                     | 0,7                                       |
| Дослідний 1:                 | 1,30  | 51,9   | 4,29                                 |                          | 0,6                                       |
| верх шару ( $CRI > 37\%$ )   |   |  |                                      | 4,52                     | 0,7                                       |
| низ шару ( $CRI < 37\%$ )    |   |  |                                      | 4,06                     | 0,4                                       |
| Дослідний 2:                 | 1,45  | 50,6   | 4,25                                 |                          | 0,1                                       |
| верх шару ( $CRI > 37\%$ )   |   |  |                                      | 4,58                     | 0,1                                       |
| низ шару ( $CRI < 37\%$ )    |   |  |                                      | 3,92                     | 0   |
| Дослідний 3:                 | 1,46  | 51,1   | 4,31                                 |                          | 0,1                                       |
| верх шару ( $CRI > 37\%$ )   |   |  |                                      | 5,01                     | 0   |
| низ шару ( $CRI < 37\%$ )    |   |  |                                      | 3,39                     | 0,1                                       |
| Дослідний 4:                 | 1,38  | 52,1   | 4,49                                 |                          | 0,5                                       |
| верх шару ( $CRI > 37\%$ )   |   |  |                                      | 5,23                     | 0,7                                       |
| низ шару ( $CRI < 37\%$ )    |   |  |                                      | 3,34                     | 0,2                                       |

## Продовження таблиці 1

| Періоди досліджень      | Вміст дріб'язку 0-5 мм в агломераті 0-5 мм, % | Барабанна проба, %       |                                 | Вміст в агломераті, % |      |                   |
|-------------------------|---|--------------------------|---------------------------------|-----------------------|------|-------------------|
|                         |   | міцність на удар (+5 мм) | показник стиранності (0-0,5 мм) | Fe <sub>заг</sub>     | FeO  | основність, д.од. |
| Базовий:                | 8,5   | 63,1                     | 7,3                             | 53,6                  | 11,7 | 1,28              |
| верх шару (CRI =36,7 %) |   |                          |                                 |                       |      |                   |
| низ шару (CRI = 36,7 %) |   |                          |                                 |                       |      |                   |
| Дослідний 1:            | 8,3   | 63,2                     | 7,1                             | 53,5                  | 11,9 | 1,30              |
| верх шару (CRI >37 %)   |   |                          |                                 |                       |      |                   |
| низ шару (CRI <37 %)    |   |                          |                                 |                       |      |                   |
| Дослідний 2:            | 7,2   | 65,1                     | 6,4                             | 53,7                  | 11,2 | 1,27              |
| верх шару (CRI >37 %)   |   |                          |                                 |                       |      |                   |
| низ шару (CRI <37 %)    |   |                          |                                 |                       |      |                   |
| Дослідний 3:            | 6,7   | 66,3                     | 5,7                             | 53,9                  | 11,3 | 1,29              |
| верх шару (CRI >37 %)   |   |                          |                                 |                       |      |                   |
| низ шару (CRI <37 %)    |   |                          |                                 |                       |      |                   |
| Дослідний 4:            | 7,9   | 63,6                     | 7,2                             | 53,4                  | 11,5 | 1,25              |
| верх шару (CRI >37 %)   |   |                          |                                 |                       |      |                   |
| низ шару (CRI <37 %)    |   |                          |                                 |                       |      |                   |

У ході проведених досліджень було визначено оптимальні режими спікання із зазначеним співвідношенням вмісту вуглецю у двошаровій шихті. Показано, що використання палива з високою (CRI  $\geq 37$  %) та низькою (CRI  $< 37$  %) реакційною здатністю за розробленою технологією дозволяє вирішити проблеми погіршення середніх значень металургійних характеристик всього шару агломерату та перевитрати питомої витрати твердого палива. Запропонований спосіб агломерації дозволить підвищити питому продуктивність аглочаші, знизити питому витрату вуглецю твердого палива, зменшити вміст залишкового вуглецю в агломераті і поліпшити характеристики міцності агломерату. Напрямок подальших досліджень повинні стати промислові відпрацювання розробленої технології.

## **2. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІТЧИЗНЯНИХ БЕНТОНІТІВ**

Паралельно, значна увага була приділена питанню виробництва залізорудних окатишів, зокрема можливості використання вітчизняних бентонітових глин. Історична залежність від імпорتنих бентонітів та вплив жорсткості технологічної води на якість сирих окатишів стали рушійною силою для досліджень потенціалу лужноземельного бентоніту Черкаського родовища. Детальний аналіз впливу вологості шихти та типу бентоніту на фізико-механічні властивості окатишів показав, що оптимізація вологості сприяє кращому диспергуванню бентоніту та формуванню міцніших структурних зв'язків, що позитивно впливає на динамічну міцність, пористість та температуру «шоку» окатишів. Підтверджено, що українська бентонітова глина має високий потенціал для впровадження у виробництво окатишів, що дозволить покращити імпортно-експортний баланс та залучити інвестиції в національну економіку.

Були проведені лабораторні випробування по визначенню придатності різних за мінералогічним складом і обмінним іонним комплексом бентонітових глин для виробництва окатишів. Окатиші діаметром 12-13 мм отримували на лабораторному грануляторі при безперервному режимі роботи. Підготовка шихтових матеріалів полягала в наступному: усереднена проба бентонітової глини сушилася при температурі 105-110 °С, а потім подрібнювалася до крупності 95 % класу 0,05 мм. Подрібнена бентонітова глина дозувалася на вологий концентрат. Вага проби становила 100 кг, а її змішування проводилося в барабанному змішувачі з ефективністю змішування більше 95 %.

У процесі досліджень визначалися: вологість окатишів, міцність при стисненні сирих і сухих окатишів, кількість скидань сирих окатишів з висоти 0,3 метра на гумову плиту і температура «шоку» при швидкості фільтрації теплоносія через шар сирих окатишів 1,2 м/с.

Витрата бентонітового порошку для огрудкування зазвичай становить 0,5-0,7 % в сухій масі по відношенню до вологого концентрату. У першій серії дослідів була прийнята дещо більша (1 %) витрата сполучного, щоб вплив досліджуваних глин на показники якості окатишів виявився більш помітним. Крім селективно відібраних проб (по шарах) досліджували суміші проб в різних співвідношеннях (табл. 2), беручи до уваги, що при видобутку в кар'єрі співвідношення глин різних різновидів може змінюватися в широких межах, а селективна виїмка і складування можуть виявитися практично нездійсненими.

В деякі суміші додавали каолініт. Результати дослідів (див. табл. 2) свідчать про те, що при підвищеній питомій витраті бентоніту міцність на удар (скидання) і опір стисненню сирих окатишів з добавкою черкаського Са-бентоніту не поступається цим же властивостям окатишів з використанням в якості сполучного лужного саригюхського бентоніту. Міцність сирих окатишів в усіх дослідях була вище існуючих в практиці огрудкування вимог (ударна міцність 5,6 скидань без руйнування, опір стисненню 7,35-7,85 Н/окатиш). Опір стиску висушених окатишів приблизно вдвічі перевищував мінімальні вимоги – 22,6-25,5 Н/окатиш.

Таким чином, при відповідній кількості бентонітового порошку в шихті з глин Черкаського родовища можна отримати сирі окатиші необхідної якості. При використанні глин IV шару сирі окатиші з усіх типів концентратів характеризувалися в середньому найбільш високими значеннями міцності при стисненні після підсушування і температури «шоку». У разі добавки до глини IV шару 50 %

палигорскітової глини III шару міцність сухих окатишів з концентратів ЛебГЗКа і ЦГЗК знизилася відповідно з 57,9 до 48,1 Н/окатиш і з 59,8 до 53,9 Н/окатиш при стабільних значеннях динамічної та статичної міцності сирих окатишів.

Добавка до глини IV шару тільки каолініту (50 %) теж поліпшила якість сирих окатишів. Сприятливе поєднання властивостей сирих окатишів ЦГЗК (динамічна міцність 14,9 скидань, статична міцність 15,1 Н/окатиш, опір стисненню після підсушування 64,7 Н/окатиш, температура «шоку» 540 °С) отримано при добавці до глини IV шару 40 % глини II шару і 20 % каолініту. Для концентрату ЛебГЗКа вказаному складу суміші бентонітових глин відповідали середні значення якості сирих окатишів.

З концентратів ЛебГЗКа і ЦГЗК отримані окатиші хорошої якості при добавці 1 % бентонітової глини II шару. Добавка до цієї глини невеликої кількості палигорскіту (20 %) не погіршує якість окатишів з концентрату ЦГЗК. Окатиші ПівнГЗК зі сполучним з глини II шару характеризується зниженою міцністю при стисканні після підсушування. Це ж відноситься до окатишів з концентрату ЦГЗК з використанням глини тільки III шару.

Таким чином, найбільш сприятливим, для забезпечення гарної якості сирих окатишів, різновидом глин Черкаського родовища є глини IV шару, що представляють собою природну суміш лужноземельного бентоніту II шару і палигорскіту (III шару) в змінному співвідношенні, від 1:1 до 4:1.

Високі показники якості окатишів отримані для сумішей глин II і III шарів (в діапазоні співвідношень, характерних для IV шару).

При всіх видах випробуваних сполучних добавок обпалені окатиші характеризувалися високими фізико-механічними і металургійними властивостями (табл. 2). Вплив типу бентоніту на властивості готових обпалених окатишів не простежується. Найбільш

високу температуру «шоку» мали окатиші з глиною IV шару Черкаського родовища. Слід зазначити, що температура «шоку» за даними дослідів в великій мірі залежить також від крупності концентрату. Так для більш тонкого концентрату ПівнГЗК вона була на 45-90 °С нижче в порівнянні з окатишами з концентрату ЦГЗК.

З огляду на результати попередніх досліджень, подальші досліді проводили з бентонітами IV шару і сумішшю глин IV і II шару в співвідношенні 1:2. Оскільки глина IV шару являє собою природну суміш глин II і III шару, додавання до неї глини II шару дає нову композиційну суміш, яку потрібно розглядати крім того і як особливий різновид IV шару з підвищеним вмістом лужноземельного бентоніту, і як суміш глин III шару і II шару.

При зменшенні витрати бентоніту з 1 % до 0,5 % показники якості сирих окатишів знизилися практично до однакового, але прийняттого для огрудкування рівня для обох видів бентонітів: саригюхського і черкаського (IV шар) (табл. 3).

Обпалені окатиші з добавкою черкаського бентоніту при однакових фізико-механічних властивостях в холодному стані показали трохи більше руйнування при відновленні ніж в дослідях з лужним саригюхським, хоча їх міцність при низькотемпературному відновленні відповідає сучасним вимогам: стиранність 5,75 %, вихід класу +5 мм – 76,7 % (при необхідному – не менше 70 %). Збільшення витрат бентоніту для концентрату ПівнГЗК не підвищило температуру «шоку».

У промислових умовах можуть мати місце значні коливання вологості концентрату, що надходить на огрудкування. У зв'язку з цим провели порівняльні досліді з різною вологістю шихти перед огрудкуванням, відповідно при різній вологості окатишів, з добавкою 0,5 % лужного та черкаського бентонітів (суміш глин IV і II шарів, табл. 4).

В обох випадках зі збільшенням вологості спостерігається аналогічний характер зміни властивостей окатишів: як для саригюхського так і для черкаського бентонітів: підвищується динамічна міцність з 5,6-5,2 до 10,6-10,1 скидань, пористість (на рис. 1-3, представлені середні показники трьох паралельних дослідів) і температура «шоку» окатишів (табл. 4).

Температури «шоку» сирих окатишів з лужноземельним бентонітом при однаковій вологості приблизно рівні температурам з лужним бентонітом. При збільшенні вологості сирих окатишів знижується міцність сирих і сухих окатишів, а пористість і міцність на скидання зростають. Збільшення вологості окатишів вище 9,3 % призводить до зниження статичної міцності окатишів нижче мінімального допустимого рівня (7,35-7,85 Н/окатиш) як для черкаського (6,67 Н/окатиш при 9,74 % вологості окатишів), так і для саригюхського бентоніту (6,37 Н/окатиш при вологості окатишів 9,65 %) У той же час при відносно високій вологості окатишів 9,3 % з Черкаським бентонітом, їх міцність (8,04 Н/окатиш) не нижче мінімальної межі.

Графічний аналіз даних, наведених в табл. 4 і на рис. 3-5 показує, що при однаковій вологості пористість сирих окатишів з Черкаським бентонітом приблизно на 0,8-1 % вище. При збільшенні вологості окатишів з 7,7-8,0 до 9,7 % збільшується їх пористість з 27 до 32 %.

Таблиця 2 - Властивості неофлюсованих окатишів з концентратів ЦГЗК, ЛебГЗК, ПівнГЗК з добавкою лужних бентонітів і глин черкаського родовища

| Найменування добавки                         | Концентрат | Властивості сирих окатишів     |                                  |       |                        | Властивості обпалених окатишів |                 |         |                        |
|--|------------|--------------------------------|----------------------------------|-------|------------------------|--------------------------------|-----------------|---------|------------------------|
|  |            | Кількість скидань з 300 мм/раз | Міцність при стисненні, Н/окатиш |       | Температура «шоку», °С | Міцність при стисненні, кН/ок  | Барабанна проба |         | Ступінь відновлення, % |
|  |            |                                | сирих                            | сухих |                        |                                | +5 мм           | -0,5 мм |                        |
| Саригюхський лужний                          | ЦГЗК       | 8,7                            | 9,81                             | 50,99 | 575                    | 4,19                           | 96,0            | 3,8     | 68,60                  |
| IV шар Черкаського род.                      |            | 8,8                            | 12,75                            | 59,82 | 580                    | 3,75                           | 95,6            | 4,4     | 67,25                  |
| II шар Черкаського род.                      |            | 12,4                           | 13,24                            | 59,82 | 540                    | 4,38                           | 96,1            | 3,9     | 60,90                  |
| III шар Черкаського род.                     |            | 10,7                           | 13,53                            | 42,17 | 540                    | не проводились                 |                 |         |                        |
| 50 % IV шару + 50 % III шару                 |            | 16,5                           | 16,38                            | 53,94 | 510                    | 4,11                           | 96,0            | 4,0     | 62,10                  |
| 50 % IV шару + 50 % каолініту                |            | 8,1                            | 14,51                            | 53,94 | 530                    | –                              | –               | –       | –                      |
| 40 % IV шару + 40 % II шару + 20 % каолініту |            | 14,9                           | 15,10                            | 64,72 | 540                    | 4,78                           | 96,2            | 3,7     | 46,80                  |
| 80 % II шару + 20 % III шару                 |            | 16,5                           | 11,77                            | 62,76 | 540                    | –                              | –               | –       | –                      |
| 50 % II шару + 50 % III шару                 |            | 14,3                           | 11,77                            | 54,92 | 530                    | –                              | –               | –       | –                      |
| Саригюхський лужний                          | ПівнГЗК    | 12,9                           | 14,91                            | 61,78 | 470                    | –                              | –               | –       | –                      |
| IV шар Черкаського род.                      |            | 18,8                           | 14,81                            | 57,86 | 490                    | –                              | –               | –       | –                      |
| II шар Черкаського род.                      |            | 14,5                           | 15,10                            | 45,11 | 495                    | –                              | –               | –       | –                      |
| Саригюхський лужний                          | ЛебГЗК     | 12,0                           | 14,22                            | 55,90 | 560                    | 4,47                           | 97,7            | 2,3     | 60,30                  |
| IV шар Черкаського род.                      |            | 11,8                           | 13,34                            | 57,86 | 580                    | 4,07                           | 97,5            | 2,5     | 56,30                  |
| II шар Черкаського род.                      |            | 11,6                           | 14,71                            | 54,92 | 520                    | 4,43                           | 96,9            | 3,1     | 47,20                  |
| 50 % IV шару + 50 % III шару                 |            | 11,5                           | 16,67                            | 48,05 | 595                    | 4,20                           | 97,4            | 2,6     | 70,40                  |
| 40 % IV шару + 40 % II шару + 20 % каолініту |            | 10,6                           | 13,73                            | 50,99 | 570                    | 5,18                           | 97,7            | 2,3     | 47,30                  |

Таблиця 3 - Вплив кількості бентонітової глини IV шару Черкаського родовища на якість окатишів з концентрату Північного ГЗК (температура обпалення 1350 °С, тривалість – 7 хв)

| Найменування добавки в шихті | Властивості сирих окатишів |              |                                  |       |                                       | Властивості обпалених окатишів |                                   |                   |         |                             |       |        |
|------------------------------|----------------------------|--------------|----------------------------------|-------|---------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------|-----------------------------|-------|--------|
|                              | Кількість сполучного, %    | Вологість, % | Міцність при стисненні, Н/окатиш |       | Кількість скидань без руйнування, раз | Температура «шоку», °С         | Міцність при стисненні, кН/окатиш | Барабанна проба % |         | Міцність при відновленні, % |       |        |
|                              |                            |              | сирих                            | сухих |                                       |                                |                                   | +5 мм             | -0,5 мм | -0,5 мм                     | +5 мм | +10 мм |
| Саригюхський бентоніт        | 0,5                        | 8,4          | 9,51                             | 34,32 | 5,0                                   | 480                            | 4,64                              | 98,1              | 1,9     | 2,8                         | 80,35 | 66,8   |
| IV шар Черкаського род.      | 0,5                        | 8,5          | 10,20                            | 34,32 | 5,2                                   | 550                            | 4,99                              | 97,9              | 2,0     | 5,75                        | 76,6  | 56,1   |
| Саригюхський бентоніт        | 1,0                        | 7,5          | 14,91                            | 61,78 | 12,9                                  | 470                            | Не досліджувалось                 |                   |         |                             |       |        |
| IV шар Черкаського род.      | 1,0                        | 7,7          | 14,81                            | 57,86 | 18,8                                  | 490                            |                                   |                   |         |                             |       |        |

Таблиця 4 - Вплив вологості шихти з різними сполучними на показники якості сирих окатишів основністю 0,5 з концентрату ЦГЗК

| Найменування добавки в шихті | Кількість сполучного, % | Вологість шихти, % | Вологість окатишів, % | Міцність при стисненні, Н/ окатиш |       | Кількість скидань без руйнування, раз | Загальна пористість, % | Температура «шоку», °С |
|------------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------------|-------|---------------------------------------|------------------------|------------------------|
|                              |                         |                    |                       | сирих                             | сухих |                                       |                        |                        |
| Саригюхський бентоніт        | 0,5                     | 8,2                | 7,7                   | 12,36                             | 28,44 | 5,6                                   | 26,31                  | 460                    |
| Те ж                         | 0,5                     | 9,1                | 8,7                   | 10,59                             | 25,01 | 6,3                                   | 30,04                  | 480                    |
| Те ж                         | 0,5                     | 9,87               | 9,65                  | 6,37                              | 23,05 | 10,6                                  | 31,50                  | 500                    |
| Суміш глини II и IV шарів    | 0,5                     | 8,1                | 8,0                   | 10,20                             | 26,48 | 5,2                                   | 28,28                  | 480                    |
| Те ж                         | 0,5                     | 9,3                | 9,3                   | 8,04                              | 22,06 | 5,8                                   | 31,80                  | 460                    |
| Те ж                         | 0,5                     | 9,74               | 9,74                  | 6,67                              | 24,22 | 10,1                                  | 32,45                  | 535                    |

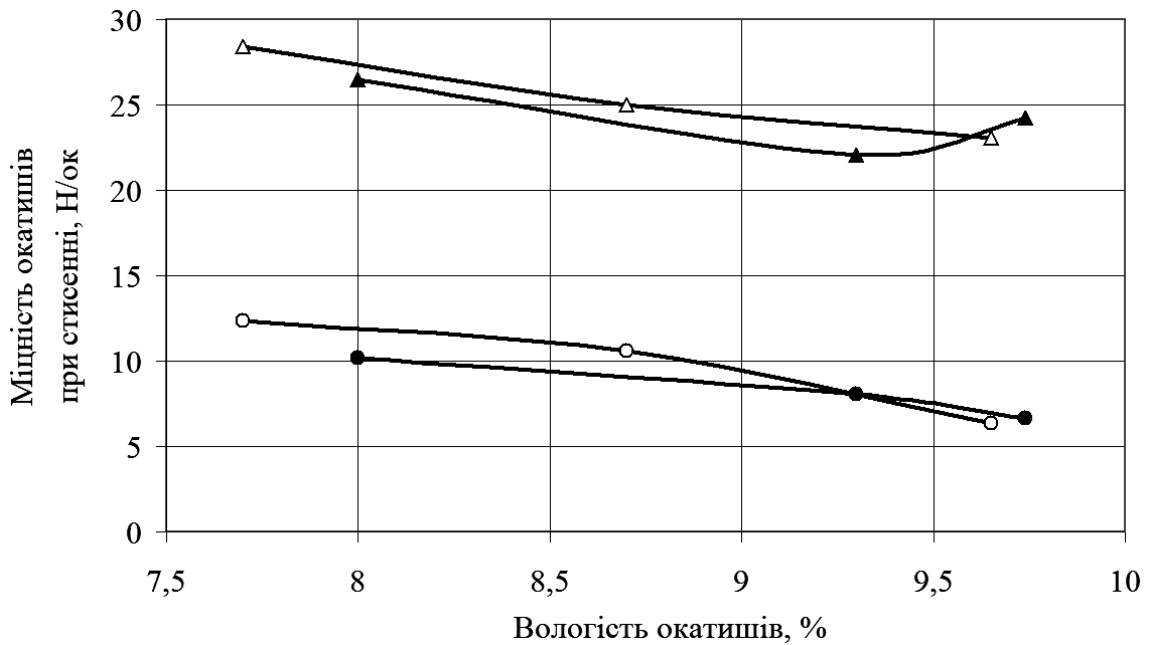


Рисунок 3 - Вплив вологості сирих окатишів на показники їх міцності: Δ і ▲ – міцність сухих окатишів, ○ та ● – міцність сирих окатишів (з добавкою саригюхського і черкаського бентоніту IV шару, відповідно)

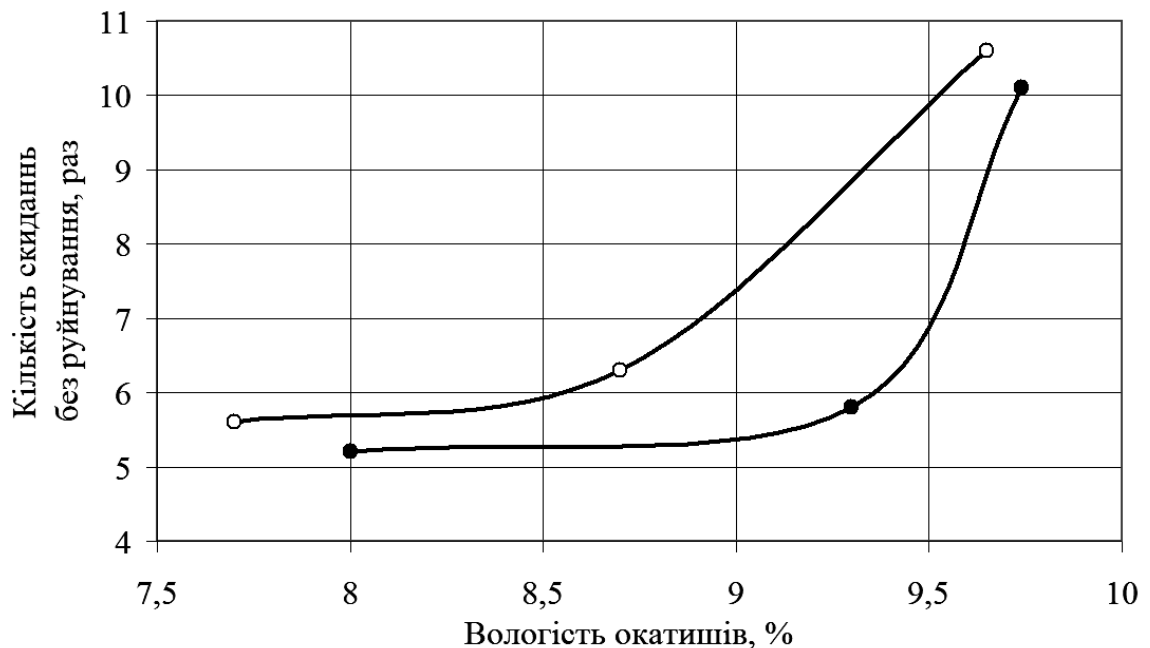


Рисунок 4 - Вплив вологості сирих окатишів на показники їх міцності при скиданні: ○ та ● – з добавкою саригюхського і черкаського бентоніту IV шару, відповідно

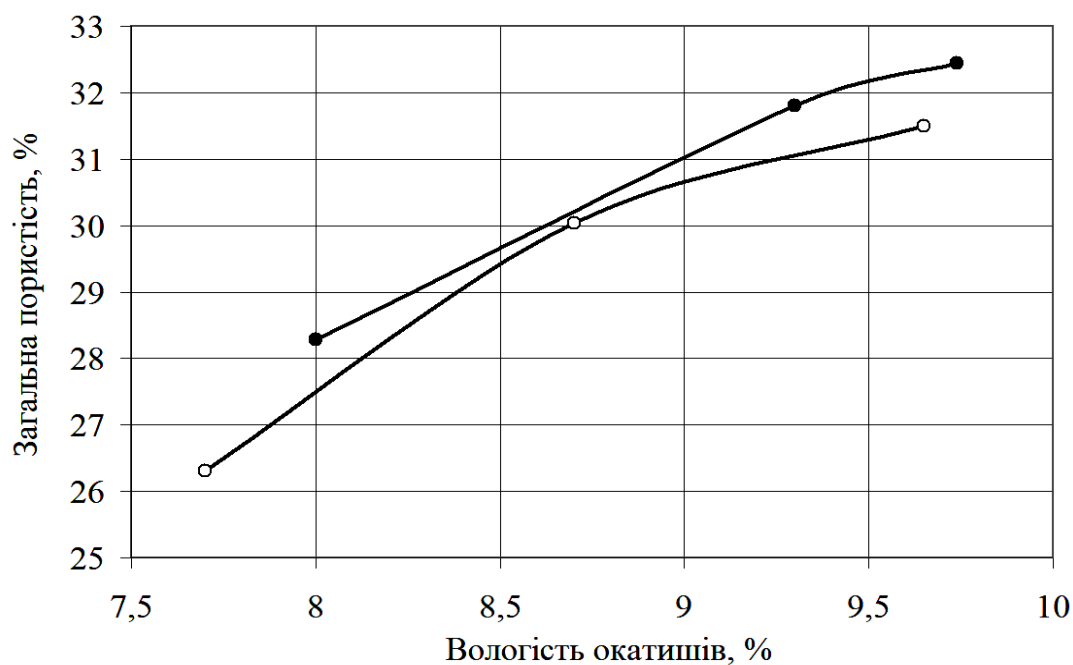


Рисунок 5 - Вплив вологості сирих окатишів на показники їх пористості: ○ та ● – з добавкою саригюхського і черкаського бентоніту IV шару, відповідно

При цьому міцність на стиснення сирих і сухих окатишів з обома бентонітами дещо знижується, а ударна міцність сирих окатишів зростає. Таким чином, за даними цих випробувань при використанні суміші IV і II шарів якість сирих окатишів з черкаським бентонітом дещо гірше, ніж з саригюхським, проте абсолютні значення показників в цілому задовольняють висунутим вимогам.

Проведені лабораторні випробування показали, що, незважаючи на порівняно нижчі показники (що визначаються за існуючими методиками в дистильованій воді) черкаських бентонітових глин, окатиші з концентратів ЦГЗК, ПівнГЗК і ЛебГЗК, отримані з добавкою глин IV, IV і II, III і II шарів, не

поступаються або поступаються незначно за властивостями у вологому і сухому стані окатишам з добавкою саригюхського лужного бентоніту.

При використанні черкаського бентоніту можливе отримання окатишів приблизно в тому ж діапазоні вологості концентрату, як і для саригюхського бентоніту. Для об'єктивного підтвердження можливості використання лужноземельного бентоніту Черкаського родовища (II-III-IV шарів) у виробництві окатишів, необхідно провести порівняльні промислові випробування на гірничо-збагачувальній фабриці (наприклад, Північний ГЗК), що використовує концентрат з підвищеною жорсткістю технічної води.

### **3. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ЗА РАХУНОК ПОКРАЩЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВКИ ДОННОЇ ТА БОРТОВОЇ ПОСТІЛІ**

Окремим, але тісно пов'язаним напрямком досліджень, стало підвищення якості окатишів для металізації шляхом управління розміром донної та бортової постілі. Визначено, що повторне високотемпературне нагрівання окатишів, які використовуються як постіль, призводить до розкристалізації заліzosилікатної зв'язки та значного утворення дріб'язку після завантаження в піч, що негативно впливає на її газодинаміку та ефективність. Існуючі технології виділення постілі мають недоліки, оскільки частина окатишів постілі з розкристалізованою структурою потрапляє у готову продукцію. Для усунення цієї проблеми була розроблена технологія, згідно з якою в якості донної та бортової постілі використовуються лише обпалені окатиші діаметром на 1-3 мм більше максимального діаметру придатної фракції готової продукції. Лабораторні дослідження показали, що питома продуктивність обпалювального агрегату за цією технологією практично не відрізняється від існуючої, однак міцність на удар і стирання при відновленні у придатної фракції обпалених окатишів значно краща (див. табл. 5). Це пояснюється тим, що такі окатиші не піддавалися повторному високотемпературному нагріву, зберігаючи свою міцну заліzosкляну зв'язку. Доведено, що ця інновація можлива без вартісних реконструкцій, лише шляхом незначної зміни величини отворів деяких грохотів.

Таблиця 5 - Порівняння показників якості окатишів, отриманих за діючою та розробленою технологіями

| Показники   | Діюча технологія      | Існуюча технологія |                   |
|---|-----------------------|--------------------|-------------------|
|   |                       | $k_{\min} = 1,08$  | $k_{\max} = 1,75$ |
| Питома продуктивність ОКМ, т/м <sup>2</sup> ·год            | 0,96                  | 0,96               | 0,91              |
| Міцність на стиск окатишів, кг/ок (ДСТУ ISO 4700:2005)      | 237                   | 233                | 235               |
| Міцність при відновленні (+6,3 мм), % (ДСТУ ISO 4700:2005)  | 63,4                  | 62,9               | 66,7              |
| Стиранність при відновленні (-5) мм, % (ДСТУ ISO 4700:2005) | 9,3                   | 9,4                | 8,7               |
| Ступінь відновлення, % (ДСТУ ISO 7215:2007)                 | 88,5                  | 88,6               | 86,7              |
| Показники   | Розроблена технологія |                    |                   |
|   | +15 мм                |                    |                   |
|   | 15-16 мм              | 15-18 мм           | 15-20 мм          |
| Питома продуктивність ОКМ, т/м <sup>2</sup> ·год            | 0,97                  | 0,97               | 0,96              |
| Міцність на стиск окатишів, кг/ок (ДСТУ ISO 4700:2005)      | 235                   | 236                | 234               |
| Міцність при відновленні (+6,3 мм), % (ДСТУ ISO 4700:2005)  | 87,3                  | 86,4               | 86,2              |
| Стиранність при відновленні (-5) мм, % (ДСТУ ISO 4700:2005) | 3,4                   | 3,7                | 3,8               |
| Ступінь відновлення, % (ДСТУ ISO 7215:2007)                 | 89,4                  | 89,1               | 88,2              |

Його виробництво можливе на існуючому обладнанні з мінімальними модифікаціями. Одночасно, проведено оптимізацію паливного балансу доменних печей. Хоча вдування пиловугільного палива є ефективним, його практичне впровадження має свої труднощі. Аналітичні розрахунки для доменної печі об'ємом 5000 м<sup>3</sup> продемонстрували, що поєднання завантаження кускового антрациту (70 кг/т) з вдуванням природного газу (до 60 м<sup>3</sup>/т) та використанням офлюсованих спеків із підвищеним вмістом заліза (70,45%) та залишкового вуглецю (2,85%) дозволяє досягти значного скорочення витрати коксу (до 322,68 кг/т) та підвищення продуктивності (до 12733 тонн на добу). Ці показники є цілком порівнянними з найкращими світовими результатами, досягнутими при використанні ПВП, але без значних капіталовкладень.

## ВИСНОВКИ

Проведена науково-дослідна робота продемонструвала ефективні шляхи підвищення ефективності аглодоменного виробництва. Ключовим висновком є успішна розробка та експериментальне підтвердження технології спікання двошарової шихти, яка оптимізує розподіл теплоти в агломераційному шарі. Впровадження цього підходу дозволяє значно збільшити питому продуктивність, одночасно знижуючи витрату палива та покращуючи міцнісні характеристики агломерату. Дослідження також підтвердили високий потенціал вітчизняних лужноземельних бентонітових глин Черкаського родовища як повноцінного замітника імпортних аналогів для виробництва окатишів. Оптимізація вологості шихти з цими глинами забезпечує високу міцність сирих окатишів, що сприяє зменшенню залежності від імпорту та покращенню імпортно-експортного балансу.

Окрім цього, знайдено ефективне рішення для підвищення якості окатишів, призначених для металізації, шляхом вдосконалення процесу підготовки донної та бортової постілі. Використання обпалених окатишів більшого діаметру для постілі запобігає розкристалізації залізосилікатної зв'язки, значно покращуючи міцність окатишів при відновленні та зменшуючи стиранність, що позитивно впливає на газодинаміку печі. Нарешті, проведено успішну оптимізацію паливного балансу доменних печей. Поєднання завантаження кускового антрациту з вдуванням природного газу та використанням офлюсованих спеків дозволяє суттєво скоротити витрату коксу та досягти показників продуктивності, порівнянних з найкращими світовими аналогами, без значних капіталовкладень. Усі розроблені технології можуть бути реалізовані на існуючому обладнанні з мінімальними модифікаціями.

Результати роботи опубліковані в працях [1-4].

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз шляхів підвищення конкурентоспроможності українських металургійних підприємств на прикладі ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Частина 1. Аглодоменне виробництво / Є. Чупринов та ін. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. Т. 339, № 4. С. 436–441. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-65>.

2. Improving the quality of pellets for metallization by controlling the size of the bottom and side bed / Y. V. Chuprynov et al. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*. 2024. Vol. 1, no. 49. P. 160–166. URL: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.1.2024.321239>.

3. Чупринов Є., Кассім Д., Реков Ю. Технологія формування донної і бортової постілі для покращення процесу термозміцнення окатишів. *SCIENTIFIC PRACTICE: MODERN AND CLASSICAL RESEARCH METHODS*. 2024. URL: <https://doi.org/10.36074/logos-19.07.2024.026>.

4. Розробка технології одержання якісних окатишів для процесів прямого відновлення заліза / Є. Чупринов та ін. *SCIENTIFIC PRACTICE: MODERN AND CLASSICAL RESEARCH METHODS*. 2025. URL: <https://doi.org/10.36074/logos-14.02.2025.036>.

5. Бойко М.М., Копитько О.Г., Омельченко М.М. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПОДІЛУ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 23-24.

6. Ягольник М.В., Уманський М.А., Барахов С.І. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВІДХОДІВ ПРИ АГЛОМЕРАЦІЇ. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 116-119.