

Міністерство освіти і науки України  
Криворізький національний університет  
Гірничо-металургійний факультет  
Кафедра металургії чорних металів  
і ливарного виробництва

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
до випускної атестаційної роботи бакалавра  
зі спеціальності 136 – Металургія

на тему: Дослідження та розробка технології повторного запалювання  
агломераційної шихти.

Виконала: студентка групи МТ-22-2	Наталія СЕКРЕТ
Керівник випускної роботи	Дмитро БАБОШКО
Нормоконтролер	Дмитро БАБОШКО
Т.в.о. завідувача кафедри	Дмитро БАБОШКО

Кривий Ріг  
2026 р.

# КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Факультет:** гірничо-металургійний

**Кафедра:** металургії чорних металів і ливарного виробництва

**Освітній рівень:** бакалавр

**Спеціальність:** 136 Металургія

Затверджую

Т.в.о. зав. кафедрою

\_\_\_\_\_ Дмитро БАБОШКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р.

## ЗАВДАННЯ

**до випускної атестаційної роботи бакалавра**

**СЕКРЕТ НАТАЛІЇ ВІКТОРІВНИ**

1. Тема роботи: Дослідження та розробка технології повторного запалювання агломераційної шихти.

керівник роботи: к.т.н., доцент Бабошко Д.Ю.

затверджено наказом по КНУ від «\_\_19\_\_»\_\_02\_\_2026 р. № 113с

2. Строк подання роботи студентом «\_\_25\_\_»\_\_05\_\_2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: агломераційна шихта на основі залізорудної сировини; технологія повторного запалювання аглошихти REMO-tes; режими спікання при різних витратах коксового дрібняку.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): основний вплив технології повторного завалювання REMO-tes на вихід агломерату та його відновлюваність; Вплив REMO-tes на вихід придатного агломерату; аналіз теплопідведення та теплового балансу при застосуванні технології повторного запалювання REMO-tes.

5. Перелік графічного матеріалу: презентація ( \_\_\_\_ стор. формату А4)

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання випускної кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів
1	Сучасний стан проблеми повторного запалювання агломераційної шихти та перспективи її вирішення	січень 2026 р.
2	Методики проведення досліджень та випробувань	лютий - березень 2026 р.
3	Експериментальні дослідження технології повторного запалювання агломераційної шихти remo-tes	квітень 2026 р.
4	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	травень 2026 р.

Дата видачі завдання « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р.

Здобувачка вищої освіти \_\_\_\_\_ Наталія СЕКРЕТ

Керівник випускної кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Дмитро БАБОШКО

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до роботи бакалавра на тему «Дослідження та розробка технології повторного запалювання агломераційної шихти»: \_\_56\_\_ с., \_\_16\_\_ рис., \_\_5\_\_ табл., 21 літературне джерело

Об'єктом дослідження є процес агломерації залізорудної шихти із застосуванням технології повторного запалювання REMO-tec.

Предметом дослідження є вплив повторного запалювання агломераційної шихти на тепловий режим процесу спікання, ступінь згорання твердого палива, вихід агломерату та його відновлюваність.

У розділі 1 наведено аналіз сучасного стану агломераційного виробництва, проблем підвищення енергоефективності процесу агломерації та скорочення викидів CO<sub>2</sub>; розглянуто особливості формування теплового режиму агломераційного шару та існуючі технології інтенсифікації процесу спікання.

У розділі 2 описано методики агломераторних і промислових випробувань, методи визначення хімічного складу, дослідження температурних профілів, теплового балансу, виходу агломерату та його металургійних властивостей.

У розділі 3 наведено результати експериментальних досліджень технології REMO-tec, встановлено закономірності зміни теплового режиму та тепловитрат у агломераційному шарі, визначено вплив повторного запалювання на вихід агломерату, ступінь згорання коксового дрібняка та відновлюваність агломерату, а також підтверджено ефективність технології в промислових умовах.

АГЛОМЕРАЦІЯ, АГЛОМЕРАЦІЙНА ШИХТА, ПОВТОРНЕ ЗАПАЛЮВАННЯ, REMO-tec, КОКСОВИЙ ДРІБНЯК, ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ, ВИХІД АГЛОМЕРАТУ, ВІДНОВЛЮВАНІСТЬ, ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ

					КНУ.РБ.136.26.113с-10.Р			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	РЕФЕРАТ	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Секрет</i>						1	1
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>							
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>							
<i>Затвердив</i>	<i>Бабошко</i>							
						MT-22-2		

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Назва	Кіл.	Примітка
				<u>Документація</u>		
A4		1	КНУ.РБ.136.26.113с-10.ПЗ	Пояснювальна записка	1	
A4		2	КНУ.РБ.136.26.113с-10.ПР	Презентація	1	

					КНУ.РБ.136.26.113с-10.ВО				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив	Секрет				ВІДОМІСТЬ ОБ'ЄМУ		Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірів	Бабашко							1	1
Н.контр.	Бабашко				Кафедра МЧМЛВ гр. МТ-22-2				
Затверд.	Бабашко								

## ЗМІСТ

### ВСТУП

1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПОВТОРНОГО ЗАПАЛЮВАННЯ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ ШИХТИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇЇ ВИРІШЕННЯ.....	9
2 МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИПРОБУВАНЬ.....	19
2.1 Методика проведення випробувань в аглочаші.....	19
2.2 Методи оцінки виходу агломерату та його металургійних властивостей....	22
2.3 Методи дослідження мінеральної структури та пористості агломерату.....	23
2.4 Методика аналізу кристалічної структури агломерату.....	24
2.5 Методика визначення хімічного складу досліджуваних матеріалів.....	24
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПОВТОРНОГО ЗАПАЛЮВАННЯ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ ШИХТИ REMO-tec.....	26
3.1 Основний вплив технології повторного завалювання REMO-tec на вихід агломерату та його відновлюваність.....	26
3.2 Оцінка впливу технології повторного запалювання REMO-tec на тепловий баланс процесу агломерації.....	30
3.2.1 Аналіз температурного профілю агломераційного шару.....	30
3.2.2 Вплив REMO-tec на вихід придатного агломерату.....	32
3.2.3 Аналіз ступеня згоряння коксового дрібняку.....	33
3.3 Аналіз теплопідведення та теплового балансу при застосуванні технології повторного запалювання REMO-tec.....	37
3.4 Аналіз тепловитрат та розподілу теплової енергії в агломераційному шарі при застосуванні технології повторного запалювання REMO-tec.....	41
3.5 Промислове впровадження та виробничі результати застосування технології повторного запалювання REMO-tec.....	46
3.5.1 Особливості організації повторного запалювання в умовах промислової агломераційної машини.....	46
3.5.2 Вплив REMO-tec на технологічні показники агломераційного процесу...	47
3.5.3 Додаткові підтвердження механізму підвищення виходу агломерату.....	49
ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56

					КНУ.РБ.136.26.113с-10.3					
					ЗМІСТ			Літера	Аркулш	Аркулшів
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>					1	1
<i>Розробив</i>	<i>Секрет</i>				МТ-22-2					
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>									
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>									
<i>Затвердив</i>	<i>Бабошко</i>									

## ВСТУП

Сучасний розвиток чорної металургії характеризується посиленням вимог до енергоефективності виробництва, раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів та скорочення викидів парникових газів. Особливо актуальними ці питання є для агломераційного виробництва, яке належить до найбільш енергоємних і вуглецеємних переділів металургійного циклу. Значна частка викидів CO<sub>2</sub> при виробництві чавуну пов'язана саме зі споживанням твердого палива під час агломерації та подальшої доменної плавки. У сучасних умовах декарбонізації металургійної галузі та переходу до більш екологічно орієнтованих технологій питання скорочення витрат палива при збереженні високої продуктивності агломераційного процесу набуває особливого значення.

Одним із перспективних напрямів декарбонізації агломераційного процесу є зниження витрат коксового дрібняку в агломераційній шихті. Разом із тим зменшення кількості твердого палива супроводжується погіршенням теплового режиму спікання, що призводить до зниження виходу придатного агломерату, особливо у верхній частині агломераційного шару. У поверхневих горизонтах аглошихти спостерігаються значні теплові втрати, недостатній рівень температур та наявність незгорілого твердого вуглецю, що негативно впливає на формування структури агломерату, його механічну міцність та металургійні властивості. Крім того, нерівномірність теплового режиму по висоті агломераційного шару знижує ефективність використання теплової енергії палива та ускладнює забезпечення стабільних показників процесу спікання.

У зв'язку з цим важливого значення набуває розробка технологічних рішень, спрямованих на більш ефективне використання теплової енергії палива та оптимізацію теплового режиму агломераційного процесу. Одним із таких рішень є

					КНУ.РБ.136.26.113с-10.ВС			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ВСТУП	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Секрет</i>						1	2
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>							
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>							
<i>Затвердив</i>	<i>Бабошко</i>							
						МТ-22-2		

технологія повторного запалювання агломераційної шихти REMO-tec (Re-ignition Method for Optimization of Total Energy Consumption), яка передбачає повторне запалювання поверхні агломераційного шару після певного інтервалу часу від завершення первинного запалювання. Застосування даної технології дозволяє забезпечити догорання незгорілого твердого вуглецю у верхній частині шару, збільшити тривалість перебування матеріалу у високотемпературному стані та покращити умови формування рідкої фази. За рахунок цього створюються передумови для підвищення виходу придатного агломерату, покращення його відновлюваності та зниження загальних витрат твердого палива в агломераційному виробництві.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення енергоефективності агломераційного виробництва, скорочення витрат твердого палива та зниження викидів CO<sub>2</sub> без погіршення якості агломерату та продуктивності агломераційних машин.

# 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПОВТОРНОГО ЗАПАЛЮВАННЯ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ ШИХТИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇЇ ВИРІШЕННЯ

У сучасних умовах розвитку металургійного виробництва одним із ключових напрямів удосконалення агломераційного процесу є зниження питомих витрат твердого палива та скорочення викидів парникових газів, насамперед CO<sub>2</sub>. Потреба у декарбонізації чорної металургії обумовлена глобальними вимогами щодо досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року, що вимагає суттєвого зменшення викидів парникових газів на всіх стадіях виробництва чавуну та сталі.

У традиційній схемі доменного виробництва значна частка викидів CO<sub>2</sub> припадає саме на агломераційний процес та доменну плавку. У зв'язку з цим одним із найбільш ефективних шляхів зменшення вуглецевого сліду металургійного виробництва є скорочення витрат паливних компонентів під час агломерації, зокрема коксового дрібняку, а також зменшення витрат відновників у доменній печі. Зниження витрат твердого палива при агломерації дозволяє не лише безпосередньо скоротити емісію CO<sub>2</sub> у процесі спікання, але й опосередковано впливає на доменний процес через підвищення відновлюваності агломерату, що забезпечує зменшення витрат коксу у доменній плавці.

Упродовж останніх десятиліть значна увага дослідників приділялася пошуку альтернативних паливних компонентів для агломераційного процесу. Одним із перспективних напрямів стало використання вуглецево-нейтральної біомаси як заміника традиційного коксового дрібняку. Починаючи з 2000-х років було опубліковано значну кількість досліджень [1–3], присвячених застосуванню біомаси в агломераційному виробництві. Основною проблемою використання таких матеріалів стала недостатня екзотермічна теплота згоряння, що призводило до погіршення умов формування агломерату та зниження виходу придатного продукту.

					КНУ.РБ.136.26.113с-10.01.СС				
					Сучасний стан проблеми повторного запалювання агломераційної шихти та перспективи її вирішення				
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>	
<i>Розробив</i>	<i>Секрет</i>						1	10	
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>								
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>								
<i>Затвердив</i>	<i>Бабошко</i>							МТ-22-2	

Особливий інтерес серед альтернативних видів твердого палива викликало використання деревного вугілля, отриманого з оболонок пальмових ядер (PKS-char coal). Даний матеріал розглядається як перспективний заміник традиційного коксового дрібняку завдяки його відновлюваному походженню та потенційній можливості зменшення сумарних викидів CO<sub>2</sub> в агломераційному виробництві. Оболонки пальмових ядер є побічним продуктом переробки олійної пальми, а після термічної обробки утворюють вуглецевмісний матеріал із достатньо високим вмістом твердого вуглецю, придатний для використання як паливний компонент агломераційної шихти.

Разом із тим використання PKS-char coal супроводжується низкою технологічних труднощів, пов'язаних насамперед із відмінністю його фізико-хімічних характеристик від традиційного коксового дрібняку. Такі матеріали характеризуються нижчою щільністю, підвищеною реакційною здатністю та іншими параметрами горіння, що безпосередньо впливає на формування теплового режиму агломераційного процесу. У зв'язку з цим значна кількість досліджень була присвячена вивченню закономірностей згоряння PKS-char coal та визначенню ступеня використання його теплового потенціалу в агломераційному шарі [4–5].

У фундаментальних дослідженнях було встановлено, що характер горіння PKS-char coal істотно відрізняється від горіння коксового дрібняку. Зокрема, підвищена реакційна здатність такого палива забезпечує більш швидке займання та інтенсивніше протікання процесу окиснення, однак одночасно може призводити до нерівномірного розподілу тепла по висоті агломераційного шару. Крім того, через меншу теплоту згоряння та нижчу об'ємну густину спостерігається дефіцит тепла, необхідного для формування достатньої кількості рідкої фази, що негативно впливає на процес спікання та знижує вихід придатного агломерату [4–5].

У подальших прикладних дослідженнях значна увага приділялася забезпеченню стабільного виходу агломерату при частковій заміні коксового дрібняку на PKS-char coal [6]. Було встановлено, що при збільшенні частки біопалива в агломераційній шихті спостерігається погіршення умов теплообміну та

зниження температурного рівня у зоні спікання, що призводить до недостатнього формування зв'язуючих фаз. У результаті зменшується механічна міцність агломерату та підвищується кількість дріб'язку у готовому продукті. Тому одним із ключових завдань стало забезпечення компенсації дефіциту тепла без збільшення загальних витрат викопного палива.

Для вирішення цієї проблеми були запропоновані спеціальні технологічні підходи, спрямовані на оптимізацію умов горіння PKS-char coal в агломераційному шарі. Зокрема, дослідники запропонували укрупнення частинок біопалива та його локалізоване розміщення у нижній частині агломераційного шару [7]. Такий підхід дозволяв змінити характер розподілу тепла по висоті шару та забезпечити більш ефективне використання теплової енергії палива.

Розміщення укрупнених частинок PKS-char coal у нижній частині шару сприяло більш тривалому процесу горіння та покращенню теплового стану нижніх горизонтів аглошихти. Це дозволяло частково компенсувати зниження тепловиділення, характерне для біопаливних компонентів, а також стабілізувати процес формування рідкої фази в зоні спікання. Крім того, укрупнення частинок зменшувало швидкість їх повного вигорання та сприяло більш рівномірному просуванню фронту горіння через агломераційний шар [7].

Отримані результати підтвердили перспективність використання PKS-char coal як часткового замітника традиційного твердого палива в агломераційному виробництві. Разом із тим було встановлено, що для забезпечення стабільних технологічних показників процесу необхідне подальше вдосконалення способів керування тепловим режимом агломерації, особливо у верхній частині агломераційного шару, де теплові втрати та неповне згоряння палива проявляються найбільш інтенсивно.

Разом із тим встановлено, що зменшення витрат коксового дріб'язку в агломераційній шихті супроводжується суттєвим погіршенням показників виходу агломерату. Основною причиною цього є дефіцит тепла у верхній частині агломераційного шару. Традиційно відомо, що верхній шар агломераційної шихти

характеризується значно нижчим виходом придатного агломерату порівняно із середніми та нижніми шарами. Як показано на рисунку 1.1, у верхній частині шару вихід агломерату є особливо низьким. Це пояснюється значними тепловими втратами у навколишній простір над поверхнею агломераційного шару, а також наявністю великої кількості незгорілого вуглецю у верхній зоні шару [8].

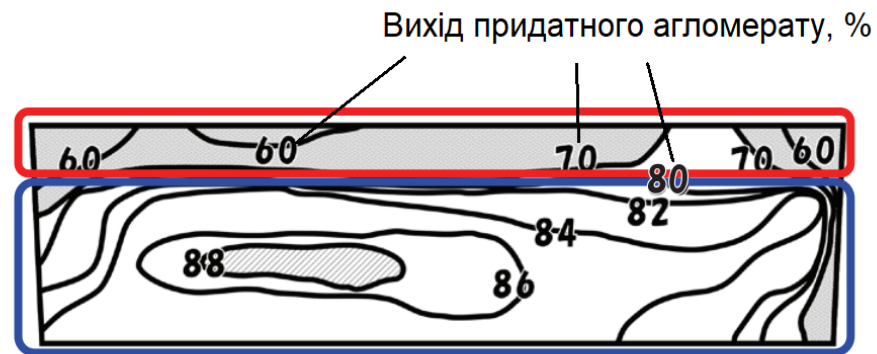


Рисунок 1.1 – Приклад розподілу виходу придатного агломерату в поперечному перерізі аглоспеку

Низька ефективність спікання у верхній частині агломераційного шару є однією з найважливіших технологічних проблем сучасного агломераційного виробництва. У цій зоні спостерігається недостатня тривалість перебування матеріалу при високих температурах, що призводить до неповного формування рідкофазних зв'язків між компонентами шихти та, відповідно, до зниження механічної міцності агломерату. Крім того, у верхньому шарі часто фіксується підвищений вміст незгорілого коксового дрібняку, що свідчить про низьку ефективність використання теплового потенціалу палива.

Для підвищення виходу придатного агломерату у верхній частині агломераційного шару в різні роки було запропоновано та досліджено широкий спектр технологічних рішень, спрямованих на покращення теплового стану поверхневих горизонтів шихти та підвищення ефективності використання тепла палива. Необхідність розробки таких заходів обумовлена тим, що саме верхній шар аглошихти перебуває у найбільш несприятливих умовах спікання через інтенсивні

теплові втрати у навколишнє середовище, нерівномірність розподілу палива та недостатню тривалість перебування матеріалу при температурах, необхідних для формування достатньої кількості рідкої фази. Унаслідок цього у верхній зоні шару часто спостерігається неповне спікання матеріалу, підвищений вміст дріб'язку та значна кількість незгорілого твердого вуглецю.

Одним із найбільш поширених напрямів удосконалення процесу став контроль сегрегації коксового дрібняку в агломераційній шихті [9–11]. Даний підхід базується на керуванні розподілом паливних частинок по висоті шару з метою забезпечення більшої концентрації палива у верхніх горизонтах аглошихти. Відомо, що під час завантаження шихти на агломераційну машину відбувається природна сегрегація компонентів за крупністю та густиною, внаслідок чого дрібніші частинки палива можуть нерівномірно розподілятися по висоті шару. Тому застосування спеціальних завантажувальних пристроїв і режимів подачі шихти дозволяє частково регулювати локальний вміст коксового дрібняку та покращувати тепловий режим у верхній частині шару.

Іншим важливим напрямом стало ущільнення агломераційної шихти [9–11]. Збільшення щільності шару сприяє покращенню контакту між частинками шихтових матеріалів, стабілізації руху фронту горіння та більш ефективному використанню тепла, що виділяється при згорянні палива. Крім того, ущільнення дозволяє зменшити локальні порушення газопроникності шару та забезпечити більш рівномірний розподіл температур по його висоті. Разом із тим надмірне ущільнення може негативно впливати на газопроникність аглошихти, тому вибір оптимального ступеня ущільнення є важливим технологічним завданням.

Значну увагу також приділяли регулюванню розподілу газового потоку в агломераційному шарі [9–11]. Ефективність агломераційного процесу значною мірою залежить від умов проходження повітря через шар шихти, оскільки саме газовий потік забезпечує подачу кисню до зони горіння та перенесення тепла в процесі спікання. Нерівномірний розподіл газового потоку призводить до локального перегріву або недостатнього прогрівання окремих зон шару, що

особливо негативно проявляється у верхній частині аглошихти. У зв'язку з цим досліджувалися різні способи керування розрідженням під колосниковими ґратами, зміни конфігурації повітряних потоків та стабілізації газодинамічних умов процесу.

Одним із перших напрямів удосконалення процесу стало нанесення коксового дрібняку на поверхню агломераційного шару безпосередньо перед запалюванням [12]. Метою цього підходу було локальне збільшення теплопідведення саме у верхній зоні шару. Необхідність такого рішення обумовлена тим, що навіть при використанні пристроїв сегрегації забезпечити підвищений вміст палива лише у верхньому шарі шляхом звичайного завантаження аглошихти практично неможливо. Застосування поверхневого нанесення коксового дрібняку дало можливість підвищити вихід агломерату за рахунок покращення теплового режиму верхньої частини шару.

Іншим перспективним напрямом стало введення газоподібного палива в агломераційний шар після завершення первинного запалювання [13, 14]. Особливістю цього методу є те, що температура горіння газоподібного палива є нижчою порівняно з температурою горіння коксового дрібняку. Це сприяє розширенню високотемпературної зони у напрямку поверхні шару відносно положення фронту горіння коксу. Ефективність такого підходу значно зростає при використанні збагаченого киснем газу. Було встановлено, що розширена високотемпературна зона формується приблизно на глибині близько 100 мм від поверхні агломераційного шару. Крім того, дана технологія дозволяє зменшити витрати коксового дрібняку, що позитивно впливає на відновлюваність агломерату.

Таким чином, проведені дослідження підтвердили, що підвищення ефективності спікання у верхній частині агломераційного шару є одним із ключових резервів покращення техніко-економічних показників агломераційного процесу. Разом із тим більшість традиційних технологічних рішень лише частково компенсують дефіцит тепла у верхній зоні шару, що обумовлює необхідність подальшого пошуку більш ефективних методів керування тепловим режимом агломерації. Також технології, здатні одночасно забезпечити суттєве скорочення

викидів CO<sub>2</sub> та стабільне збереження високого виходу агломерату, залишалися недостатньо розвиненими. У зв'язку з цим Мацумура та співавтори [8] запропонували принципово новий підхід до вдосконалення агломераційного процесу — технологію REMO-tec (Re-ignition Method for Optimization of Total Energy Consumption), тобто метод повторного запалювання для оптимізації загального енергоспоживання.

Технологія REMO-tec базується на двоступеневому запалюванні агломераційної шихти. Після первинного запалювання витримується певний часовий інтервал, після чого здійснюється повторне запалювання верхньої частини агломераційного шару. Схематично принцип роботи REMO-tec наведено на рисунку 1.2.

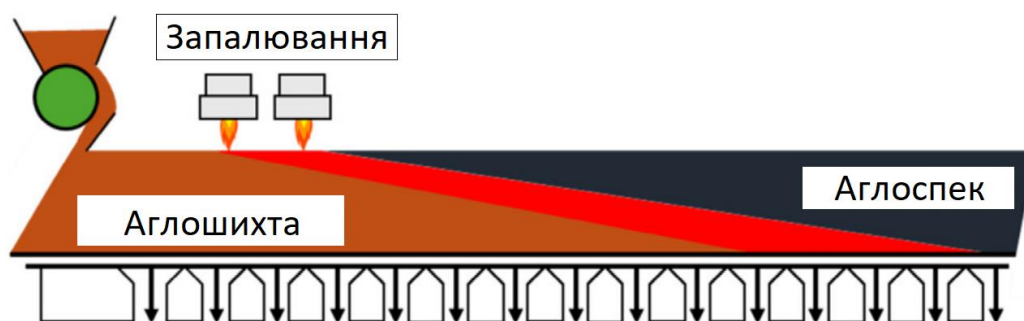


Рисунок 1.2 – Схема методу повторного запалення аглошихти  
REMO-tec

Основною ідеєю технології є використання теплового потенціалу незгорілого вуглецю, який залишається у верхній частині агломераційного шару після первинного запалювання. При повторному запалюванні відбувається догорання залишкового коксового дрібняку, що забезпечує додаткове тепловиділення саме у верхньому шарі шихти. Це сприяє збільшенню тривалості перебування матеріалу при температурах понад 1200 °С, особливо у поверхневій зоні агломераційного шару [8].

У роботі Matsumura M., Kosugi R., Yamamoto Y., Nagata J. та Higuchi K. було детально досліджено вплив повторного запалювання на ступінь згорання вуглецю у коксовому дрібняку та вихід агломерату. Автори ввели поняття «ступінь згорання вуглецю», який визначався як відношення фактичного тепловиділення при горінні до теоретично можливого тепловиділення при повному окисненні вуглецю за реакцією:



Розрахунок ступеня згорання здійснювався на основі аналізу складу відхідних газів агломераційного процесу.

За результатами досліджень було встановлено, що повторне запалювання забезпечує ефективне догорання незгорілого коксового дрібняку у верхньому шарі агломераційної шихти. Це, у свою чергу, подовжує час перебування матеріалу у високотемпературному стані та сприяє покращенню умов формування рідкої фази [8].

Особливо важливим є те, що додаткове теплопідведення при застосуванні REMO-тес виявилось еквівалентним ефекту збільшення вмісту коксового дрібняку у шихті, хоча фактична кількість додаткового тепла, внесеного повторним запалюванням, була приблизно у чотири рази меншою, ніж при прямому підвищенні витрат палива (для агломераційної чаші висотою шару 430 мм). Це свідчить про значно вищу ефективність локального теплопідведення у верхню частину шару порівняно з традиційним збільшенням загального вмісту коксового дрібняку.

Крім того, було встановлено, що теплота повторного запалювання переважно концентрується у поверхневому шарі аглошихти. Внаслідок цього теплові витрати у верхній частині шару зростають, тоді як у нижній частині — зменшуються порівняно з варіантом підвищення загального вмісту коксового дрібняку. Це призводить до більш рівномірного розподілу тепла по висоті агломераційного шару та зменшення різниці між тепловими умовами верхньої і нижньої зон.

Важливою перевагою технології REMO-tes є можливість одночасного підвищення відновлюваності агломерату та збереження високого виходу придатного продукту навіть при зниженні витрат коксового дрібняку. Таким чином, дана технологія створює передумови для комплексного скорочення викидів CO<sub>2</sub> як на стадії агломерації, так і під час доменної плавки.

Промислові випробування також підтвердили ефективність REMO-tes в умовах діючих агломераційних фабрик. Було встановлено, що технологія забезпечує стабілізацію теплового режиму верхньої частини шару та покращення показників виходу агломерату без необхідності суттєвого збільшення витрат палива.

Разом із тим, попри значний практичний інтерес до технології повторного запалювання, вплив REMO-tes на мікроструктуру агломерату та особливості формування мінеральних фаз досліджений недостатньо повно. Відомо, що основні експлуатаційні властивості агломерату — міцність, відновлюваність та стійкість до руйнування під час відновлення — безпосередньо залежать від його мінералогічного складу та порової структури [15, 16].

Агломерат складається переважно з гематиту, магнетиту, феритів кальцію, силікатного шлаку та пор [16]. Особливу роль у формуванні структури агломерату відіграють ферити кальцію, які виконують функцію зв'язуючої фази. За морфологічними ознаками ферити кальцію поділяються на голкоподібні структури з дрібними порами навколо них та стовпчасті структури, оточені значною кількістю силікатного шлаку. Відновлюваність цих структур суттєво відрізняється [16].

З кристалографічної точки зору встановлено, що ферити кальцію в агломераті формують безперервну систему твердих розчинів, відому як силікоферит кальцію та алюмінію (SFCA) [17]. Дана фаза здатна розчиняти компоненти пустої породи та суттєво впливає на формування структури агломерату. Крім того, відомо існування декількох гомологічних різновидів феритів кальцію, які відрізняються хімічним складом та кристалічною структурою, зокрема SFCA [18], SFCA-I [19], SFCA-II [20] та SFCA-III [21].

Враховуючи складність кристалічної будови SFCA та його визначальну роль у формуванні структури агломерату, надзвичайно важливим є проведення детальних досліджень із застосуванням сучасних методів мікроскопії та аналізу кристалічної структури. Не менш важливим є аналіз порової структури агломерату, оскільки характер розподілу пор значною мірою визначає взаємне розташування мінеральних фаз, газопроникність та відновлюваність матеріалу.

Таким чином, сучасний стан розвитку агломераційного виробництва свідчить про актуальність пошуку нових технологічних рішень, спрямованих на зниження витрат твердого палива без погіршення якості агломерату та виходу придатного продукту. Одним із найбільш перспективних напрямів є технологія повторного запалювання агломераційної шихти REMO-tec, яка дозволяє ефективно використовувати тепловий потенціал незгорілого вуглецю верхнього шару, покращувати тепловий баланс процесу та підвищувати відновлюваність агломерату.

Подальше дослідження впливу повторного запалювання на процеси формування мінеральних фаз, структуру пор та експлуатаційні характеристики агломерату є важливим науково-технічним завданням, вирішення якого сприятиме розвитку енергоефективних та екологічно безпечних технологій агломераційного виробництва.

## 2 МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИПРОБУВАНЬ

### 2.1 Методика проведення випробувань в аглочаші

Експериментальні дослідження проводилися методом спікання аглошихти із використанням лабораторної аглочаші внутрішнім діаметром 300 мм. Дослідження були спеціально орієнтовані на вивчення процесів, що протікають у верхній частині агломераційного шару, оскільки саме в цій зоні ефект повторного запалювання проявляється найбільш інтенсивно. Схему використаної аглочаші наведено на рисунку 2.1.

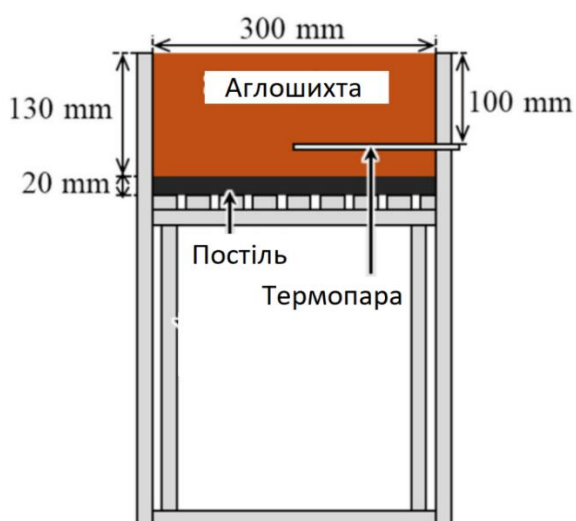


Рисунок 2.1 – Схема аглочаші

Колосникову решітку аглочаші було встановлено на регульованому пристосуванні, що дозволяло змінювати ефективну висоту шару агломераційної шихти залежно від умов експерименту. Такий підхід забезпечував можливість моделювання теплових та газодинамічних умов агломераційного процесу з високою відтворюваністю результатів.

					КНУ.РБ.136.26.113с-10.02.МД		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Методики проведення досліджень та випробувань		
<i>Розробив</i>	<i>Секрет</i>						
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>					1	7
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>				МТ-22-2		
<i>Затвердив</i>	<i>Бабошко</i>						

Метою експериментів було дослідження впливу повторного запалювання та вмісту твердого палива на структурні характеристики агломерату, його вихід та металургійні властивості. У зв'язку з цим змінювалися як умови запалювання, так і вміст коксового дрібняку в агломераційній шихті. Експериментальні умови та співвідношення компонентів шихти наведені відповідно у таблицях 2.1 і 2.2.

Таблиця 2.1 – Експериментальні умови

Спосіб запалювання	Вміст коксового дрібняку, %	Схема проведення запалювання
Класичний 4,1	4,1	Запалювання (1 хв) → Всмоктування повітря
РЕМО-tec4,1	4,1	Запалювання (1 хв) → Всмоктування повітря (1 хв) → Повторне запалювання (1 хв)
Класичний 3,3	3,3	Запалювання (1 хв) → Всмоктування повітря
РЕМО-tec3,3	3,3	Запалювання (1 хв) → Всмоктування повітря (1 хв) → Повторне запалювання (1 хв)
Класичний 2,9	2,9	Запалювання (1 хв) → Всмоктування повітря
РЕМО-tec2,9	2,9	Запалювання (1 хв) → Всмоктування повітря (1 хв) → Повторне запалювання (1 хв)

Таблиця 2.2 – Склад експериментальної аглошихти

Спосіб запалювання	Компоненти шихти, %			
	Залізорудні складові	Вапняк (–3 мм)	Коксовий дрібняк (–5 мм)	Всього
Класичний 4,1 РЕМО-tec4,1	93,4	2,5	4,1	100
Класичний 3,3 РЕМО-tec3,3	94,2	2,5	3,3	100
Класичний 2,9 РЕМО-tec2,9	94,6	2,5	2,9	100

В якості базового режиму використовувалася традиційна схема одноразового запалювання аглошихти. Для порівняння застосовувався режим РЕМО-tec, що передбачав повторне запалювання після короткого інтервалу всмоктування повітря. Вміст коксового дрібняку встановлювали на трьох рівнях: 4,1 %, 3,3 % та 2,9 %.

Первинне та повторне запалювання здійснювали з використанням скрапленого газу. Тривалість кожного етапу запалювання становила 1 хвилину. Витрата скрапленого газу підтримувалася на рівні 4,25 нм<sup>3</sup>/год, а витрата повітря — 120 нм<sup>3</sup>/год. Це забезпечувало стабільні умови займання та відтворюваність теплового режиму в усіх серіях експериментів.

Для підготовки агломераційної шихти використовували суміш залізорудних компонентів, до якої додавали вапняк крупністю менше 3 мм та коксовий дрібняк крупністю менше 5 мм. Загальна маса шихтових матеріалів становила приблизно 20 кг. Попереднє змішування компонентів проводили протягом 2 хвилин, після чого здійснювали грануляцію у барабанному змішувачі впродовж 5 хвилин. Вологість шихти після грануляції підтримувалася на рівні 7,0 %, що забезпечувало належні умови грудкування та газопроникності шару.

Перед завантаженням основної шихти в аглошашу укладався постільний шар із агломерату крупністю 10–15 мм товщиною 20 мм. Наявність постелі дозволяла

стабілізувати газодинамічні умови процесу та запобігати закупорюванню колосникової решітки дрібними частинками шихти. Після цього гранульовану аглошихту завантажували самопливом до формування шару товщиною 130 мм.

Для виключення впливу змін газопроникуваності на результати досліджень швидкість потоку відхідних газів підтримували постійною на рівні 1,3 м<sup>3</sup>/хв протягом усього процесу спікання, включаючи періоди первинного та повторного запалювання. Повітродувку вимикали через 3 хвилини після досягнення максимальної температури в шарі. Контроль температурного режиму здійснювали за допомогою термопари, встановленої на висоті 100 мм від поверхні агломераційного шару.

## **2.2 Методи оцінки виходу агломерату та його металургійних властивостей**

Основними показниками якості агломерату, що оцінювалися в роботі, були вихід придатного продукту, відновлюваність та стійкість до руйнування при відновленні.

Вихід агломерату визначали як масову частку фракції крупністю понад 5 мм після чотириразового скидання аглоспеку з висоти 2 м. Така методика дозволяє моделювати механічні навантаження, що виникають під час транспортування та перевантаження агломерату в промислових умовах.

Випробування на відновлюваність проводили за методикою, аналогічною міжнародним стандартам ISO 4695 та ISO 4696, що регламентують визначення відновлюваності та низькотемпературної деструкції залізородних матеріалів. Для дослідження використовували 500 г агломерату крупністю 20±1 мм. Відновлення здійснювали при температурі 900 °С протягом 180 хвилин із визначенням ступеня видалення кисню з матеріалу.

Випробування на низькотемпературне відновлення з подрібненням проводили з використанням 500 г агломерату крупністю 15–19 мм. Зразки

					КНУ.РБ.136.26.113с-10.02.МД	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		4

витримували при температурі 550 °С упродовж 30 хвилин, після чого піддавали механічному навантаженню у спеціальному барабані при температурі навколишнього середовища протягом 900 обертів. Показником оцінки був індекс RDI, який визначався як частка матеріалу крупністю менше 2,8 мм після випробування.

### **2.3 Методи дослідження мінеральної структури та пористості агломерату**

Для дослідження мікроструктури агломерату використовували шматки аглоспеку крупністю 15–19 мм, які після дроблення вмонтовували у смолу. Після цього зразки розрізали та полірували для проведення мікроскопічного аналізу. Дослідження текстури агломерату виконували за допомогою оптичного мікроскопа.

Оцінку макроструктури та пористості проводили методами цифрового аналізу зображень. Аналізували від одного до трьох зразків для кожного режиму випробувань. Методика аналізу зображень включала створення п'ятирівневого зображення, у якому мінеральні фази та порожнини класифікувалися за рівнем яскравості. Виділялися гематит, магнетит, силікоферит кальцію та алюмінію (SFCA), силікатний шлак і порожнини. Після багаторівневої класифікації виконували бінаризацію зображень для виділення порового простору та визначення характеристик пористості. Для кожної пори розраховували площу та еквівалентний діаметр, що дозволяло оцінити розподіл пор за розмірами.

Загальну пористість визначали як відношення площі пор до сумарної площі пор та мінеральної матриці. Для спрощення аналізу співвідношення площ приймалося еквівалентним співвідношенню об'ємів.

## 2.4 Методика аналізу кристалічної структури агломерату

Кількісний аналіз мінеральних фаз агломерату проводили методом рентгеноструктурного аналізу. Для дослідження використовували готовий агломерат крупністю 15–19 мм, який попередньо подрібнювали до порошкоподібного стану.

Основними фазами, які визначалися у складі агломерату, були гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), багатокомпонентні ферити кальцію типу SFCA, а також дикальційсилікат ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ), який є основною складовою силікатного шлаку.

## 2.5 Методика визначення хімічного складу досліджуваних матеріалів

Для визначення хімічного складу досліджуваних матеріалів використовували метод рентгенофлуоресцентного аналізу, який дозволяє оперативно та з достатньо високою точністю визначати вміст основних хімічних елементів у сировинних компонентах та готовому агломераті.

Дослідження проводили із застосуванням рентгенофлуоресцентного аналізатора EXPERT 4L, зовнішній вигляд якого наведено на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Рентгенофлуоресцентний аналізатор EXPERT 4L

Аналіз виконували в лабораторних умовах шляхом розміщення попередньо підготовлених зразків у вимірювальній камері приладу. Перед проведенням вимірювань матеріал піддавали подрібненню та усередненню з метою забезпечення однорідності проби та підвищення точності результатів аналізу. Підготовлені зразки розміщували у спеціальних кюветах, після чого проводили вимірювання відповідно до встановлених параметрів роботи приладу.

За результатами рентгенофлуоресцентного аналізу визначали вміст основних компонентів досліджуваних матеріалів, зокрема сполук заліза, кремнезему, оксиду кальцію, оксиду алюмінію та інших елементів, які впливають на процес агломерації та формування мінеральної структури агломерату.

					КНУ.РБ.136.26.113с-10.02.МД	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		7

## 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПОВТОРНОГО ЗАПАЛЮВАННЯ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ ШИХТИ REMO-tec

### 3.1 Основний вплив технології повторного завалювання REMO-tec на вихід агломерату та його відновлюваність

Основною метою застосування технології REMO-tec у процесі агломерації є підвищення ефективності використання теплової енергії палива у верхній частині агломераційного шару. Повторне запалювання поверхні аглошихти забезпечує додаткове теплопідведення до верхніх горизонтів шару, що сприяє підвищенню максимальної температури спікання та збільшенню тривалості перебування матеріалу у високотемпературному стані. Саме ці фактори є визначальними для покращення умов формування рідкої фази та зміцнення структури агломерату у верхній зоні шару.

Як показано на рисунку 3.1, базовий ефект застосування REMO-tec полягає у підвищенні виходу придатного агломерату при одночасному збереженні високої відновлюваності матеріалу за однакового вмісту коксового дрібняку в агломераційній шихті. На рисунку 3.1 результати для режиму REMO-tec позначені символом  $\blacklozenge$ . Отримані результати принципово відрізняються від випадку традиційного підвищення витрат коксового дрібняку, позначеного символом  $\circ$ , при якому збільшення виходу агломерату супроводжується погіршенням його відновлюваності.

					КНУ.РБ.136.26.113с-10.03.ЕД			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	Б 13	Експериментальні дослідження технології повторного запалювання агломераційної шихти REMO-tec	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Секрет</i>						1	27
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>					MT-22-2		
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>							
<i>Затвердив</i>	<i>Бабошко</i>							

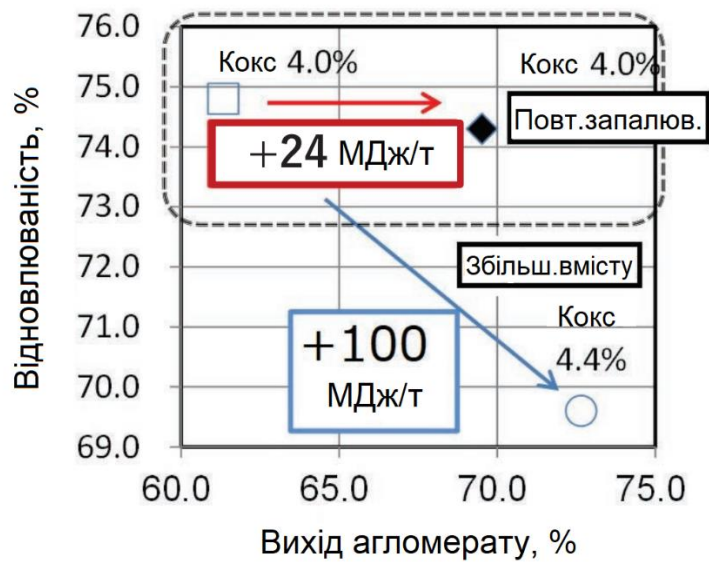


Рисунок 3.1 – Порівняння впливу технології REMO-tes та збільшення вмісту коксу на вихід агломерату та його відновлюваність

Підвищення виходу агломерату при використанні REMO-tes пояснюється покращенням теплового режиму верхньої частини агломераційного шару. Встановлено, що у верхньому шарі аглошихти, на висоті близько 400 мм, суттєво збільшується тривалість перебування матеріалу при температурах понад 1200 °С, що підтверджується даними, наведеними на рисунку 3.2. Збільшення часу витримки у високотемпературному інтервалі сприяє більш повному формуванню рідкофазних зв'язків між частинками шихтових матеріалів, покращенню спікання та, відповідно, підвищенню механічної міцності агломерату. У результаті зменшується кількість дріб'язку та зростає вихід придатного продукту.

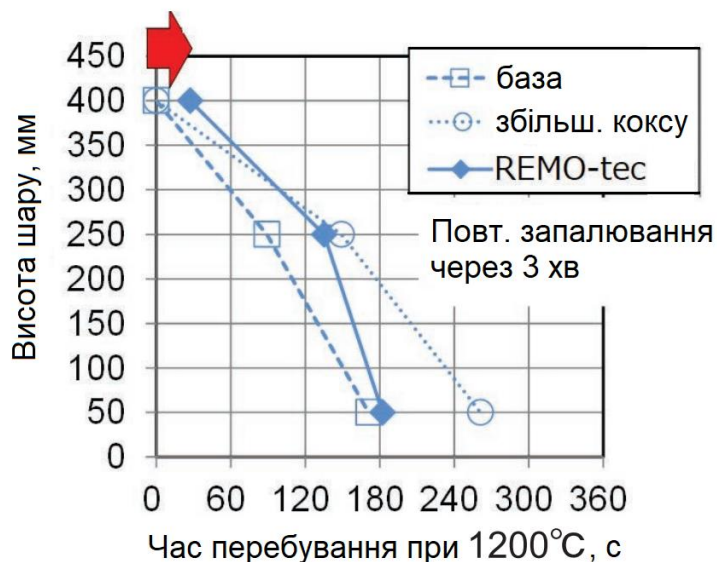


Рисунок 3.2 – Порівняння впливу технології REMO-tec та збільшення вмісту коксу на тривалість перебування при високих температурах (понад 1200 °С)

Водночас важливою особливістю REMO-tec є те, що додаткове теплопідведення переважно локалізується у верхніх горизонтах агломераційного шару і не призводить до надмірного перегріву нижніх зон. Як показано на рисунку 3.3, у нижній частині шару, на висотах 250 мм та 50 мм, температура не перевищує 1350 °С. Це має принципове значення для забезпечення високої відновлюваності агломерату, оскільки надмірне перегрівання матеріалу сприяє утворенню щільних малопористих структур та збільшенню частки магнетиту, що негативно впливає на процес відновлення агломерату в доменній печі.

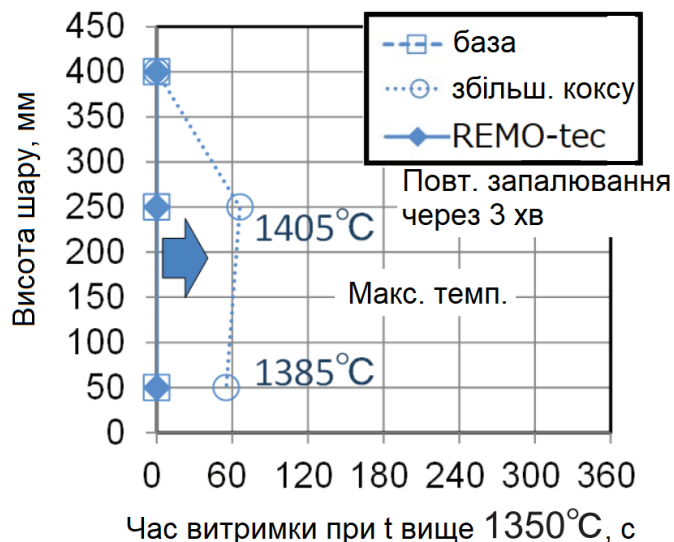


Рисунок 3.3 – Порівняння впливу технології REMO-tes та збільшення вмісту коксу на перебування при температурах вище 1350 °C

Таким чином, застосування повторного запалювання дозволяє досягти більш раціонального розподілу тепла по висоті агломераційного шару. На відміну від традиційного підвищення витрат коксового дрібняку, при якому надлишкова теплота генерується по всьому об'єму шихти, REMO-tes забезпечує локальне теплопідведення саме у тій зоні, де спостерігається найбільший дефіцит тепла. Це дозволяє покращити умови спікання верхнього шару без погіршення структурних характеристик нижніх горизонтів аглоспеку.

Особливий інтерес результати дослідження становлять з точки зору можливості зменшення витрат коксового дрібняку. З рисунку 3.1 видно, що варіант із повторним запалюванням (♦) забезпечує практично такий самий вихід придатного агломерату, як і режим із підвищеним вмістом коксового дрібняку (○), але при цьому характеризується вищою відновлюваністю агломерату. Це свідчить про те, що використання REMO-tes дозволяє компенсувати дефіцит тепла, викликаний зменшенням кількості твердого палива, без суттєвого погіршення технологічних показників процесу.

Встановлено, що зниження витрат коксового дрібняку супроводжується зменшенням тепlopідведення приблизно на 100 МДж/т шихти, що значно перевищує кількість тепла, яка додатково підводиться при повторному запалюванні. Незважаючи на це, технологія REMO-tes забезпечує ефективне використання наявної теплової енергії за рахунок повторного займання незгорілого твердого вуглецю у верхній частині шару. Це підтверджує високу ефективність повторного запалювання з точки зору тепловикористання та оптимізації теплового режиму агломераційного процесу.

### **3.2 Оцінка впливу технології повторного запалювання REMO-tes на тепловий баланс процесу агломерації**

#### **3.2.1 Аналіз температурного профілю агломераційного шару**

Одним із найважливіших факторів, що визначають ефективність агломераційного процесу, є характер розподілу температури по висоті агломераційного шару та тривалість перебування матеріалу у високотемпературному стані. Саме температурний профіль визначає умови формування рідкої фази, ступінь спікання шихти, ефективність використання теплової енергії палива та, відповідно, якість готового агломерату.

Для оцінки впливу технології повторного запалювання на тепловий стан агломераційного шару було проведено аналіз температурних профілів при різних режимах спікання. На рисунку 3.4 наведено температурні криві, отримані на глибині 50 мм від поверхні агломераційного шару при висоті шару 430 мм.

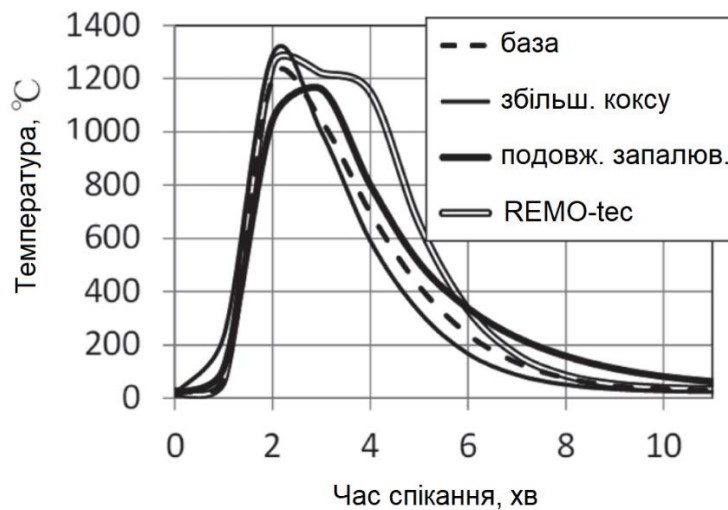


Рисунок 3.4 – Температурний профіль різних режимів спікання на глибині 50 мм від поверхні шару (загальна висота шару 430 мм)

Порівняння температурних профілів для різних режимів спікання показало суттєві відмінності у характері теплового режиму процесу.

У базовому режимі спостерігався стандартний температурний профіль агломераційного процесу, характерний для традиційного одноразового запалювання шихти. Максимальна температура та тривалість перебування матеріалу при температурах понад 1200 °C були обмеженими, що особливо негативно впливало на умови спікання у верхній частині шару.

У режимі підвищеного вмісту коксового дрібняку спостерігалось збільшення максимальної температури процесу порівняно з базовим режимом. Це пояснюється більшим тепловиділенням унаслідок підвищення кількості твердого палива в агломераційній шихті. Разом із тим тривалість перебування матеріалу при температурах понад 1200 °C практично не змінювалася. Таким чином, додаткове тепло використовувалося переважно для підвищення пікової температури, а не для стабілізації високотемпературного стану шару.

Для режиму тривалого запалювання було характерне зниження швидкості підвищення температури та зменшення максимальної температури спікання. Це свідчить про те, що збільшення тривалості первинного запалювання не забезпечує

ефективної концентрації теплової енергії у верхній частині шару. Навпаки, спостерігалось певне розширення температурного профілю, що супроводжувалося менш інтенсивним нагріванням агломераційної шихти.

Найбільш ефективним виявився режим повторного запалювання REMO-tes. Незважаючи на те, що максимальна температура в даному режимі залишалася практично на рівні базового варіанта, саме для REMO-tes була характерна найбільша тривалість перебування матеріалу при температурах понад 1200 °С. Це свідчить про більш ефективне використання теплової енергії палива та формування стабільної високотемпературної зони у верхній частині агломераційного шару.

Отримані результати підтверджують, що технологія REMO-tes забезпечує не стільки збільшення пікової температури процесу, скільки оптимізацію теплового режиму агломерації за рахунок подовження часу високотемпературного впливу. Саме цей фактор є визначальним для покращення умов формування рідкофазних зв'язків між частинками шихти та підвищення виходу придатного агломерату.

### 3.2.2 Вплив REMO-tes на вихід придатного агломерату

Результати визначення виходу придатного агломерату наведено на рисунку 3.5.

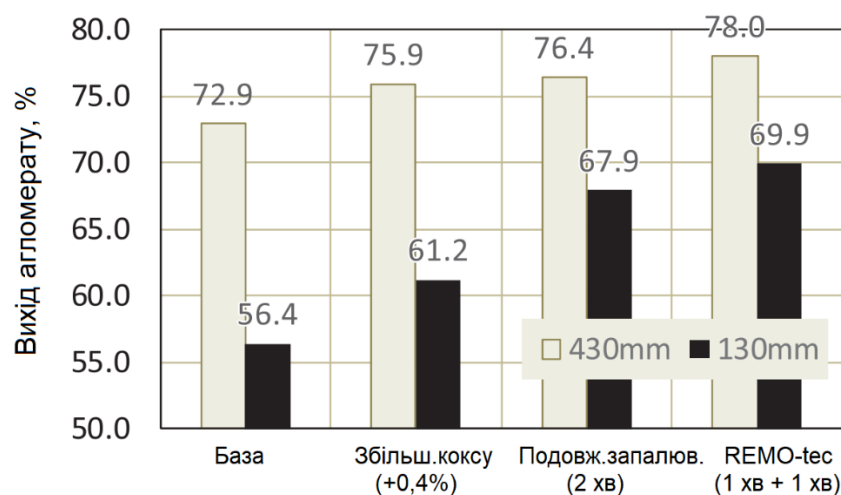


Рисунок 3.5 – Порівняння виходу агломерату при різних технологіях запалювання (висота шару 430 мм та 130 мм)

Порівняння різних режимів спікання показало, що застосування повторного запалювання забезпечує найбільш ефективне використання теплової енергії з точки зору формування придатного агломерату. Незважаючи на те, що у режимі REMO-tes кількість додатково підведеного тепла була меншою, ніж у режимі збільшеного вмісту коксу, саме повторне запалювання забезпечувало вищий вихід придатного продукту.

Особливо помітним цей ефект був при невеликій висоті агломераційного шару — 130 мм. У даному випадку використання REMO-tes дозволяло суттєво покращити умови спікання верхньої частини шару, де традиційно спостерігаються найбільші теплові втрати та найбільша кількість незгорілого твердого вуглецю.

Отримані результати свідчать про те, що ефективність тепловикористання при застосуванні REMO-tes є вищою порівняно з традиційним підвищенням витрат коксового дрібняку. При збільшенні вмісту твердого палива значна частина додаткової теплової енергії витрачається нераціонально, зокрема на перегрів нижніх горизонтів агломераційного шару. Натомість повторне запалювання забезпечує локальне теплопідведення саме до верхньої частини шару, де дефіцит тепла є найбільш критичним.

Таким чином, застосування REMO-tes дозволяє отримати вищий вихід агломерату навіть при меншому загальному теплопідведенні, що підтверджує високу ефективність даної технології з точки зору оптимізації теплового балансу агломераційного процесу.

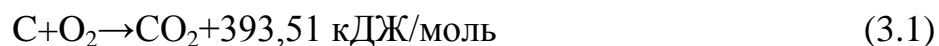
### 3.2.3 Аналіз ступеня згоряння коксового дрібняку

Для оцінки ефективності використання теплової енергії палива було проведено аналіз складу відхідних газів агломераційного процесу. На основі результатів газового аналізу визначали ступінь згоряння коксового дрібняку, який використовувався як показник ефективності горіння твердого палива.

Ступінь згоряння визначався як відношення фактичної кількості тепла, що виділяється при горінні коксового дрібняку, до теоретично можливої кількості тепла при повному окисненні всього вуглецю до  $\text{CO}_2$ .

					КНУ.РБ.136.26.113с-10.03.ЕД	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		8

Основними екзотермічними реакціями, що враховувалися при аналізі тепловиділення, були реакції повного та неповного окиснення вуглецю:



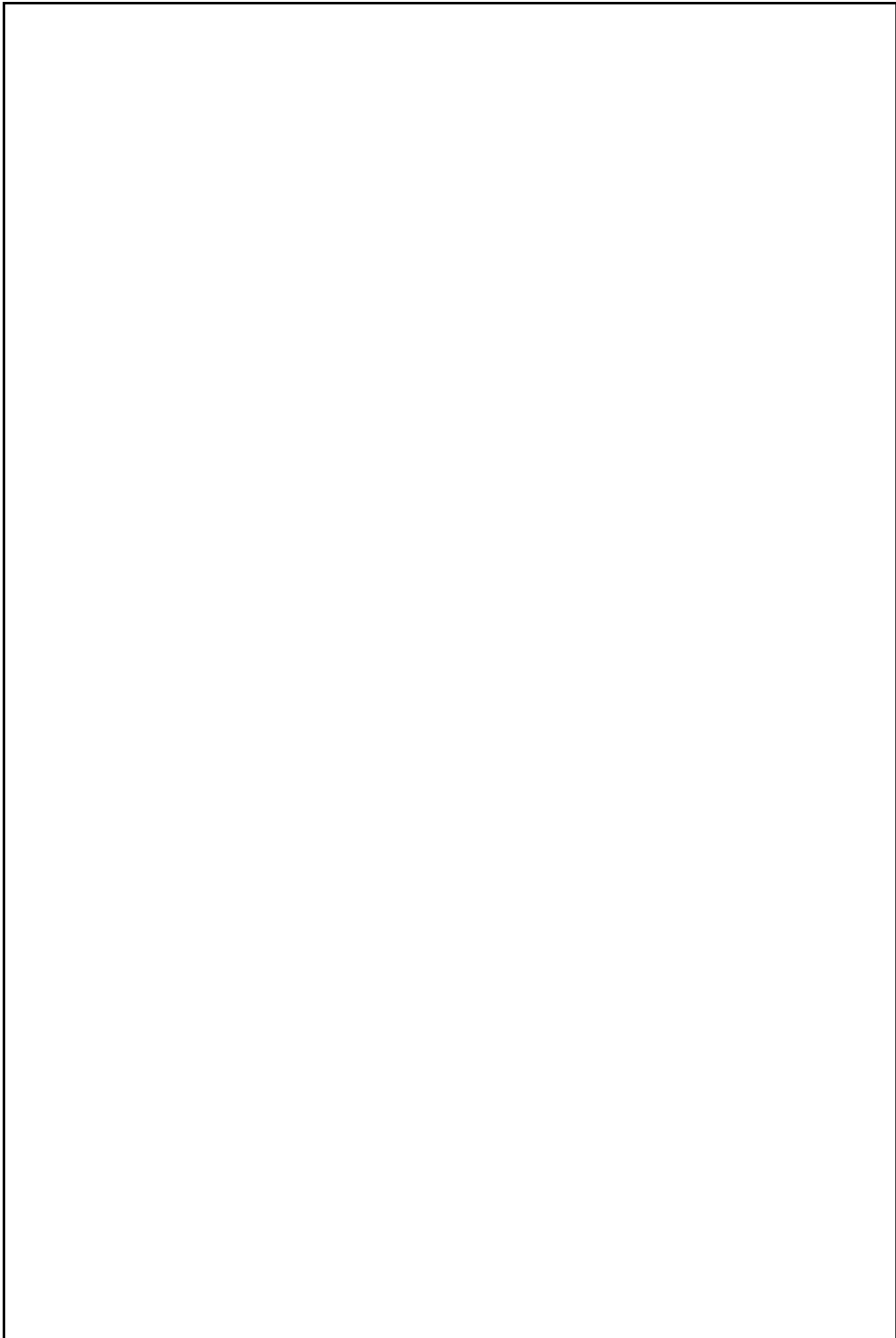
При цьому враховувалася також наявність незгорілого твердого вуглецю, який не брав участі у процесі тепловиділення.

На основі аналізу складу відхідних газів під час випробувань в аглочаші визначали частки вуглецю, що:

- повністю згорів до  $CO_2$ ;
- частково окислився до  $CO$ ;
- залишився у вигляді незгорілого твердого вуглецю.

Необхідно враховувати, що  $CO_2$  у складі відхідних газів утворювався не лише внаслідок горіння коксового дрібняку, але й при декарбонізації вапняку та доломіту. Кількість  $CO_2$ , що утворювалася внаслідок декарбонізації, визначали шляхом віднімання половини кількості  $CO$  від різниці між об'ємом всмоктуваного повітря та об'ємом відхідних газів. Такий підхід пояснюється тим, що для утворення 1 моль  $CO$  витрачається 0,5 моль кисню.

Результати визначення ступеня згорання коксового дрібняку наведені в таблиці 3.1.



					КНУ.РБ.136.26.113с-10.03.ЕД	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		10

Було встановлено, що для базового режиму та режиму підвищеного вмісту коксового дрібняку при невеликій висоті шару (130 мм) вміст незгорілого твердого вуглецю перевищував 10 %, а ступінь згоряння залишався низьким. Це свідчить про наявність значної кількості незгорілого палива у верхній частині агломераційного шару.

На відміну від цього, у режимі повторного запалювання REMO-tec незгорілий твердий вуглець практично зникав, що супроводжувалося суттєвим підвищенням ступеня згоряння коксового дрібняку. Отримані результати підтверджують, що повторне запалювання забезпечує ефективне догорання залишкового палива у верхніх горизонтах агломераційного шару.

Для режиму тривалого запалювання при висоті шару 130 мм також спостерігалось певне зменшення кількості незгорілого твердого вуглецю порівняно з базовим режимом та варіантом збільшеного вмісту коксу. Однак ефективність цього способу була значно нижчою, ніж у випадку REMO-tec.

Водночас при висоті шару 430 мм у режимі тривалого запалювання кількість незгорілого твердого вуглецю навіть перевищувала значення для базового режиму та варіанта з підвищеним вмістом коксового дрібняку. Імовірно, це пов'язано з погіршенням умов горіння у нижній частині шару внаслідок надмірного розширення температурного профілю та порушення стабільності руху фронту горіння.

Отримані результати підтверджують, що саме технологія повторного запалювання забезпечує найбільш ефективне використання теплового потенціалу коксового дрібняку та дозволяє суттєво зменшити втрати тепла, пов'язані з наявністю незгорілого твердого вуглецю в агломераційному шарі.

### 3.3 Аналіз теплопідведення та теплового балансу при застосуванні технології повторного запалювання REMO-tec

На основі результатів експериментальної серії досліджень, присвячених оцінці впливу повторного запалювання REMO-tec на тепловий баланс процесу агломерації, було проведено детальний аналіз особливостей теплопідведення та використання теплової енергії в агломераційному шарі. Основну увагу приділяли визначенню ефективності використання тепла при різних режимах спікання та встановленню причин покращення виходу агломерату при застосуванні повторного запалювання.

Оцінку ефективності REMO-tec здійснювали на основі аналізу сумарного теплопідведення, яке включало:

- теплоту, що виділяється при згорянні коксового дрібняку з урахуванням ступеня його згорання;
- теплоту, додатково підведену в процесі запалювання агломераційної шихти.

Сумарне теплопідведення визначали за наступною залежністю:

$$Q_{\text{сум}} = Q_{\text{кокс}} \cdot \frac{\eta}{100} + Q_{\text{підв}}, \quad (3.3)$$

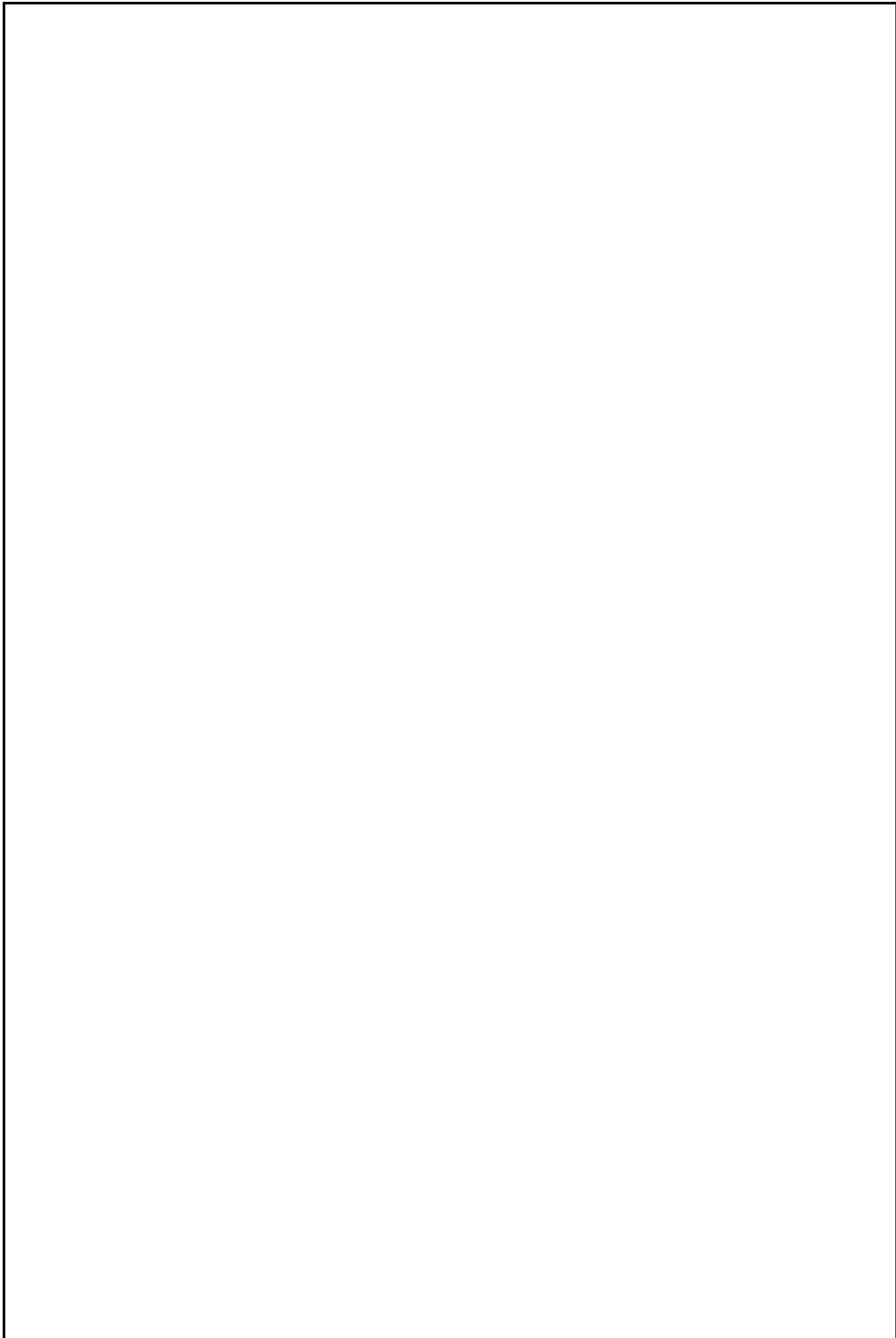
де:  $Q_{\text{кокс}}$  – розрахункова теплота згорання коксового дрібняку, МДж/т шихти;

$\eta$  – ступінь згорання коксового дрібняку, %;

$Q_{\text{підв}}$  – теплота, підведена під час запалювання, МДж/т шихти.

При розрахунках враховувалося, що фактичне теплопідведення до агломераційного шару залежить не лише від кількості коксового дрібняку, але й від ефективності його згорання. Саме тому під час аналізу теплового балансу особливу увагу приділяли ступеню згорання твердого палива.

У таблиці 3.2 наведені результати оцінки теплопідведення для агломераційного шару висотою 430 мм. Для порівняльного аналізу ефективності різних режимів спікання значення теплопідведення визначали відносно базового режиму.



					КНУ.РБ.136.26.113с-10.03.ЕД	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		13

Було встановлено, що збільшення теплотворного потенціалу шихти за рахунок підвищення вмісту коксового дрібняку відбувалося лише у режимі збільшення вмісту коксу. У даному випадку приріст потенційної теплоти становив приблизно +100 МДж/т шихти порівняно з іншими варіантами спікання. Проте з урахуванням фактичного ступеня згоряння коксового дрібняку реальний приріст тепlopідведення виявився суттєво меншим і становив:

+67 МДж/т шихти для режиму збільшення вмісту коксу;

+45 МДж/т шихти для режиму повторного запалювання REMO-tes.

При врахуванні теплоти, підведеної під час запалювання, сумарне тепlopідведення становило:

+67 МДж/т шихти для режиму збільшення вмісту коксу;

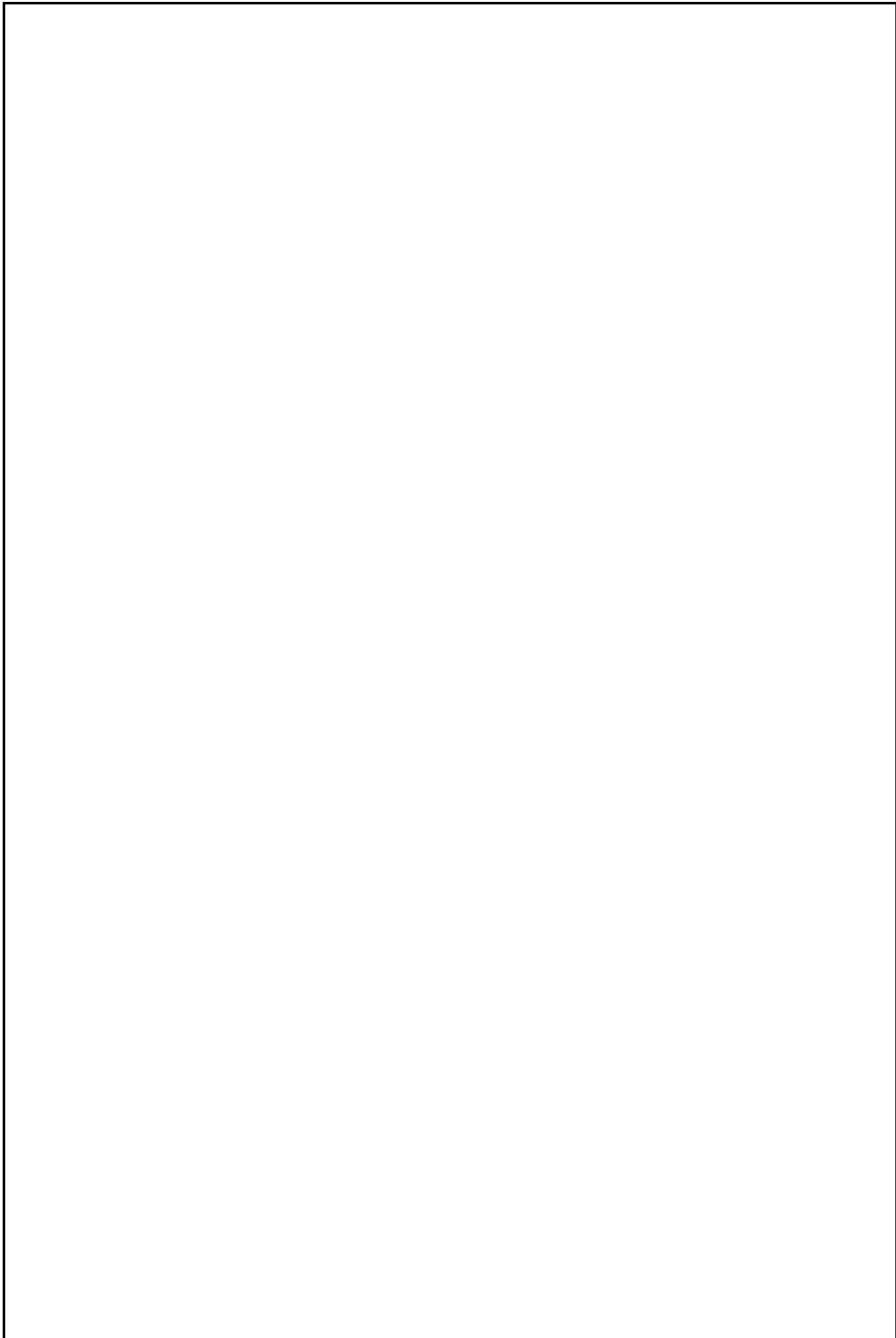
+70 МДж/т шихти для режиму повторного запалювання REMO-tes.

Таким чином, різниця між режимом підвищеного вмісту коксового дрібняку та технологією REMO-tes становила лише близько 3 МДж/т шихти. Незважаючи на це, REMO-tes забезпечував вищий вихід агломерату та кращі умови спікання верхньої частини шару. Отримані результати свідчать про те, що ефективність тепловикористання при повторному запалюванні є значно вищою порівняно з традиційним підвищенням витрат палива.

Для режиму тривалого запалювання при висоті шару 430 мм було зафіксовано найнижчий рівень тепlopідведення. Це пояснюється низьким ступенем згоряння коксового дрібняку внаслідок погіршення умов горіння у нижніх горизонтах агломераційного шару.

У таблиці 3.3 наведені результати аналізу тепlopідведення для шару висотою 130 мм. У цьому випадку відмінності між режимами спікання проявлялися ще більш виражено. За рахунок суттєвого підвищення ступеня згоряння коксового дрібняку в режимі повторного запалювання REMO-tes сумарне тепlopідведення значно зростало порівняно з іншими режимами.

					КНУ.РБ.136.26.113с-10.03.ЕД	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		14



					КНУ.РБ.136.26.113с-10.03.ЕД	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		15

На відміну від результатів для шару висотою 430 мм, у режимі тривалого запалювання при висоті шару 130 мм теплопідведення виявилось вищим, ніж у базовому режимі та варіанті збільшення вмісту коксу. При більшій висоті шару тривале безперервне запалювання негативно впливало на ступінь згоряння коксового дрібняку в нижніх горизонтах аглошихти. Імовірною причиною цього є надмірне розширення температурного профілю у верхній частині шару, показане на рисунку 3.4, що призводить до порушення стабільності фронту горіння та погіршення умов надходження кисню до нижніх зон агломераційного шару. Це свідчить про те, що тривале запалювання може бути ефективним лише для верхніх горизонтів агломераційного шару, де товщина матеріалу є відносно невеликою.

Аналіз результатів, наведених у таблицях 3.2 і 3.3, показав, що технологія повторного запалювання REMO-tec має переваги щодо ефективності теплопідведення як при великій, так і при малій висоті агломераційного шару. Повторне запалювання забезпечує більш повне використання теплового потенціалу коксового дрібняку та сприяє догоранню незгорілого твердого вуглецю у верхній частині шару.

Отримані результати підтверджують, що технологія REMO-tec дозволяє більш раціонально перерозподіляти теплову енергію в агломераційному шарі та забезпечує ефективніше використання тепла порівняно з традиційними способами інтенсифікації процесу спікання.

### **3.4 Аналіз тепловитрат та розподілу теплової енергії в агломераційному шарі при застосуванні технології повторного запалювання REMO-tec**

Одним із ключових факторів, що визначають ефективність агломераційного процесу, є не лише загальна кількість підведеного тепла, але й характер його розподілу по висоті агломераційного шару. У зв'язку з цим для оцінки ефективності технології REMO-tec було проведено детальний аналіз тепловитрат у верхній та нижній частинах агломераційного шару.

Кількість тепла, спожитого агломераційним шаром, визначали як різницю між сумарним теплопідведенням від згоряння коксового дрібняку та запалювання і тепловими втратами, пов'язаними з перенесенням теплоти газовим потоком. При цьому окремо розраховували тепловитрати для верхнього шару товщиною 130 мм та нижнього шару товщиною 300 мм.

Розрахунок тепловитрат здійснювали за наступною формулою:

$$Q_{\text{спож}} = Q_{\text{кокс+запал}} + Q_{\text{газ надх}} - Q_{\text{газ вих}}, \quad (3.4)$$

де:  $Q_{\text{спож}}$  – кількість тепла, спожитого агломераційним шаром, МДж/т шихти;

$Q_{\text{кокс+запал}}$  – теплота, підведена за рахунок згоряння коксового дрібняку та запалювання, МДж/т шихти;

$Q_{\text{газ надх}}$  – теплота газу, що надходить до шару;

$Q_{\text{газ вих}}$  – теплота газу, що виходить із шару.

Схематичне зображення розподілу тепловитрат наведено на рисунку 3.6. При цьому під час розрахунків враховували як теплоту, що виділяється при згорянні коксового дрібняку з урахуванням ступеня його згоряння, так і теплоту, підведену під час процесу запалювання.

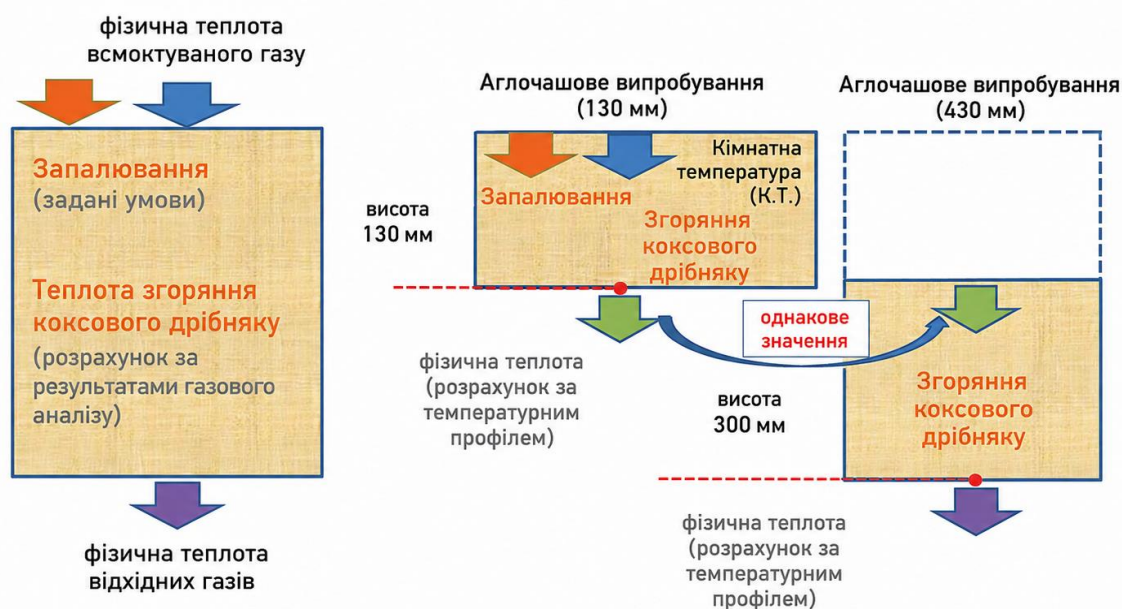


Рисунок 3.6 – Схема надходження та відведення теплоти в агломераційному шарі

При визначенні тепловмісту газів було прийнято декілька припущень. Вважалося, що теплота газу оцінюється відносно температури навколишнього середовища, тобто кімнатної температури.

Під час розрахунків використовували такі умови:

1. Теплота газу, що надходить у верхню частину агломераційного шару, приймалася рівною нулю, оскільки температура вхідного газу відповідала температурі навколишнього середовища.

2. Теплота газу, що виходить із верхнього шару, визначалась інтегруванням температурних даних від початку до завершення процесу спікання. Для цього використовували показники термопари, встановленої у нижній частині шару при випробуваннях із висотою шару 130 мм.

3. Значення теплоти газу, отримане для верхнього шару, приймалося як теплота вхідного газу для нижнього шару.

4. Теплота газу, що виходить із нижнього шару, також визначалась інтегруванням температурних даних протягом усього процесу спікання з використанням показників термопари, встановленої у нижній частині шару при висоті агломераційного шару 430 мм.

Результати аналізу теплового балансу агломераційного шару наведено на рисунку 3.7. При цьому теплота відхідних газів розглядалася як теплота, що переноситься газовим потоком із верхніх зон шару до нижніх.

Базовий режим	Підвищений вміст коксу (+0,4%)
Тривале запалювання (2 хв)	Повторне запалювання (1 хв + 1 хв) [REMO-tes]

Верхній шар  
30% (130 мм)

Нижній шар  
70% (300 мм)

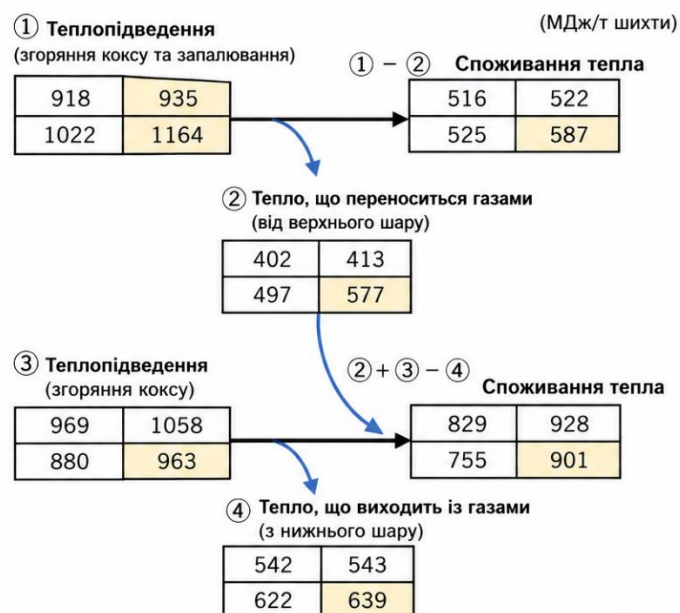


Рисунок 3.7 – Тепловитрати в верхньому і нижньому шарах

Порівняння режиму повторного запалювання REMO-tes із режимом підвищеного вмісту коксового дрібняку показало суттєві відмінності у характері розподілу теплової енергії по висоті шару.

Для REMO-tes було характерне:

- більше тепловикористання у верхній частині агломераційного шару;
- менше тепловикористання у нижній частині шару.

Це свідчить про те, що при повторному запалюванні відбувається більш рівномірний розподіл тепла по висоті агломераційного шару та зменшується різниця між тепловими умовами верхніх і нижніх горизонтів.

Крім того, сумарне тепловикористання обох шарів при застосуванні REMO-tes було вищим, ніж у режимі підвищеного вмісту коксового дрібняку. Збільшення загального тепловикористання пояснюється підвищенням ступеня згорання коксового дрібняку та більш ефективним використанням теплового потенціалу палива.

Для режиму тривалого запалювання кількість підведеного тепла також виявилася більшою, ніж у базовому режимі, незважаючи на нижчу максимальну

температуру процесу, наведену на рисунку 3.4. Це пояснюється тим, що збільшення тривалості безперервного запалювання призводило до розширення температурного профілю у верхній частині агломераційного шару.

Аналіз температурних профілів показав, що теплота, підведена під час тривалого запалювання, накопичується переважно біля поверхні агломераційного шару, після чого поступово передається у нижні горизонти. Проте такий режим не забезпечує ефективної концентрації тепла у зоні активного спікання і супроводжується погіршенням умов горіння у нижній частині шару.

На рисунку 3.8 наведено залежність між тепловитратами та виходом придатного агломерату окремо для верхнього та нижнього шарів.

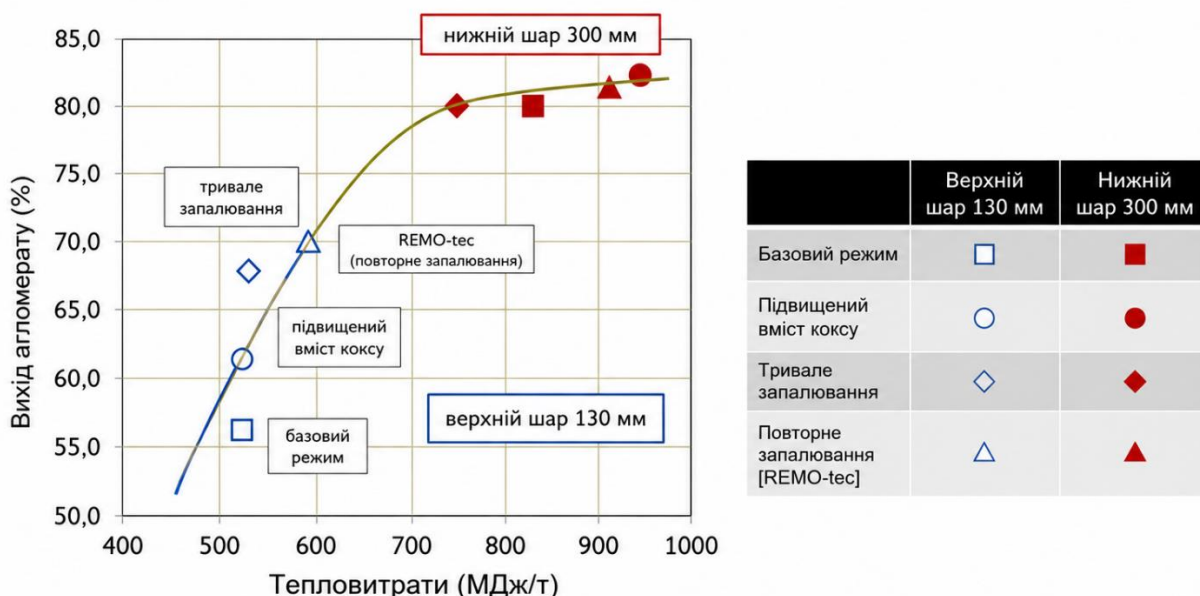


Рисунок 3.8 – Залежність між тепловими витратами та виходом агломерату

Вихід агломерату для верхнього шару визначали за результатами аглочашових випробувань при висоті шару 130 мм. Вихід агломерату для нижнього шару розраховували за формулою:

$$Y_{\text{нижн}} = \frac{Y_{430} \cdot 430 - Y_{130} \cdot 130}{430 - 130}, \quad (3.5)$$

де:  $Y_{\text{нижн}}$  – вихід агломерату для нижнього шару;

$Y_{430}$  – вихід агломерату при висоті шару 430 мм;

$Y_{130}$  – вихід агломерату при висоті шару 130 мм.

Аналіз отриманих результатів показав наявність чіткої кореляції між величиною тепловитрат та виходом придатного агломерату. Було встановлено, що верхній шар агломераційної шихти є значно більш чутливим до зміни тепловитрат порівняно з нижнім шаром. Навіть незначне збільшення кількості тепла, спожитого верхньою частиною шару, супроводжувалося суттєвим підвищенням виходу агломерату.

Саме тому режим повторного запалювання REMO-tec, який забезпечував найбільше тепловикористання у верхній частині агломераційного шару, характеризувався найвищим виходом придатного агломерату.

Отримані результати підтверджують, що одним із головних факторів ефективності REMO-tec є не збільшення загального теплопідведення, а саме оптимізація розподілу теплової енергії по висоті агломераційного шару та інтенсифікація тепловикористання у верхніх горизонтах аглошихти.

### **3.5 Промислове впровадження та виробничі результати застосування технології повторного запалювання REMO-tec**

3.5.1 Особливості організації повторного запалювання в умовах промислової агломераційної машини

Після успішного проведення лабораторних та аглочашових випробувань технологія повторного запалювання REMO-tec була впроваджена в умовах діючих промислових агломераційних фабрик. Основною метою промислових випробувань була перевірка ефективності технології в реальних умовах виробництва, а також оцінка її впливу на техніко-економічні показники агломераційного процесу.

Для реалізації технології REMO-tec на промисловій агломераційній машині було встановлено додатковий пристрій повторного запалювання. Камера повторного запалювання розміщувалася на відстані приблизно 3 м від основної запалювальної печі. За швидкості руху агломераційних візків це забезпечувало

інтервал часу між завершенням первинного запалювання та початком повторного запалювання в межах 1,0–1,2 хв.

Такий часовий проміжок був обраний з урахуванням особливостей розвитку фронту горіння в агломераційному шарі. За цей час у верхній частині шихти ще зберігалася достатня кількість незгорілого твердого вуглецю, який міг бути повторно залучений до процесу горіння після додаткового теплопідведення.

Витрата палива під час повторного запалювання підтримувалася на тому ж рівні, що й під час первинного запалювання агломераційної шихти. Це дозволяло забезпечити стабільні умови повторного займання поверхневого шару та виключити вплив зміни теплової потужності пальників на результати дослідження.

### 3.5.2 Вплив REMO-tes на технологічні показники агломераційного процесу

Після запуску системи повторного запалювання було проведено серію промислових випробувань, у ході яких роботу агломераційної машини з використанням REMO-tes порівнювали з традиційним режимом одноразового запалювання (базовий режим). Оцінювання ефективності технології здійснювали протягом декількох діб безперервної роботи агломераційної фабрики.

У процесі досліджень було реалізовано два основні режими випробувань:

- TEST-1 — оцінка впливу REMO-tes на вихід придатного агломерату при незмінному вмісті коксового дрібняку в агломераційній шихті;
- TEST-2 — оцінка можливості зниження витрат коксового дрібняку при використанні технології повторного запалювання.

Результати оцінки технологічних показників агломераційного процесу наведені на рисунку 3.9.

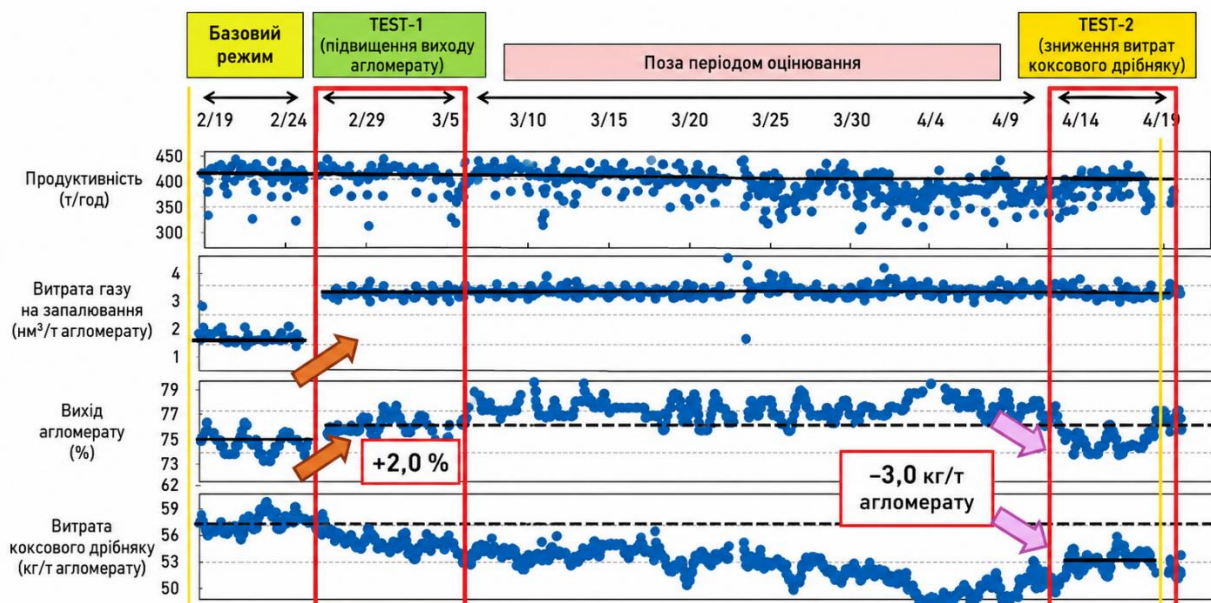


Рисунок 3.9 – Покращення показників роботи промислової агломераційної фабрики

Встановлено, що в режимі TEST-1 застосування REMO-tes забезпечило збільшення виходу придатного агломерату приблизно на 2,0 % порівняно з базовим режимом одноразового запалювання. Отримані результати підтвердили ефективність повторного запалювання в умовах реального виробництва та показали, що технологія дозволяє суттєво покращити процес спікання верхньої частини агломераційного шару.

Під час проведення TEST-2 кількість коксового дрібняку в агломераційній шихті поступово зменшували до такого рівня, при якому вихід придатного агломерату залишався на 1,0 % вищим порівняно з базовим режимом. У результаті було досягнуто зниження витрат коксового дрібняку на 3,0 кг/т агломерату.

Отримане скорочення відповідало приблизно 5 % від загальних витрат коксового дрібняку в агломераційному процесі. Це є надзвичайно важливим результатом з точки зору підвищення енергоефективності виробництва та зменшення викидів CO<sub>2</sub>.

Крім того, у ході промислових випробувань було підтверджено покращення відновлюваності агломерату при використанні REMO-tes. Підвищення відновлюваності пояснюється можливістю зменшення витрат твердого палива без

погіршення умов спікання, що сприяє формуванню більш пористої та сприятливої для відновлення структури агломерату.

Таким чином, результати промислових випробувань підтвердили, що технологія повторного запалювання дозволяє одночасно:

- підвищити вихід придатного агломерату;
- зменшити витрати коксового дрібняку;
- покращити відновлюваність агломерату;
- забезпечити скорочення викидів CO<sub>2</sub>.

### 3.5.3 Додаткові підтвердження механізму підвищення виходу агломерату

Для детального аналізу причин покращення виходу агломерату при використанні REMO-tec були проведені додаткові дослідження структури агломераційного шару та ступеня згоряння коксового дрібняку по висоті шару.

Під час досліджень відбір проб агломерату здійснювали шляхом демонтажу одного агломераційного візка як у базовому режимі, так і в режимі TEST-1 із використанням повторного запалювання.

Результати аналізу показали, що в режимі TEST-1 кількість незгорілого твердого вуглецю у верхній частині агломераційного шару суттєво зменшилася та досягла рівня, характерного для нижніх горизонтів шару. Одночасно спостерігалось підвищення виходу придатного агломерату у верхній частині шару. Відповідні результати наведені на рисунках 3.10 та 3.11.

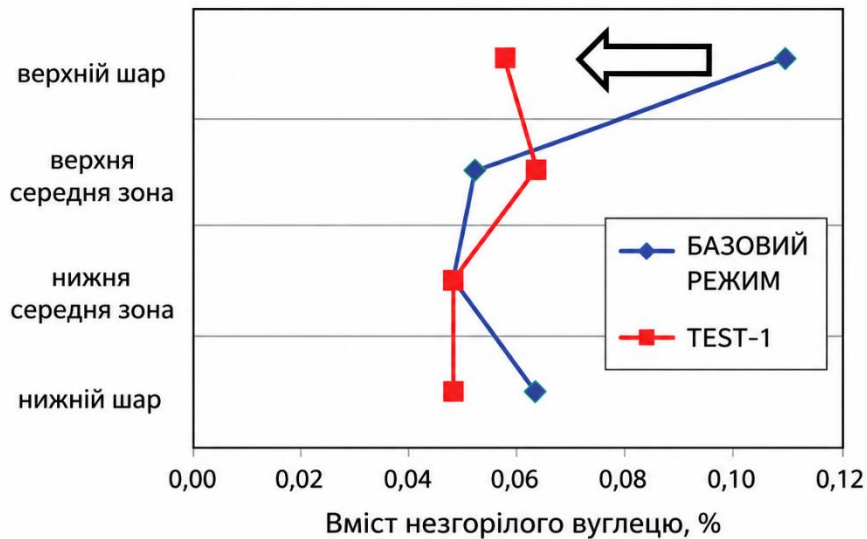


Рисунок 3.10 – Розподіл незгорілого коксового дрібняку по висоті агломераційного шару

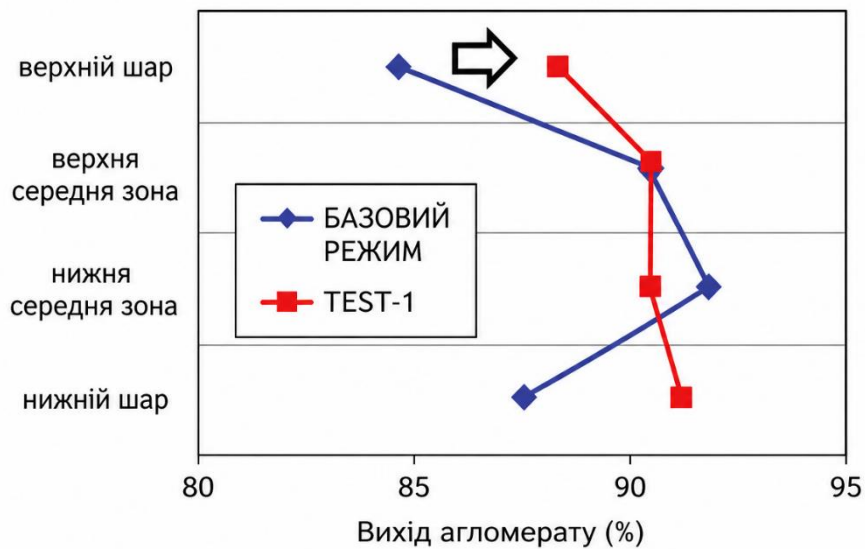


Рисунок 3.11 – Розподіл виходу агломерату по висоті агломераційного шару

Отримані дані підтверджують, що одним із головних механізмів підвищення виходу агломерату при використанні REMO-tes є ефективне догорання залишкового твердого вуглецю у верхніх горизонтах агломераційної шихти.

Для додаткового дослідження теплового режиму процесу проводили безпосереднє вимірювання температури всередині агломераційного шару за допомогою термопар, встановлених у різних горизонтах шару.

Температурні профілі для базового режиму та режиму TEST-1 наведені на рисунку 3.12. Необхідно зазначити, що для висоти шару 340 мм у режимі TEST-1 температурний профіль не був отриманий через пошкодження термопари.

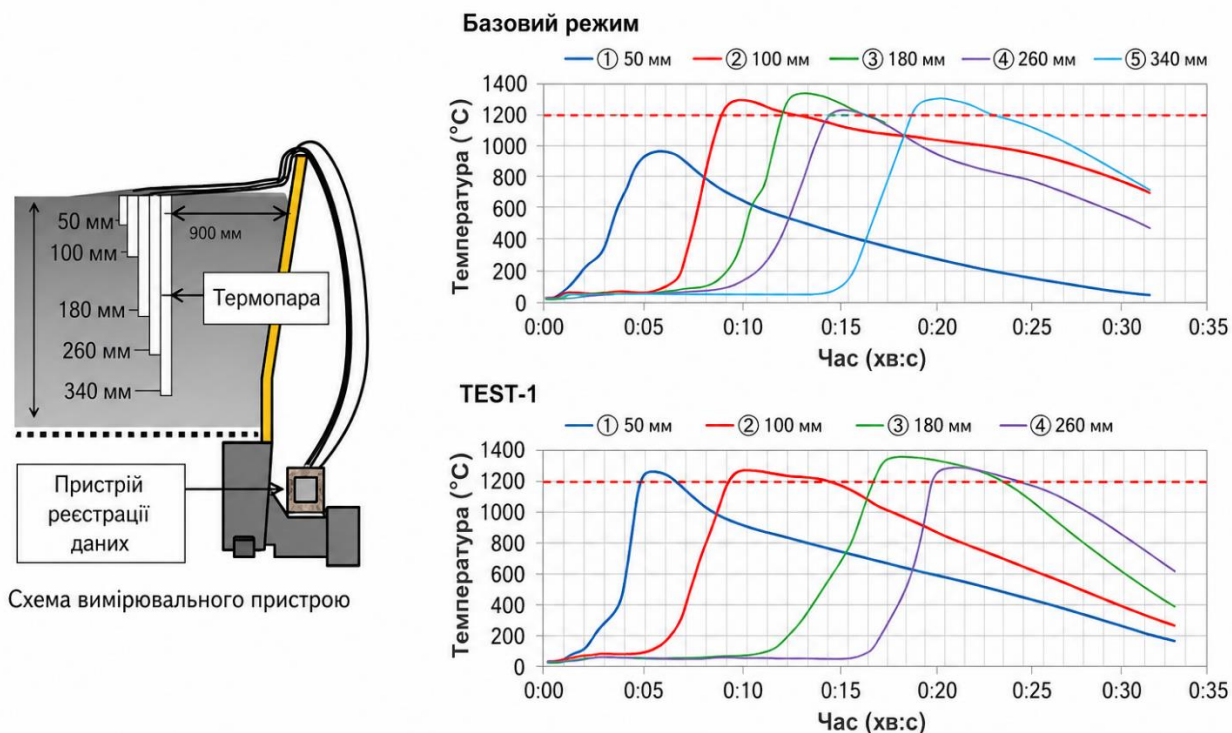


Рисунок 3.12 – Схема вимірювального пристрою та профілі температури на різних висотах агломераційного шару

Результати вимірювань показали, що при використанні REMO-tes у верхній частині агломераційного шару, на глибині 50 та 100 мм від поверхні, суттєво збільшується тривалість перебування матеріалу у високотемпературному стані. Імовірно, саме догорання незгорілого твердого вуглецю відіграє визначальну роль у подовженні часу високотемпературного впливу.

Разом із тим було встановлено, що швидкість проходження фронту горіння при використанні REMO-tes дещо знижувалася. Це проявлялося у збільшенні часу

досягнення максимальної температури в агломераційному шарі порівняно з базовим режимом.

Імовірною причиною такого явища є погіршення газопроникності агломераційного шару внаслідок повторного теплового впливу на поверхневі горизонти шихти. Однак, незважаючи на певне уповільнення процесу спікання, загальна продуктивність агломераційної машини залишалася стабільною завдяки суттєвому підвищенню виходу придатного агломерату, що підтверджується результатами, наведеними на рисунку 3.9.

Отже, промислові випробування підтвердили високу ефективність технології REMO-tes та її перспективність для впровадження на сучасних агломераційних фабриках як одного з напрямів підвищення енергоефективності та декарбонізації агломераційного виробництва.

## ВИСНОВКИ

1. У результаті проведеного аналізу сучасного стану агломераційного виробництва встановлено, що одним із перспективних напрямів зниження викидів CO<sub>2</sub> у чорній металургії є скорочення витрат твердого палива під час агломерації. Разом із тим зменшення вмісту коксового дрібняку в агломераційній шихті традиційно супроводжується погіршенням виходу придатного агломерату, особливо у верхній частині агломераційного шару, де спостерігаються значні теплові втрати та підвищений вміст незгорілого твердого вуглецю.

2. Встановлено, що технологія повторного запалювання REMO-tes забезпечує догорання незгорілого твердого вуглецю у верхніх горизонтах агломераційного шару після завершення первинного запалювання. Повторне запалювання сприяє подовженню тривалості перебування матеріалу при температурах понад 1200 °С у поверхневій зоні аглошихти, що створює більш сприятливі умови для формування міцної структури агломерату та підвищення виходу придатного продукту.

3. За результатами аглочашових випробувань встановлено, що застосування REMO-tes дозволяє підвищити вихід агломерату без погіршення його відновлюваності. На відміну від традиційного збільшення витрат коксового дрібняку, при повторному запалюванні досягається ефективніше використання теплової енергії. Було підтверджено, що ефект від повторного запалювання є співставним із результатом значного збільшення кількості твердого палива, хоча додаткове теплопідведення при REMO-tes є суттєво меншим.

4. Аналіз теплового балансу агломераційного процесу показав, що технологія REMO-tes забезпечує більш раціональний розподіл теплової енергії по висоті агломераційного шару. На відміну від режиму підвищеного вмісту коксового дрібняку, при повторному запалюванні збільшується тепловикористання у верхній

					КНУ.РБ.136.26.113с-10.В				
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>					
<i>Розробив</i>	<i>Секрет</i>				ВИСНОВКИ	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>	
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>						1	2	
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>								
<i>Затвердив</i>	<i>Бабошко</i>								
						МТ-22-2			

частині шару та зменшується надлишкове теплове навантаження на нижні горизонти. У результаті зменшується різниця між тепловими умовами верхнього та нижнього шарів, що позитивно впливає на рівномірність процесу спікання.

5. Встановлено наявність тісного взаємозв'язку між тепловитратами та виходом придатного агломерату. Верхня частина агломераційного шару виявилася найбільш чутливою до зміни теплових умов. Саме збільшення кількості тепла, спожитого верхнім шаром при повторному запалюванні, забезпечило найбільш помітне підвищення виходу агломерату. Отримані результати підтвердили, що ефективність REMO-tes визначається не стільки збільшенням загального теплопідведення, скільки оптимізацією використання теплової енергії у верхніх горизонтах аглошихти.

6. Промисловими випробуваннями технології REMO-tes підтверджено можливість підвищення виходу придатного агломерату приблизно на 2,0 % при незмінному вмісті коксового дрібняку в агломераційній шихті. Одночасно було досягнуто зниження витрат коксового дрібняку на 3,0 кг/т агломерату, що відповідає приблизно 5 % від загального споживання твердого палива в агломераційному процесі. Крім того, встановлено покращення відновлюваності агломерату при використанні повторного запалювання.

7. Отримані результати свідчать про високу перспективність технології REMO-tes для впровадження в сучасному агломераційному виробництві. Застосування повторного запалювання дозволяє одночасно підвищити енергоефективність процесу агломерації, скоротити витрати твердого палива, покращити якість агломерату та зменшити викиди CO<sub>2</sub>, що є важливим напрямом декарбонізації металургійного виробництва та досягнення цілей вуглецевої нейтральності.

					КНУ.РБ.136.26.113с-10.В	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		2

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. M. Zandi, M. Martinez-Pacheco and T. Fray: Miner. Eng., 23 (2010), 1139.
2. R. Lovel, K. Vining and M. Dell'Amico: Miner. Process. Extr. Metall., 116 (2007), 85.
3. R. R. Lovel, K. R. Vining and M. Dell'Amico: ISIJ Int., 49 (2009), 195.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.195>
4. K. Murakami, K. Sugawara and T. Kawaguchi: ISIJ Int., 53 (2013), 1580.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.1580>
5. K. Murakami, R. Watanabe, E. Matsushashi, A. Nakamura, K. Takehara, T. Higuchi and M. Matsumura: Tetsu-to-Hagané, 107 (2021), 422 (in Japanese).  
<https://doi.org/10.2355/tetsutohagane>. TETSU-2020-081
6. T. Kawaguchi and M. Hara: ISIJ Int., 53 (2013), 1599. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.1599>
7. M. Matsumura, Y. Yamaguchi, K. Higuchi, T. Murakami and T. Maeda: Tetsu-to-Hagané, 107 (2021), 471 (in Japanese). <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane>. TETSU-2020-073
8. M. Matsumura, R. Kosugi, Y. Yamamoto, J. Nagata and K. Higuchi: ISIJ Int., 63(2023), 1002. <https://doi.org/10.2355/isijinternational>. ISIJINT-2022-485
9. K. Ano, T. Yabata, H. Miyatani, K. Honda, N. Hasegawa and K. Sugiyama: CAMP-ISIJ, 7(1994), 146 (in Japanese).
10. K. Nakajima, S. Yasumoto, S. Nigo, M. Okuyama, H. Obata and T. Kodama: Tetsu-to-Hagané, 69(1983), S718 (in Japanese).  
[https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.69.12\\_S713](https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.69.12_S713)
11. N. Oyama, Y. Iwami, T. Yamamoto, S. Machida, T. Higuchi, H. Sato, M. Sato, K. Takeda, Y. Watanabe, M. Shimizu and K. Nishioka: ISIJ Int., 51(2011), 913.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.913>

					КНУ.РБ.136.26.113с-10.СВД					
					Список використаних джерел					
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Секрет</i>								1	2
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>									
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>								МТ-22-2	
<i>Затвердив</i>	<i>Бабошко</i>									

12. K. Ano, T. Yabata, H. Miyatani, K. Honda, N. Hasegawa and K. Sugiyama: CAMP-ISIJ, 7 (1994), 146 (in Japanese).

13. N. Oyama, Y. Iwami, T. Yamamoto, S. Machida, T. Higuchi, H. Sato, M. Sato, K. Takeda, Y. Watanabe, M. Shimizu and K. Nishioka: ISIJ Int., 51 (2011), 913. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.913>

14. Y. Iwami, T. Yamamoto, T. Higuchi, K. Nushiro, M. Sato and N. Oyama: ISIJ Int., 53 (2013), 1633. [https://doi.org/10.2355/ isijinternational.53.1633](https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.1633)

15. K.Sato, S.Suzuki, Y.Sawamura and K.Ono: Tetsu-to-Hagané, 68(1982), 2215 (in Japanese). [https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.68.15\\_2215](https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.68.15_2215)

16. M.Sasaki and Y.Hida: Tetsu-to-Hagané, 68(1982), 563 (in Japanese). [https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.68.6\\_563](https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.68.6_563)

17. J.Hancart, V.Leroy and A.Bragard: CNRM Rep. DS., 24(1967), 3.

18. J.D.G.Hamilton, B.F.Hoskins, W.G.Mumme, W.E.Borbidge and M.A.Montague: Neues Jahrb. Miner. Abh., 161(1989), 1.

19. W.G.Mumme, J.M.F.Clout and R.W.Gable: Neues Jahrb. Miner. Abh., 173(1998), 93. <https://doi.org/10.1127/njma/173/1998/93>

20. W.G.Mumme: Neues Jahrb. Miner. Abh., 178(2003), 307. <https://doi.org/10.1127/0077-7757/2003/0178-0307>

21. V.Kahlenberg, H.Krüger and V.S.Goettgens: Acta. Crystallogr. B, 75(2019), 1126. <https://doi.org/10.1107/S2052520619014380>