Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

Наукова робота

старшого наукового співробітника, кандидата технічних наук
Шумельчика Євгена Ігоровича

та наукового співробітника
Горупахи Віктора Володимировича

за темою:

«Розробка і впровадження нових підходів до діагностики та управління доменною плавкою»

представлена на здобуття премії Президента України для молодих вчених

м. Дніпро
2018 р.

НАУКОВА НОВИЗНА

Для умов перехідних режимів доменної плавки з метою забезпечення її стабільності при зміні якісного і кількісного складу компонентів шихтових матеріалів, а також при зміні використовуваних в дутті паливних добавок науково обґрунтовано комплексне використання інформації сучасних засобів автоматизованого контролю: стаціонарних термозондів і термопар футерівки по висоті і окружності доменної печі для виявлення нових закономірностей і зв'язків процесів з подальшим їх застосуванням для обґрунтування вибору управляючих впливів, а також запропоновано новий підхід до вибору енергоефективних режимів завантаження:

- **Обґрунтовано новий підхід до вибору раціональних програм завантаження безконусного завантажувального пристрою, що забезпечує стабільний економічний хід доменної печі при зміні технологічних умов плавки, який полягає в зменшенні кількості робочих кутових положень лотка і зміщення від порції до порції максимумів рудних навантажень уздовж радіуса колошника, що при використанні коксу низької якості сприяє підвищенню газопроникності і збільшенню ступеня використання відновлювальної здатності газів за рахунок збільшення часу перебування газів в печі.**

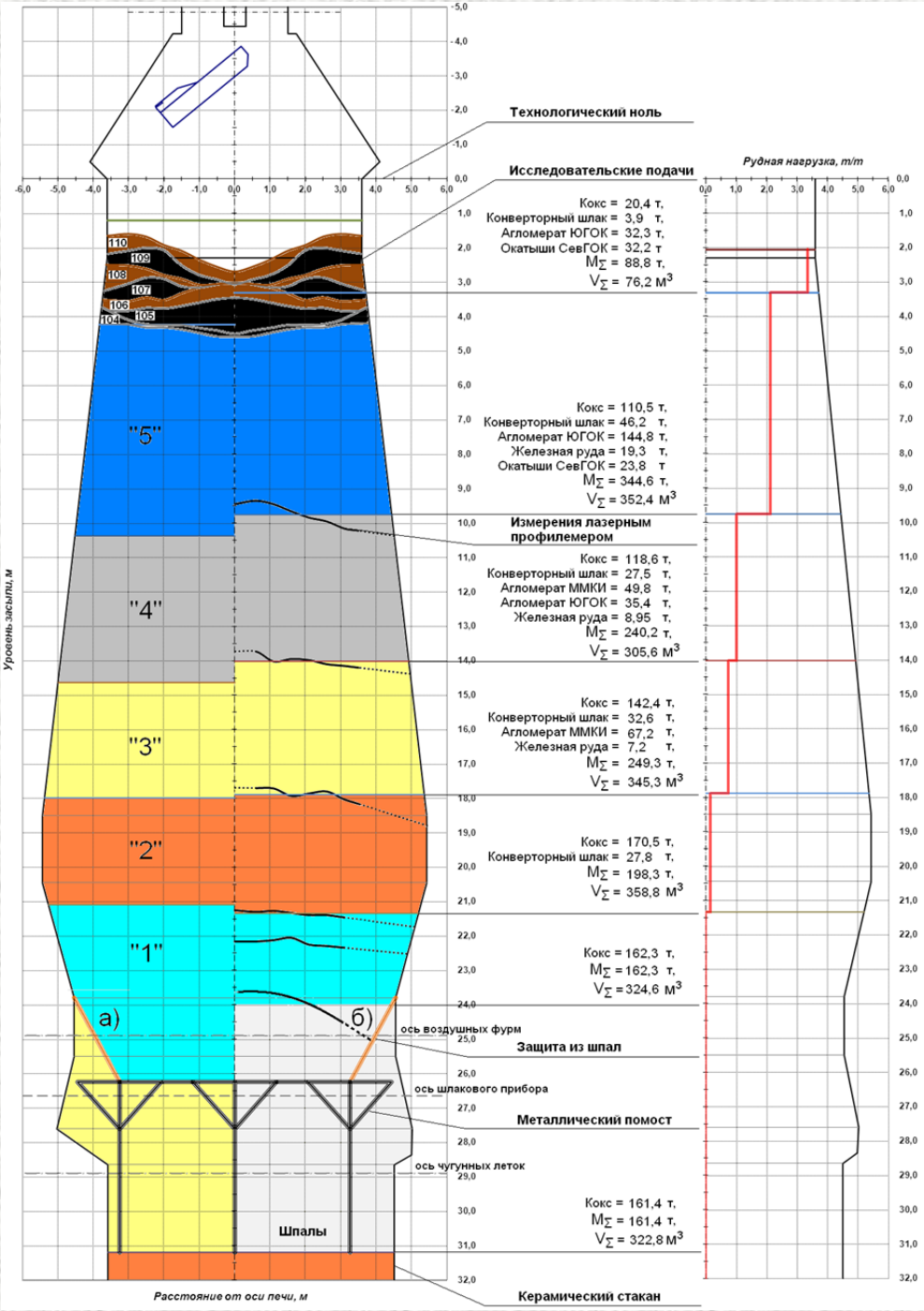
- **Вперше розроблені температурні показники оцінки розподілу газового потоку по радіусу доменної печі. Встановлено їх раціональні діапазони зміни при роботі доменних печей в різних газодинамічних і паливних умовах: при роботі на зволоженому дутті без природного газу і пиловугільного палива, з природним газом, з природним газом і пиловугільним паливом, з пиловугільним паливом. З використанням запропонованих показників вперше сформульовані вимоги до розподілу температур газового потоку по радіусу печі, дотримання яких при використанні раціональних режимів завантаження дозволяє досягти високих техніко-економічних показників доменної плавки.**

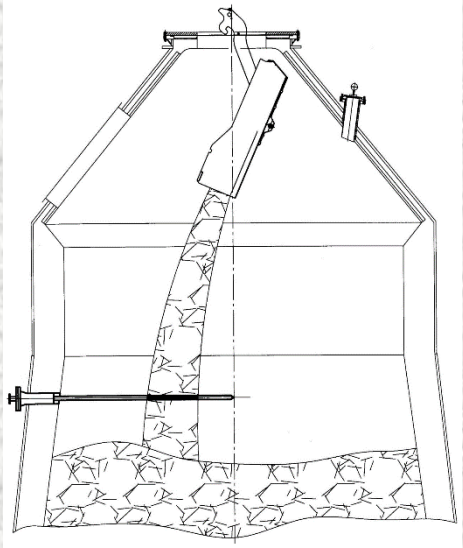
НАУКОВА НОВИЗНА

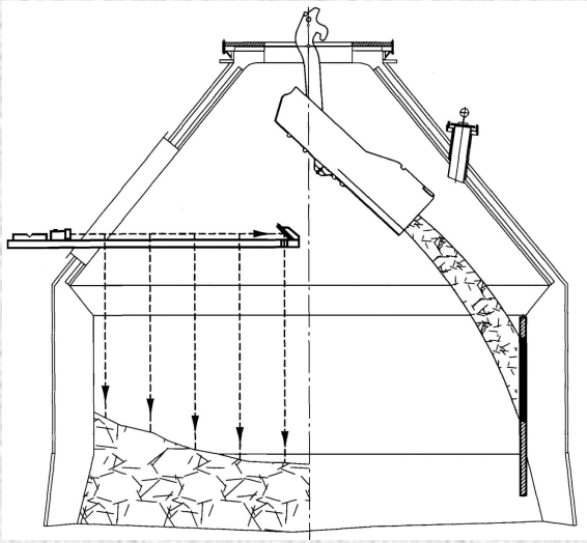
- **Вперше на основі аналізу температур футерівки по висоті доменної печі протягом п'яти років її експлуатації встановлені граничні значення середньомісячних температур, при яких футерівка середини і верху шахти вироблена на 50 та 100%. Для футерівки низу шахти, розпару і заплечиків встановлені середньомісячна температура, яка свідчить про утворення в нижній зоні печі нестійкого захисного гарнісажу і температура, що характеризує повну його відсутність. Встановлено, що величини середньоквадратичних відхилень температур футерівки шахти по окружності, які перевищують 20% від їх середніх значень, свідчать про порушення ходу печі. На підставі отриманих особливостей зміни температур футерівки і їх середньоквадратичних відхилень розроблено метод оцінки впливу технологічних властивостей на стан футерівки доменної печі.**

- **Вперше досліджено вплив дуттєвого режиму при використанні в ньому збільшеної кількості водяної пари, природного газу, природного газу із пиловугільним паливом та окремо пиловугільного палива на зміну форми кривої розподілу температури периферійного газового потоку по висоті доменної печі від фурменої зони до колошника і температури газів по радіусу печі над поверхнею засипу шихти, що стало передумовою для розробки методу ідентифікації межі зони в'язко-пластичного стану в периферійній зоні печі. Встановлені особливості впливу газодинамічного режиму доменної плавки на температуру газового потоку дозволяють при зміні режиму завантаження або дуттєвого режиму печі адекватно виявляти і правильно відслідковувати фактори, що впливають на розподіл температури газів.**

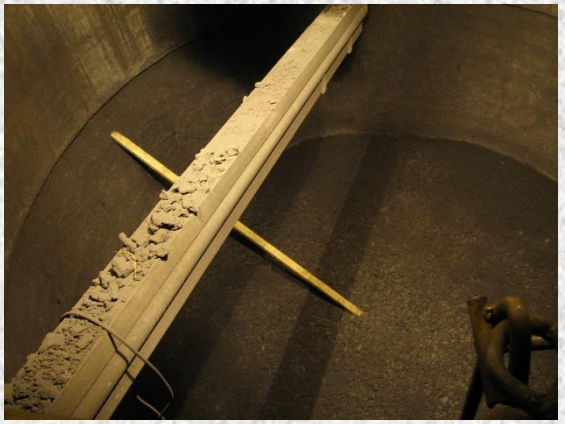
Дослідження параметрів потоку шихтових матеріалів і їх розподілу на колошнику



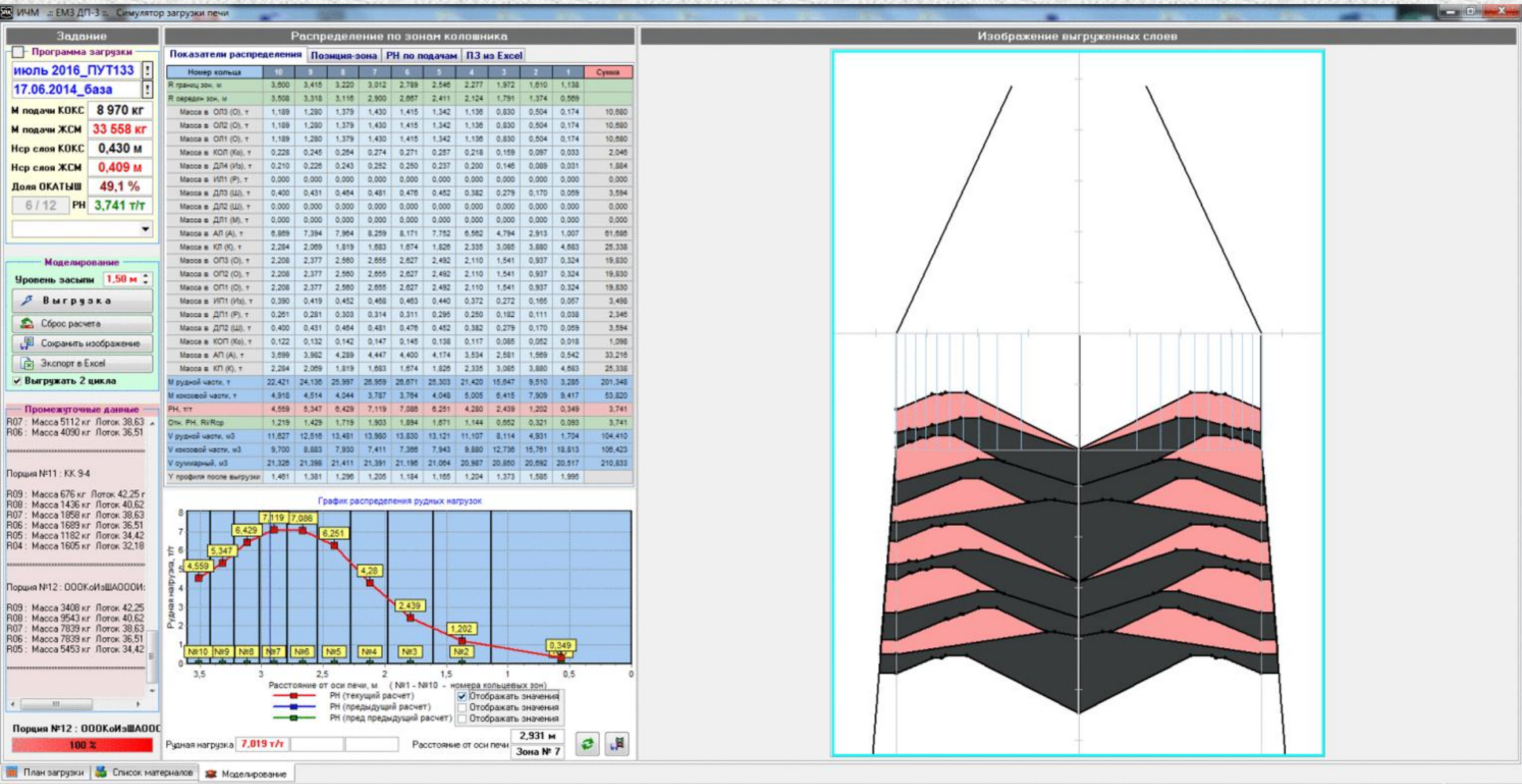




Розрахунок задувочної шихти, проведення передпускових досліджень розподілу шихтових матеріалів в печі, технологічне налаштування обладнання системи завантаження, розробка та реалізація раціональних програм завантаження доменної печі роздувочного періоду



Модельна система підтримки прийняття рішень по вибору і коригуванню програм завантаження доменної печі



Розподіл компонентів шихти в табличному вигляді і рудних навантажень на графіку

Формування і опускання в ДП шарів шихти

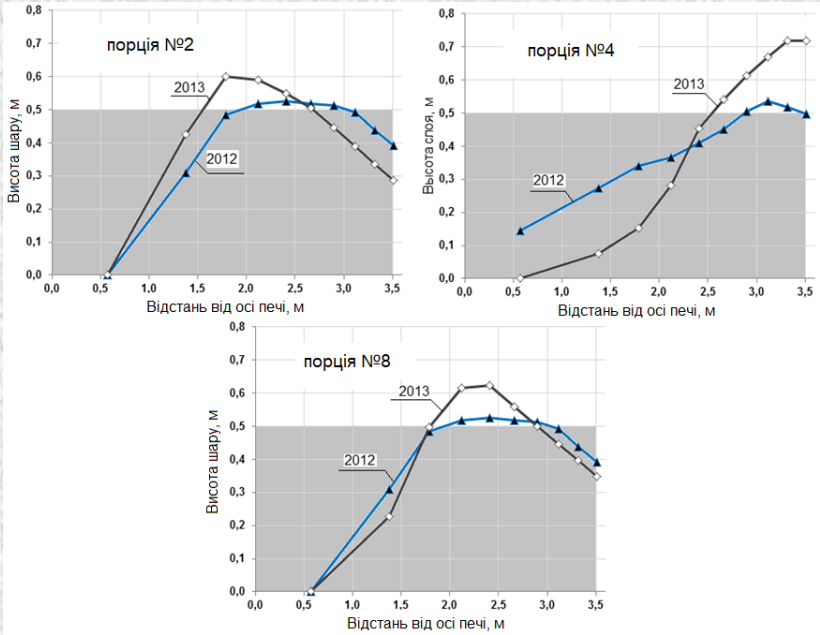
Нові підходи до управління завантаженням доменної печі в змінних шихтових умовах

Програми завантаження доменної печі при використанні якісної шихти (2012) та шихти низької якості (2013)

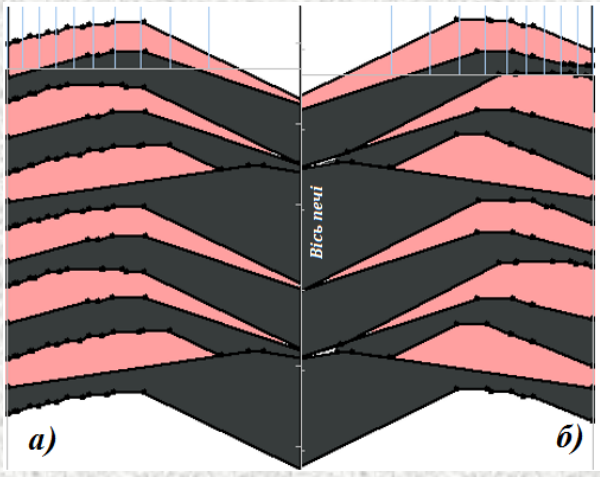
2012	№ порції											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№ кутового положення лотка	Вид матеріалу											
	Розподіл матеріалів по кутових положеннях лотка, %											
	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р
10		12		19		17		12		19		17
9		19	8	20	8	17		19	8	20	8	17
8	8	13	16	14	16	13	8	13	16	14	16	13
7	6	15	21	14	21	10	6	15	21	14	21	10
6	6	12	21	12	21	12	6	12	21	12	21	12
5	6	11	21	11	21	14	6	11	21	11	21	14
4	6	11	13	10	13	17	6	11	13	10	13	17
3	6	7					6	7				
2	22						22					
1	40						40					

2013	№ порції											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№ кутового положення лотка	Вид матеріалу											
	Розподіл матеріалів по кутових положеннях лотка, %											
	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р
10				48						48		
9				20	10	10				20	10	
8			16	15	21	28		26	16	15	21	10
7		25	21	10	27	23		22	21	10	27	28
6		30	21	7	25	23		17	21	7	25	23
5	6	17	25		17	16	6	17	25		17	23
4	12	14	17				12	18	17			16
3	12	14					12					
2	30						30					
1	40						40					

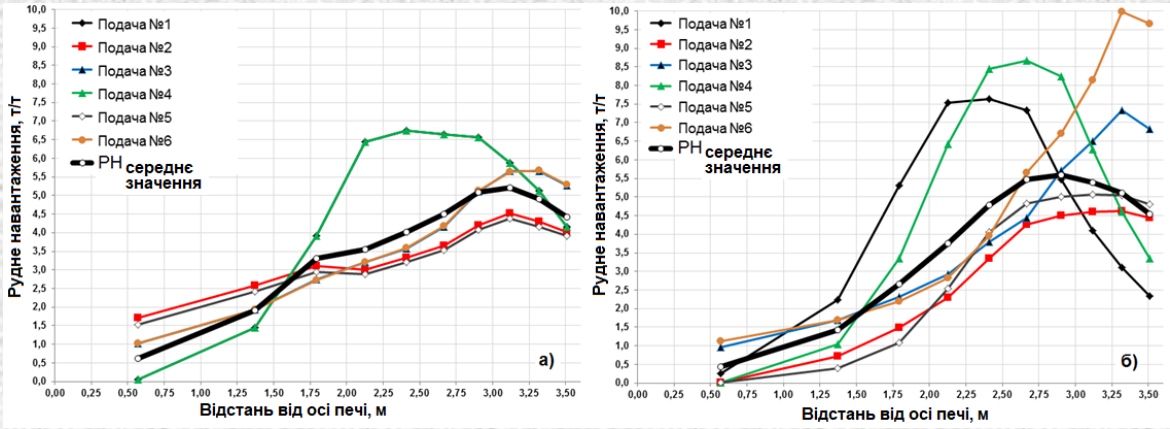
Зміна висоти шарів по радіусу печі після вивантаження залізовмісних порцій для двох програм завантаження



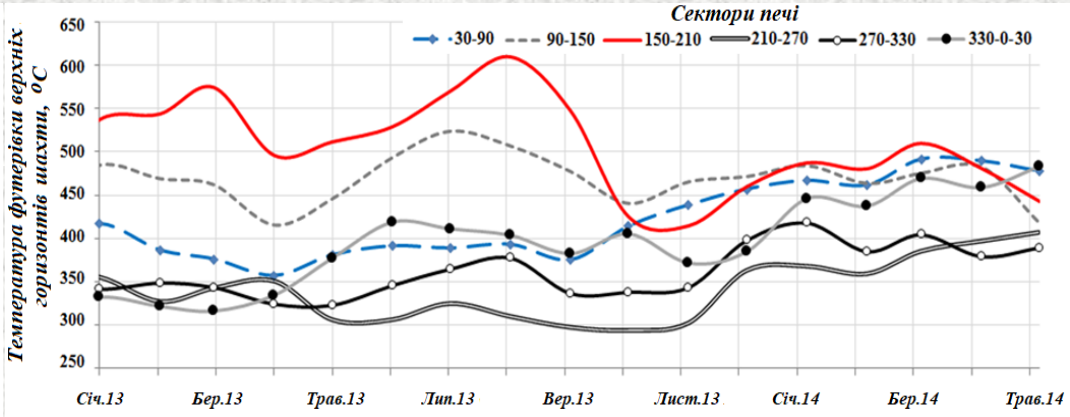
Структури стовпа шихтових матеріалів для програм завантаження 2012 (а) та 2013 (б)



Розподіл розрахункових рудних навантажень по радіусу колошника всередині циклу завантаження після вивантаження кожної подачі для програм завантаження 2012 (а) та 2013 (б)

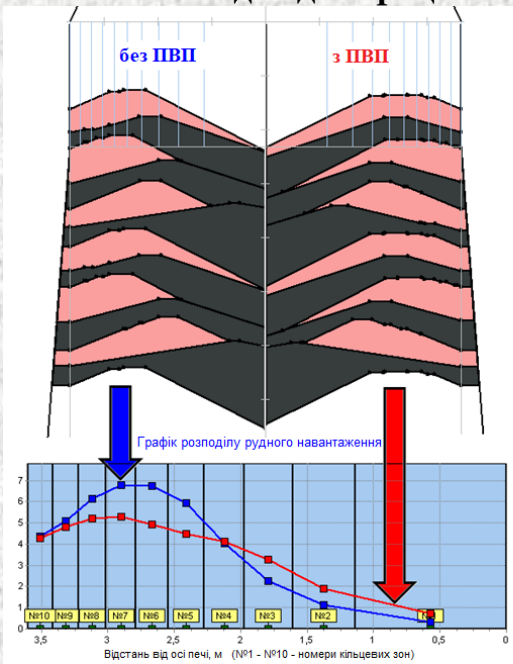


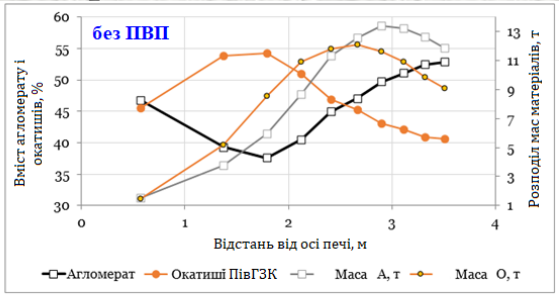
Розподіл температур футерівки верхніх горизонтів шахти по окружності доменної печі до та після реалізації скоригованого способу управління окружним розподілом шихти

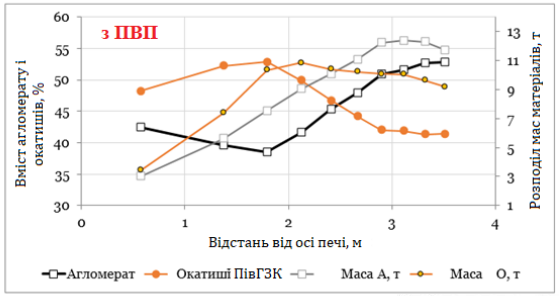


Нові підходи до управління завантаженням доменної печі при вдуванні в горн пиловугільного палива

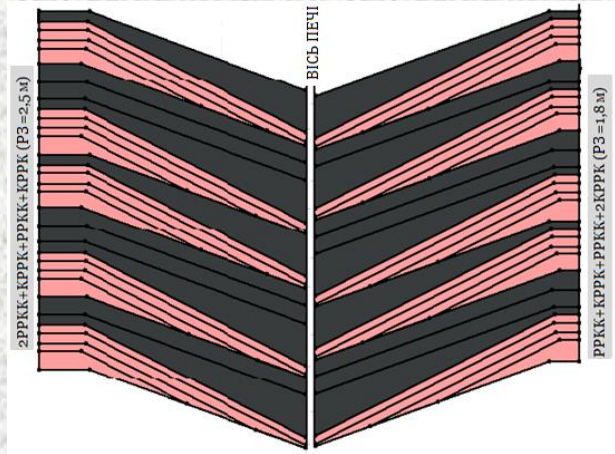
Розрахункова структура шарів шихтових матеріалів, розподіл рудних навантажень, компонентів шихти по радіусу печі і матриці завантаження для двох раціональних режимів ДП з БЗП (без ПВП і з ПВП)



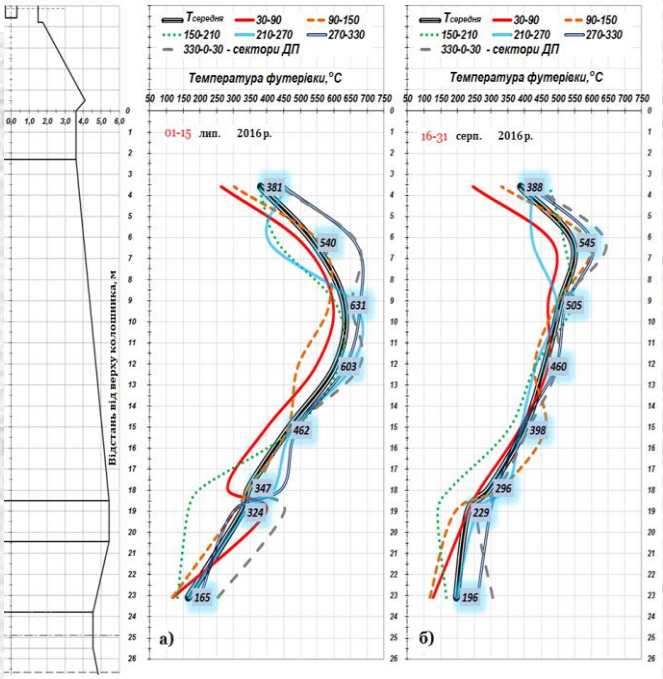


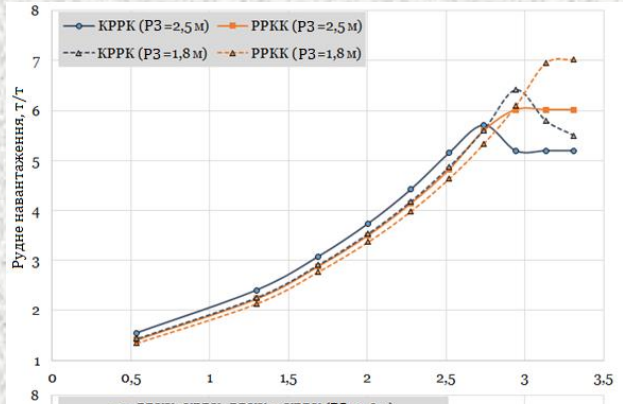


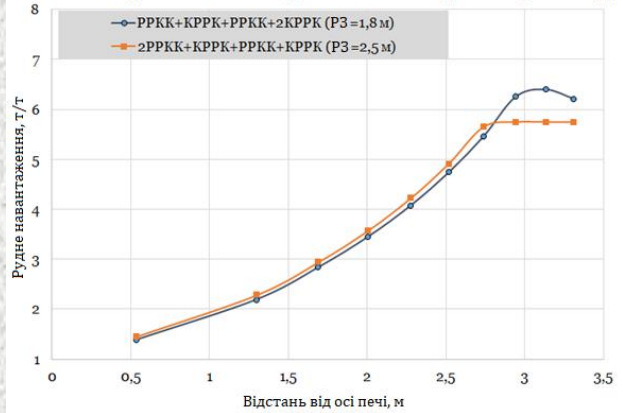
Структури шарів шихтових матеріалів для систем завантаження ДП з КЗП. Розподіл рудних навантажень по радіусу ДП з КЗП при різних системах завантаження для рівнів засипу 1,8 і 2,5 м



Зміна температури термопар футерівки шахти, розпару та заплечиків ДП з БЗП до (а) та після (б) реалізації рекомендацій щодо завантаження







без ПВП

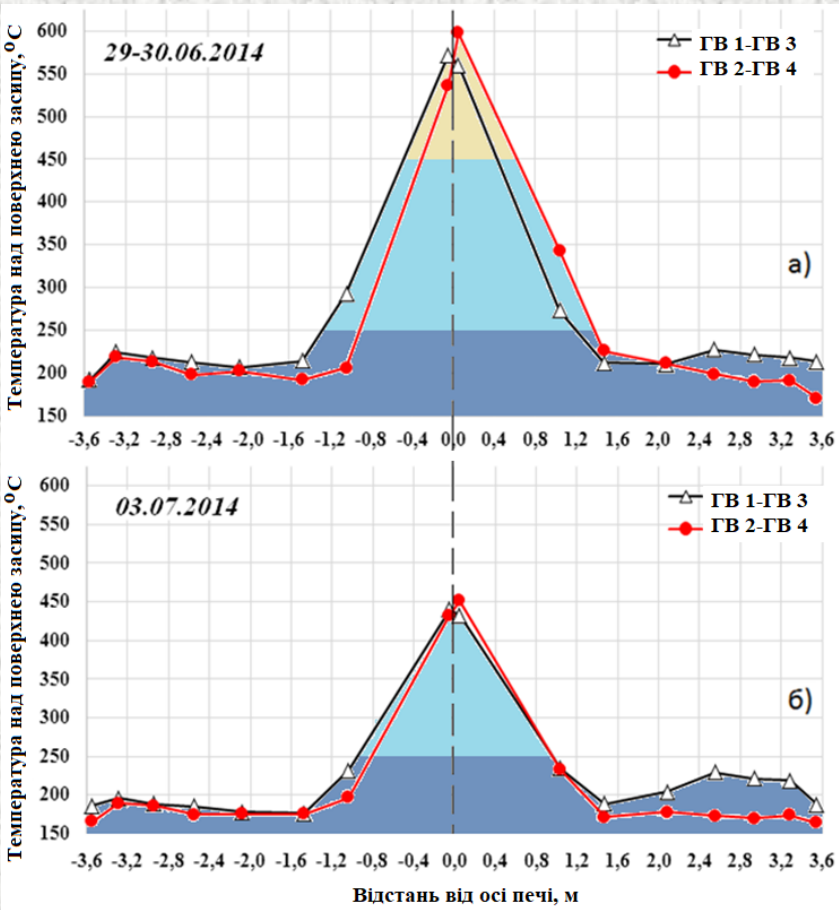
Кутові полож. лотка	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р
R10				28						28		
R9				25	8	10				25	8	10
R8			13	20	17	28		26	13	20	17	28
R7		25	17	15	22	23		22	17	15	22	23
R6		30	17	12	20	23		17	17	12	20	23
R5	10	17	20		14	16	10	17	20		14	16
R4	10	14	14		19		10	18	14		19	
R3	10	14	19				10		19			
R2	20						20					
R1	50						50					

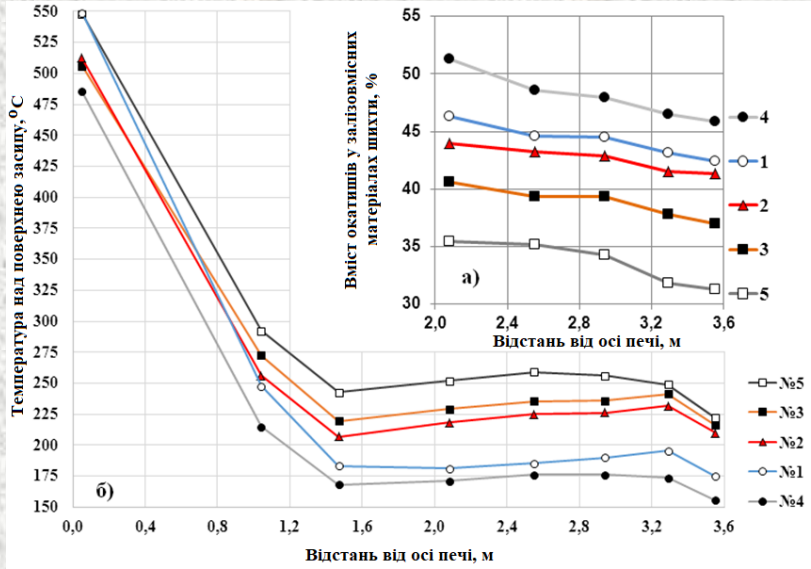
з ПВП

Кутові полож. лотка	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р
R10				34						34		
R9				17		12		15		17		12
R8		13		14	23	25		22		14	23	25
R7		22	25	12	28	23	30	18	25	12	28	23
R6		26	25	12	26	17	15	15	25	12	26	17
R5		15	28	11	23	13	10	15	28	11	23	13
R4	10	12	22			10	10	15	22			10
R3	15	12					10					
R2	15						25					
R1	60											

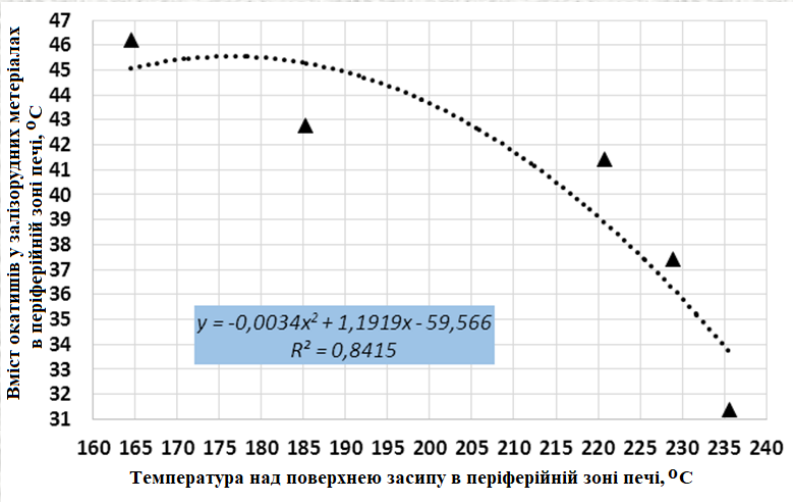
Розробка методів контролю та управління розподілом шихтових матеріалів у доменній печі з використанням інформації про зміну температур газового потоку над поверхнею засипу

Розподіл температури над поверхнею засипу шихти за двома вимірюваними діаметрами для періодів роботи ДП з БЗП з мінімальною (а) і максимальною (б) витратою палива





Розподіл вмісту окатишів в залізорудній суміші в кільцевих зонах радіусу колошника (а) і приведених до одного радіусу температур над поверхнею засипу шихти (б) для п'яти періодів роботи ДП з БЗП

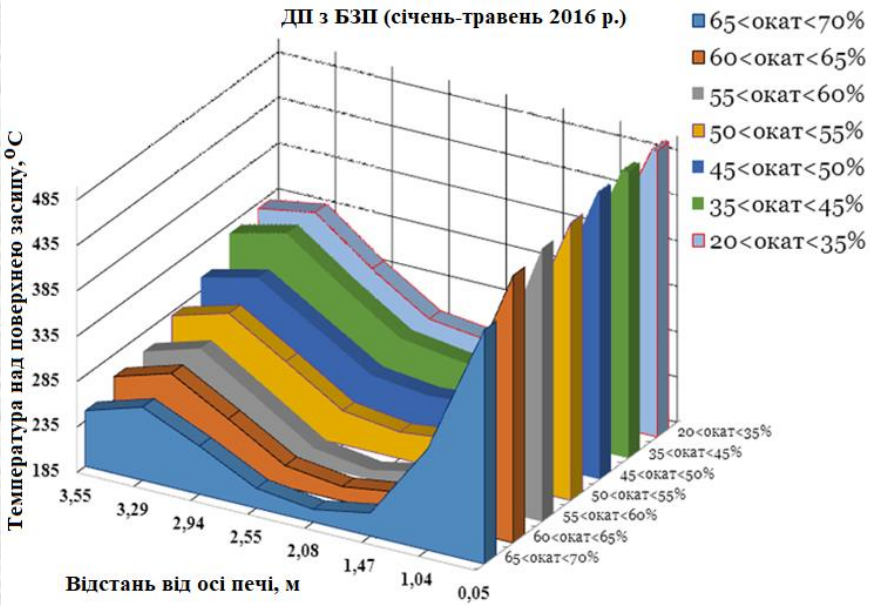


Зв'язок вмісту окатишів у залізовмісних матеріалах і температури над поверхнею засипу шихти в периферійній зоні печі

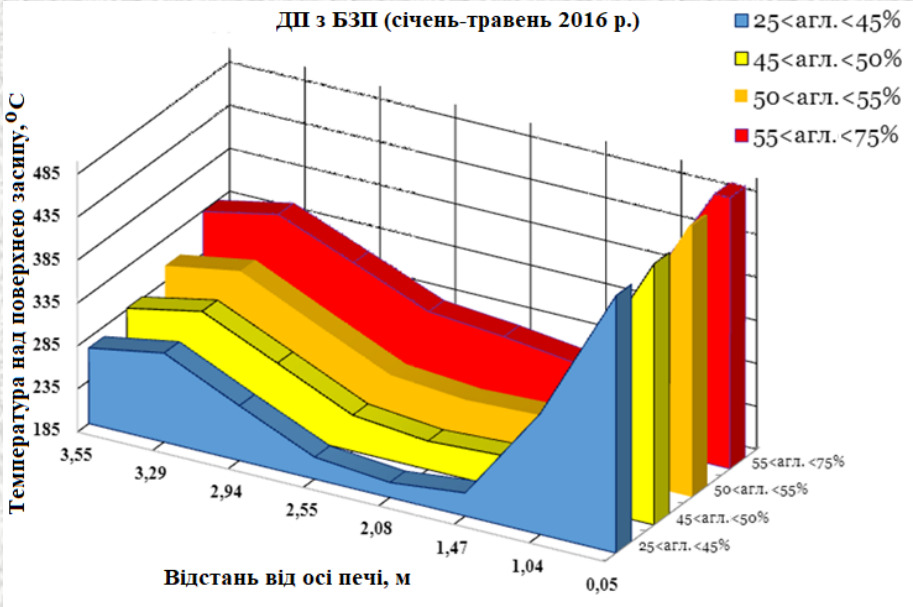
Встановлено особливості зміни температури над поверхнею засипу шихти в залежності від витрати палива та вмісту окатишів в пристінній зоні, що відкриває можливість подальшого використання інформації термозондів для оперативного управління газовим потоком. Інформація, що отримується від стаціонарних термозондів, дозволяє контролювати вміст окатишів в периферійній зоні печі, що вкрай важливо при формуванні захисного гарнісажу в печі

Розробка методів контролю та управління розподілом шихтових матеріалів у доменній печі з використанням інформації про зміну температур газового потоку над поверхнею засипу

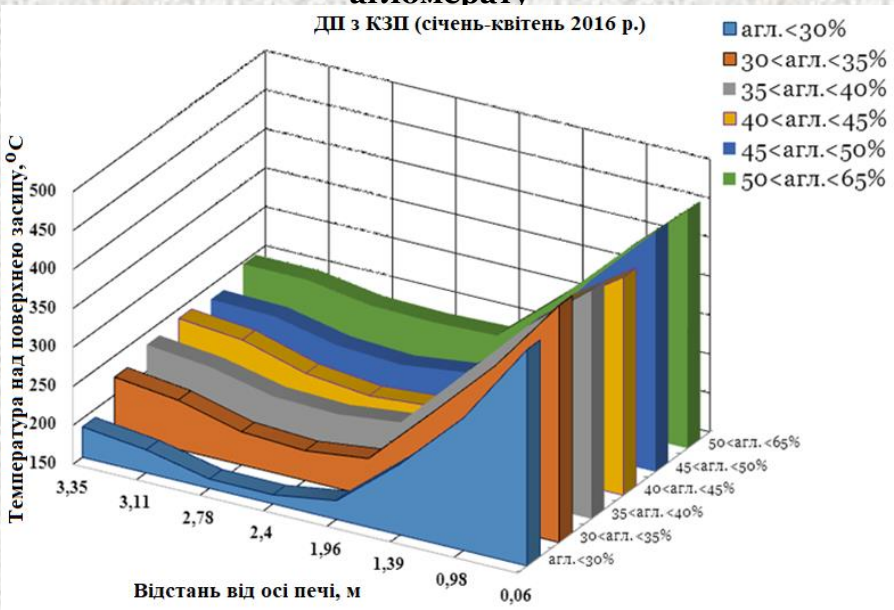
Розподіл температур газового потоку над поверхнею засипу ДП з БЗП при різній частці в шихті окатишів



Розподіл температур газового потоку над поверхнею засипу ДП з БЗП при різній частці в шихті гарячого агломерату



Розподіл температур газового потоку над поверхнею засипу ДП з КЗП при різній частці в шихті гарячого агломерату



В результаті виконаних досліджень встановлено відсутність впливу на характер розподілу температур газового потоку над поверхнею засипу по радіусу печі температури шихти, що завантажується в піч, як в цілому, так і в окремих зонах перерізу печі по радіусу, температури газового потоку збільшуються пропорційно збільшенню кількості гарячого агломерату в складі шихти. Отримані результати дозволяють використовувати інформацію термозондів для управління завантаженням при різному компонентному складі шихтових матеріалів

Розробка методів контролю та управління розподілом шихтових матеріалів у доменній печі з використанням інформації про зміну температур газового потоку над поверхнею засипу

Вимоги до розподілу газового потоку при регулюванні розподілом шихтових матеріалів по радіусу печі при вдуванні в горн ПВП для досягнення високих техніко-економічних показників плавки, в характерних умовах роботи ДП:

1. Забезпечити достатню газопроникність периферійної зони, не допускаючи зайвого «підвантаження» її залізорудними матеріалами, яке може призводити до «верхніх підвисань» та нерівного сходження шихти (відношення середньої температури газів за двома пристінковими точками термозондів до середньої температури по радіусу має бути в діапазоні 0,85–0,95 од.).
2. Забезпечити розвинений центральний газорозподіл (температура газів над поверхнею засипу шихти в центрі печі повинна в 1,60–2,15 рази перевищувати середню температуру).
3. Забезпечити розвиток взаємного перетікання газів між периферією та центром (відношення середньої температури газів проміжної зони до середньої температури по радіусу має бути в діапазоні 0,74–0,87 од.).
4. При розвиненому центральному газорозподілі для підвищення економічності плавки необхідно забезпечити вузьку осьову коксову віддушину (температура газів над поверхнею шихти на відстані 1,0 м від осі печі повинна бути менше температури осьової зони, в середньому, в 1,60–2,10 рази).

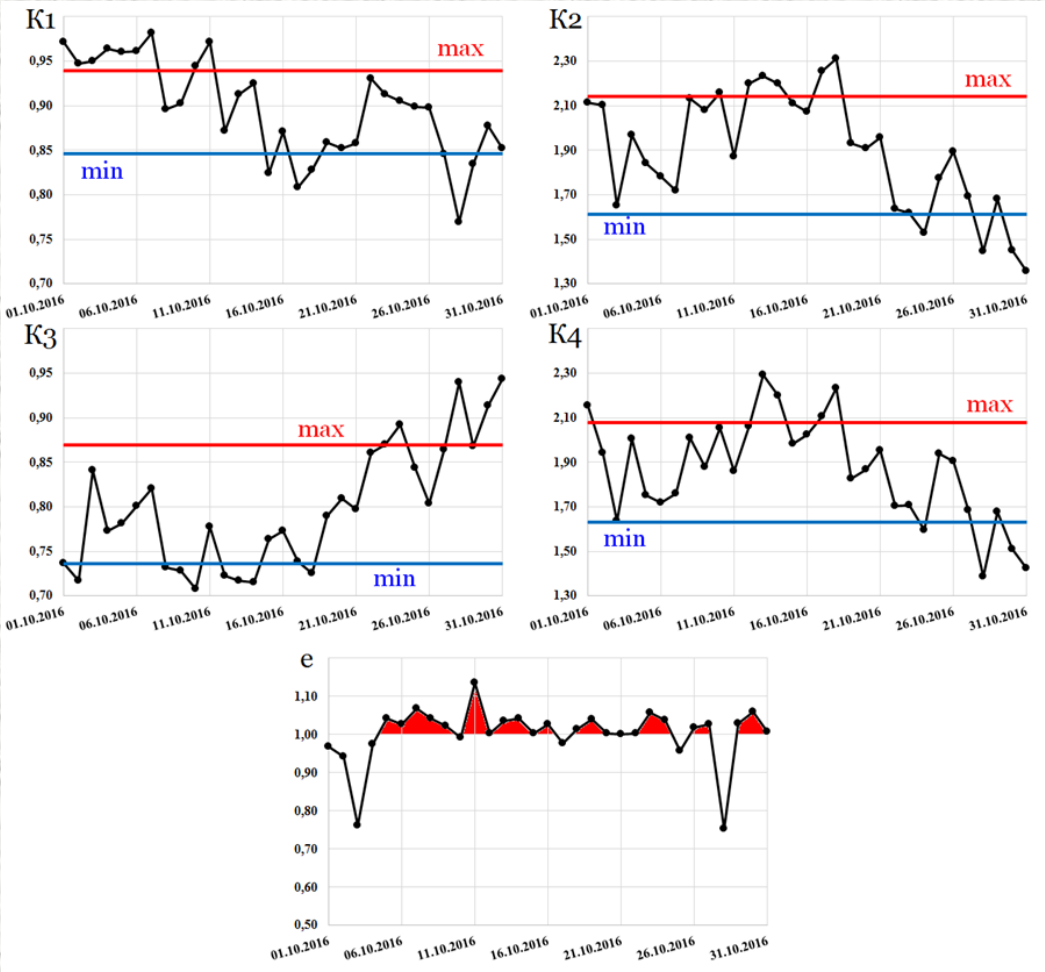
Показник ефективності плавки (е):

$$e = П_{від}/Т_{від},$$

де $П_{від}$ – добове виробництво ДП відносно середнього в аналізованому періоді, $Т_{від}$ – витрата приведеного палива (витрата коксу + 0,9 витрата коксового горіха + 0,95 витрата ПВП + 0,9 витрата ПГ) відносно середнього його значення в аналізованому періоді

Показники розподілу температур газового потоку:

$$К_1 = Т_{ПФ}/Т_{СЕР},$$
$$К_2 = Т_{Ц}/Т_{СЕР},$$
$$К_3 = Т_{ПР}/Т_{СЕР},$$
$$К_4 = Т_{Ц}/Т_{Прос}$$



Зміна середньодобових значень показників розподілу газового потоку $К_{1...4}$ і показника (е) в жовтні 2016 р.

Експертний модуль з управління завантаженням доменної печі

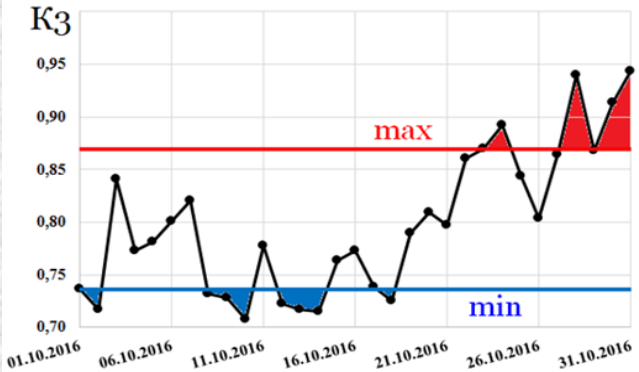
Експертний модуль включає розрахунок і відображення у вигляді графіків показників розподілу газового потоку і видачу рекомендацій щодо коригування режиму завантаження в режимі реального часу.

Показники характеризують чотири основні характеристики температури газового потоку над поверхнею шихти:
- розвиток периферійного газового потоку (К1);
- розвиток осьового газового потоку (К2);
- газопроникність проміжної зони (К3);
- ширину осьової коксової віддушини (К4).

Стійкий вихід показника за оптимальний діапазон

Коригування матриці завантаження

№ порції →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кутові полож. лотка	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р
R11												
R10				34						34		
R9				17		10				17		10
R8			13	14	23	28		26	13	14	23	28
R7		25	17	12	28	23		22	17	12	28	23
R6		30	17	12	26	23		17	17	12	26	23
R5	10	17	20	11	23	16	10	17	20	11	23	16
R4	10	14	14				10	18	14			
R3	10	14	19				10		19			
R2	20						20					
R1	50						50					

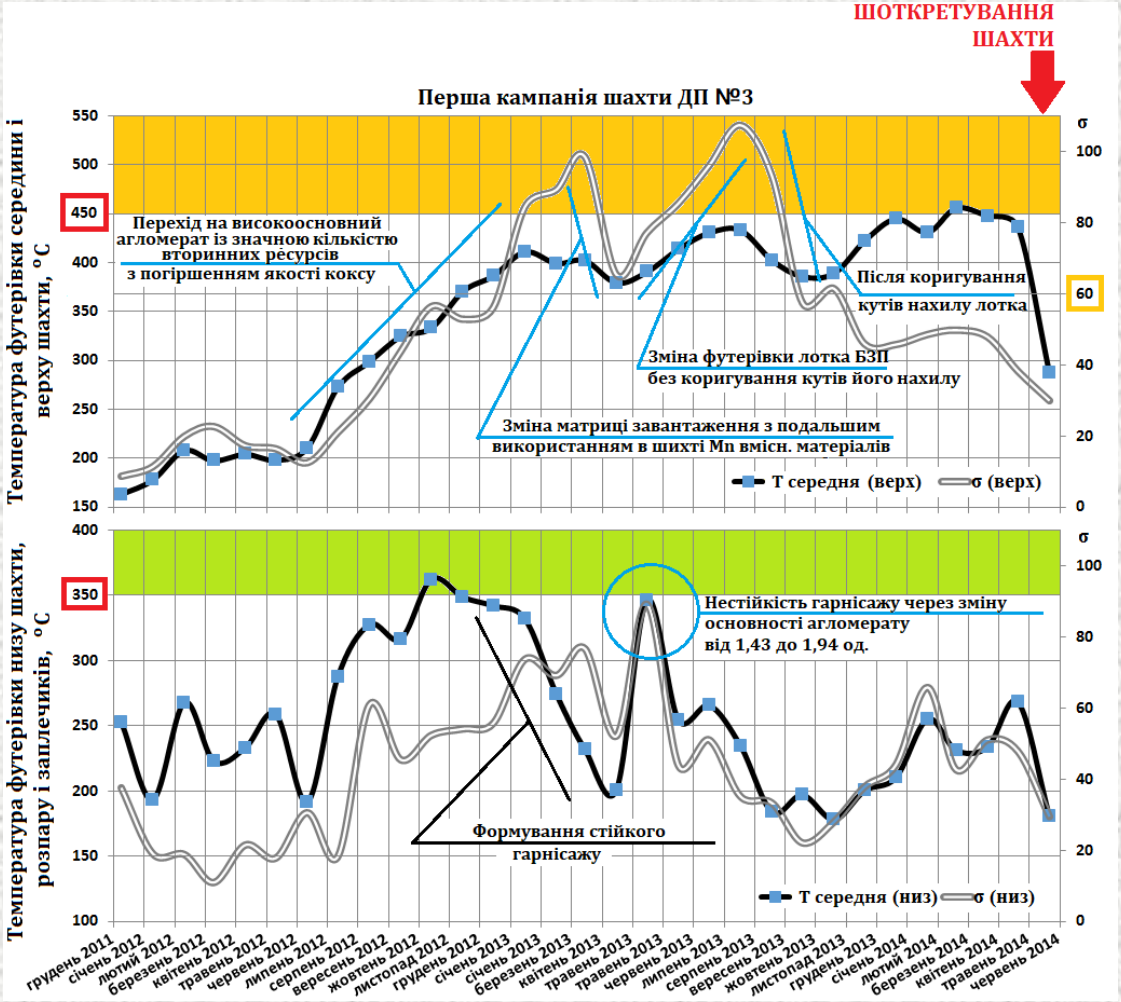


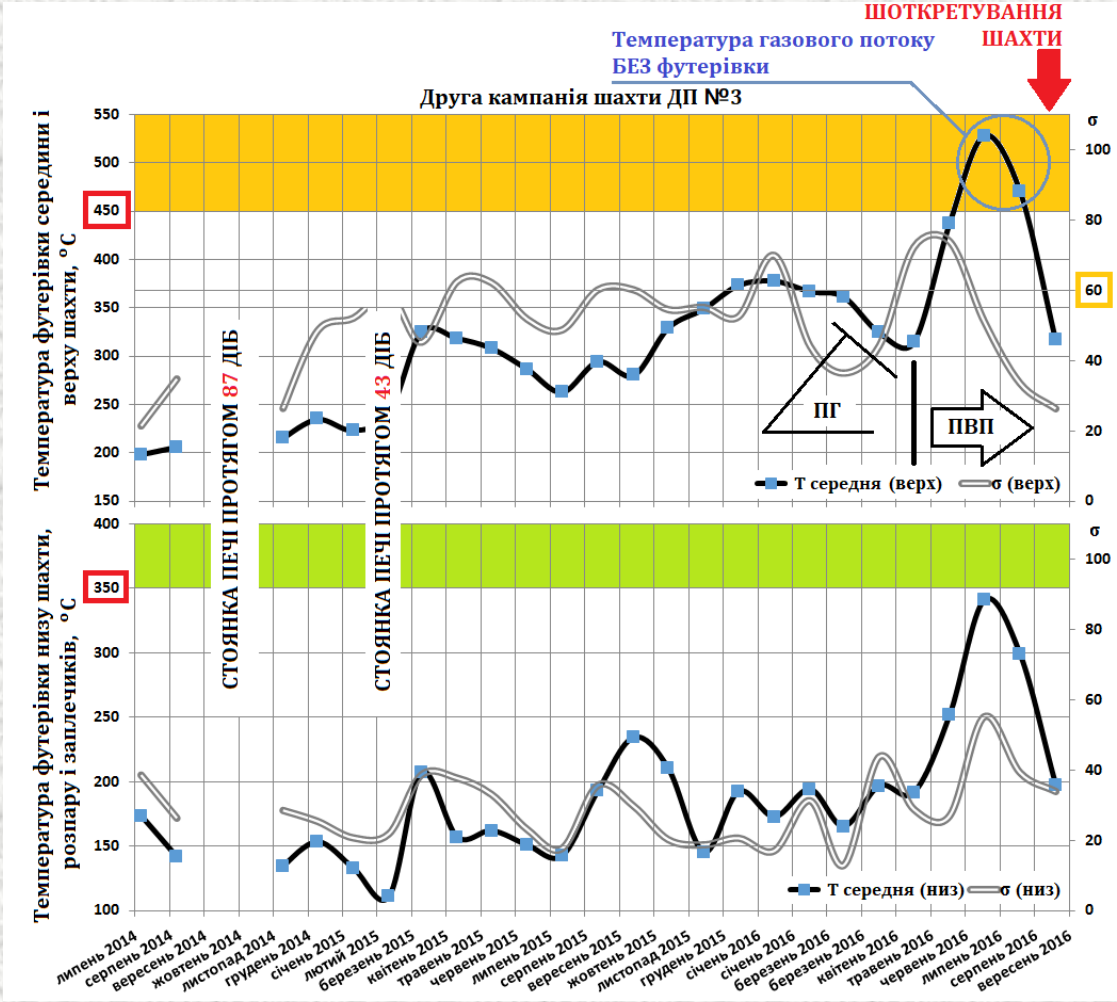
Стійкий вихід показника за оптимальний діапазон

Коригування матриці завантаження

№ порції →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кутові полож. лотка	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р
R11												
R10				28						28		
R9				25	8	12		15		25	8	12
R8		13	13	20	17	25		22	13	20	17	25
R7		22	17	15	22	23	30	18	17	15	22	23
R6		26	17	12	20	17	15	15	17	12	20	17
R5	10	15	20		14	13	10	15	20		14	13
R4	10	12	14		19	10	10	15	14		19	10
R3	10	12	19				10		19			
R2	20						25					
R1	50											

Дослідження зміни температур футерівки шахти, розпару і заплечиків доменної печі протягом 5 років її експлуатації

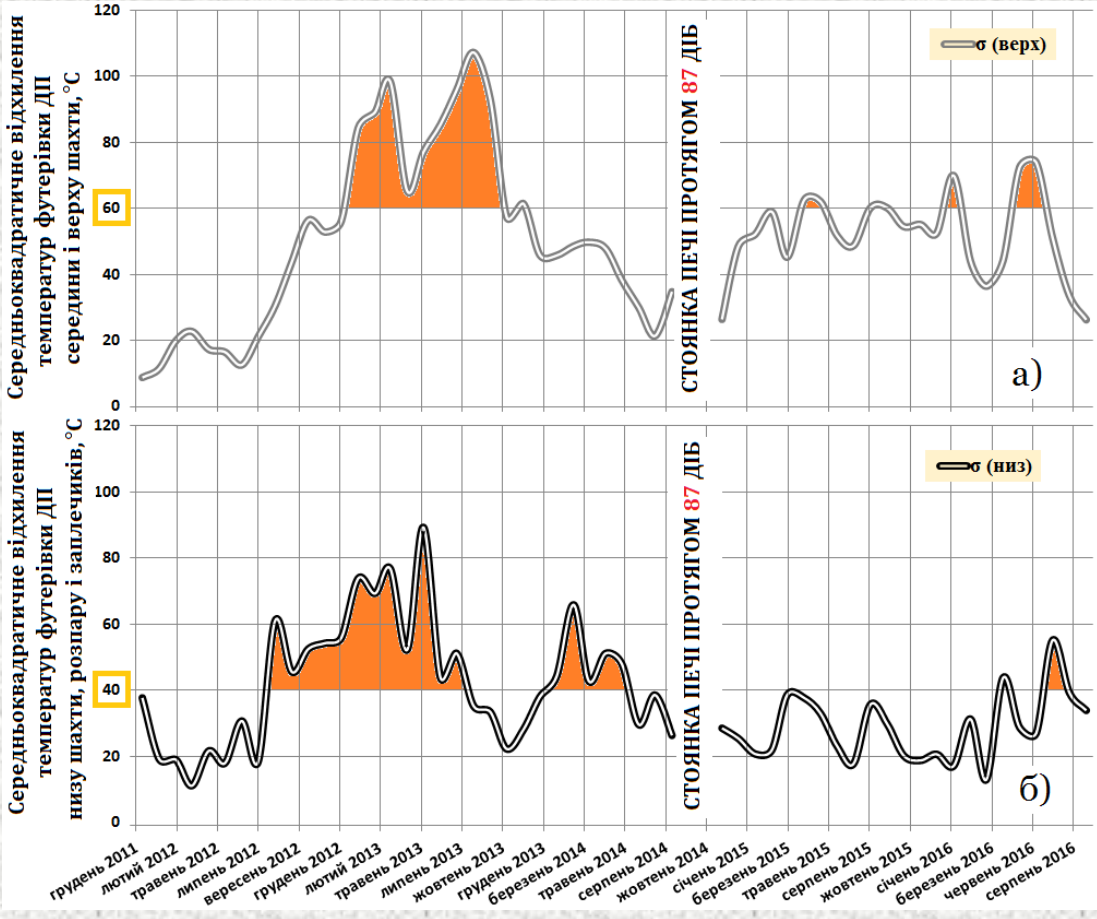




Визначено граничні значення середньомісячних температур, які свідчать про частковий (~50%) або повний знос футерівки шахти, а також граничні значення температур нижньої зони печі, які характеризують наявність стійкого гарнісажу. Встановлено, що середньомісячна температура футерівки середини і верху шахти – **375–400** °С свідчить про її знос на ~50% (підтверджено геодезичними вимірюваннями двічі – в середині 2013 р., та на початку 2016 р.), потім руйнування футерівки сповільнюється При перевищенні середньомісячною температурою значення **450** °С, як показали дві кампанії ДП, футерівка середини і верху шахти повністю відсутня. При середньомісячній температурі футерівки низу шахти, розпару та заплечиків – **300** °С має місце утворення в нижній зоні печі нестійкого гарнісажу, що вимагає прийняття рішень щодо коригування складу і режиму формування порцій шихти. Перевищення температурою футерівки нижньої зони значення **350** °С свідчать про повну відсутність захисного гарнісажу та (або) футерівки.

Дослідження зміни температур футерівки шахти, розпару і заплечиків доменної печі протягом 5 років її експлуатації

Зміна середньомісячних значень середньоквадратичних відхилень температур футерівки ДП середини і верху шахти (а), низу шахти, розпару і заплечиків (б)



Виконано аналіз динаміки зміни температур футерівки заплечиків, розпару і шахти ДП за п'ять років її експлуатації - з грудня 2011 р. по вересень 2016 р. В результаті аналізу виявлені технологічні чинники, що впливають на середньомісячні значення температури футерівки доменної печі.

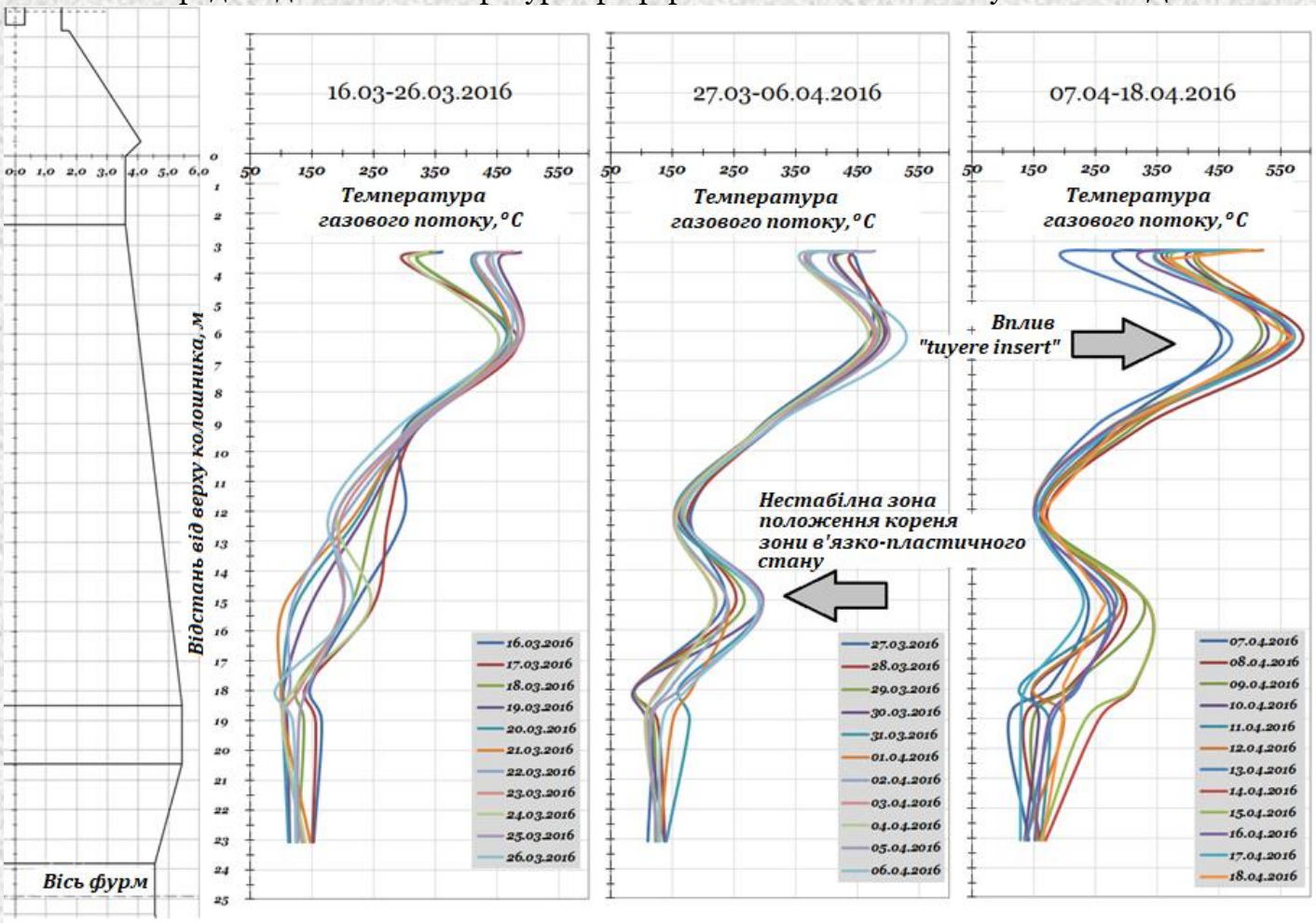
На температури футерівки верхньої зони в більшій мірі впливає знос футерівки, на температури нижньої зони - формування стійкого гарнісажу.

Встановлено фактори, що впливають на зміну середньоквадратичних відхилень температур футерівки по окружності печі:

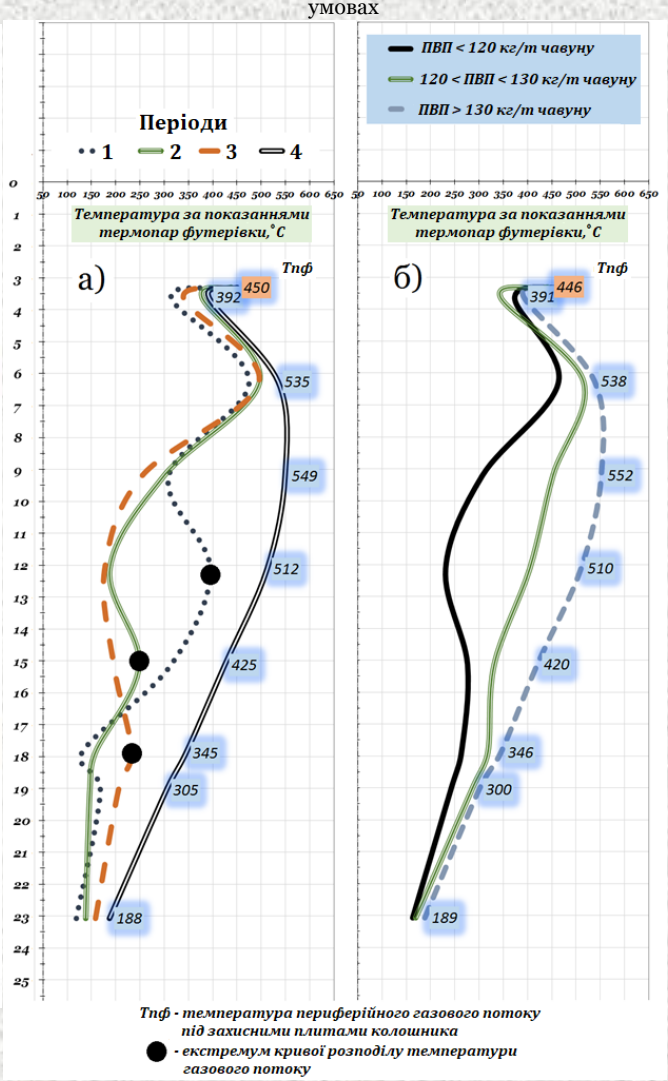
- якість залізовмісних матеріалів і коксу;
- програма завантаження печі і режим формування порцій;
- захаращення горна і використання промивних матеріалів;
- параметри дуттєвого режиму і використання паливних добавок;
- знос футерівки

Дослідження особливостей розподілу температур периферійного газового потоку в доменній печі при роботі в різних газодинамічних і паливних умовах при відсутності футерівки шахти

Зміна середньодобових температур периферійного газового потоку по висоті ДП



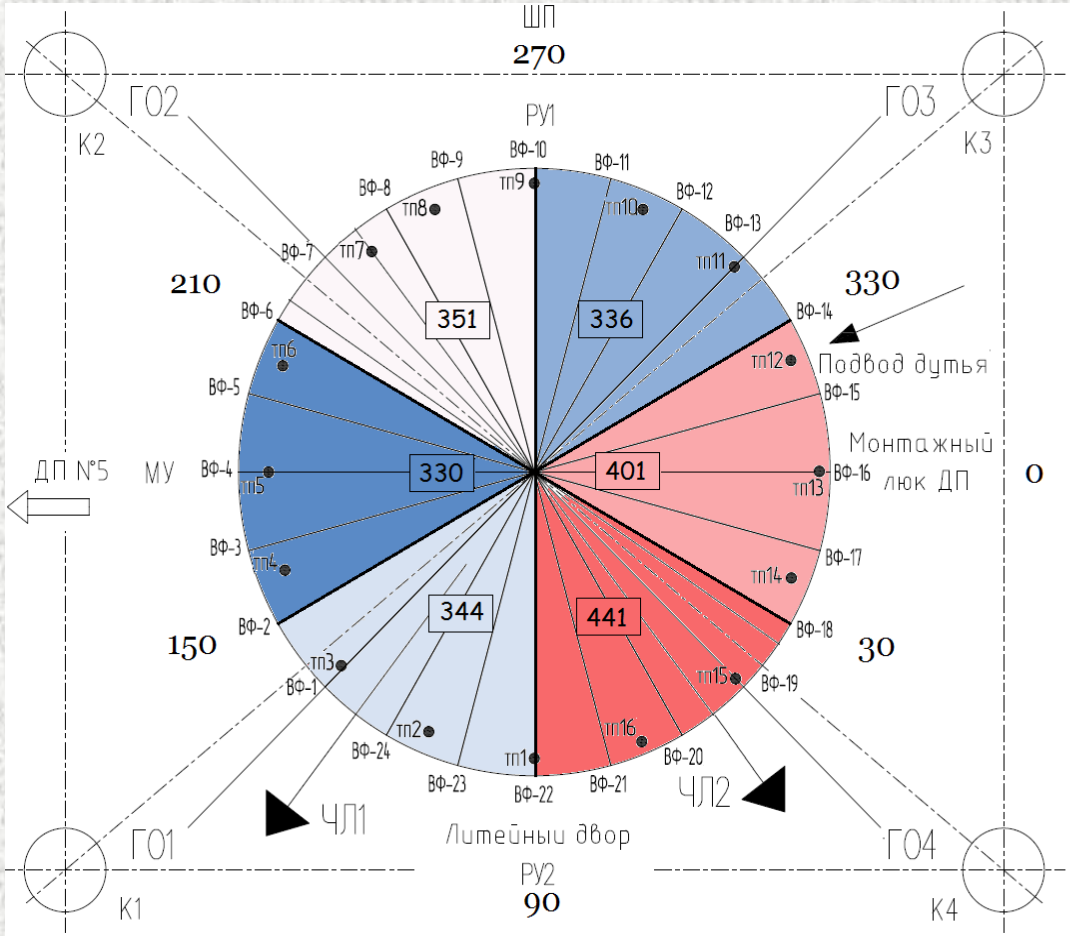
Розподіл температури газового потоку в периферійній зоні по висоті ДП при різних газо-дуттьових і паливних умовах

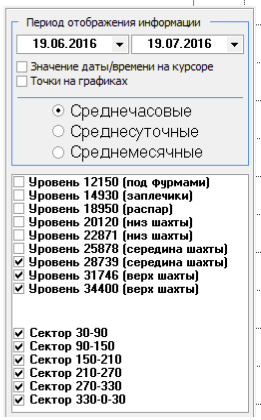


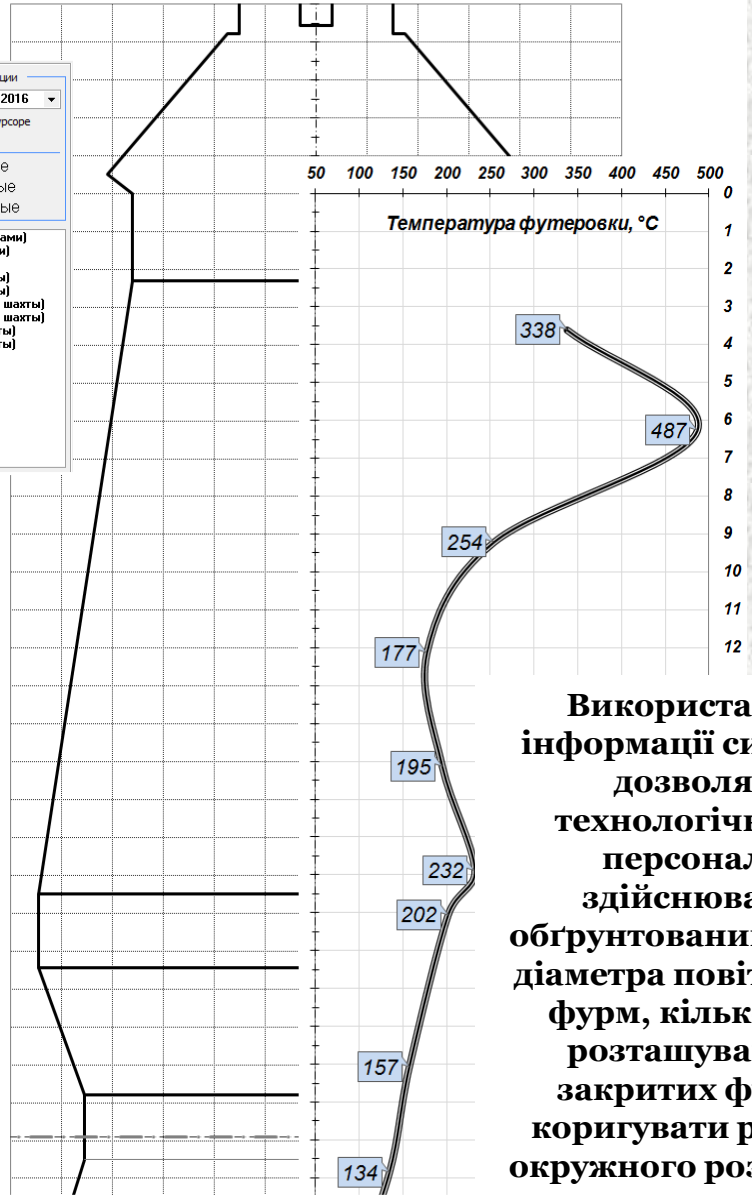
1. Виконано аналіз зміни температур, що реєструються термопарами футерівки шахти в періодах роботи доменної печі при практично повному зносі футерівки. Дана температура була ідентифікована як температура периферійного газового потоку і аналіз її зміни було виконано при роботі доменної печі в різних газодинамічних і паливних умовах: на «безгазовій шихті» при зволоженому дутті, з природним газом, з природним газом і пиловугільним паливом, з пиловугільним паливом.

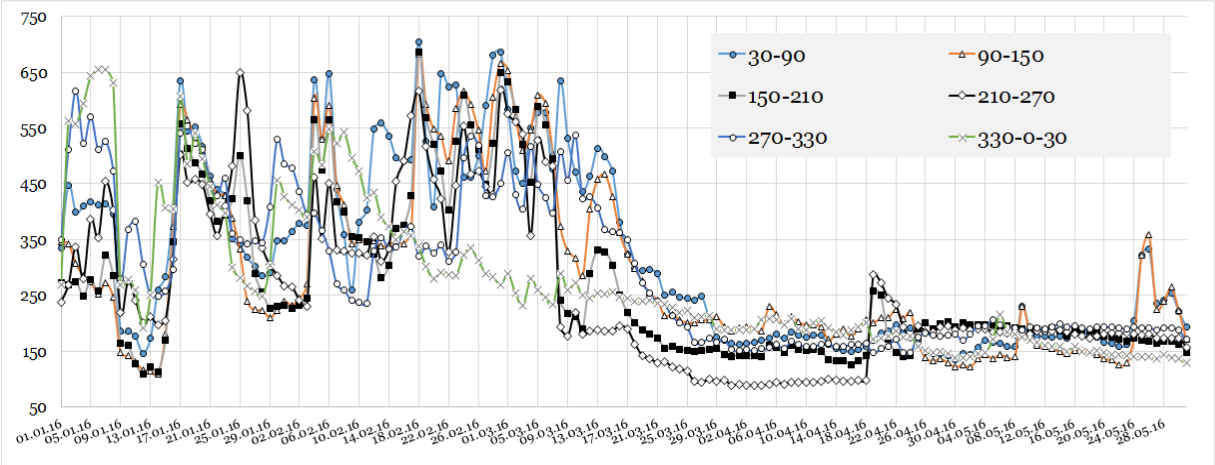
2. У досліджуваних різних газодинамічних і паливних умовах визначено екстремум кривої зміни температури периферійного газового потоку в нижній частині доменної печі, який прийнятий за положення кореня зони в'язко-пластичного стану. Результати, отримані раніше німецькими дослідниками свідчать на користь цієї гіпотези.

Система моніторингу теплового стану шахти по висоті і окружності доменної печі







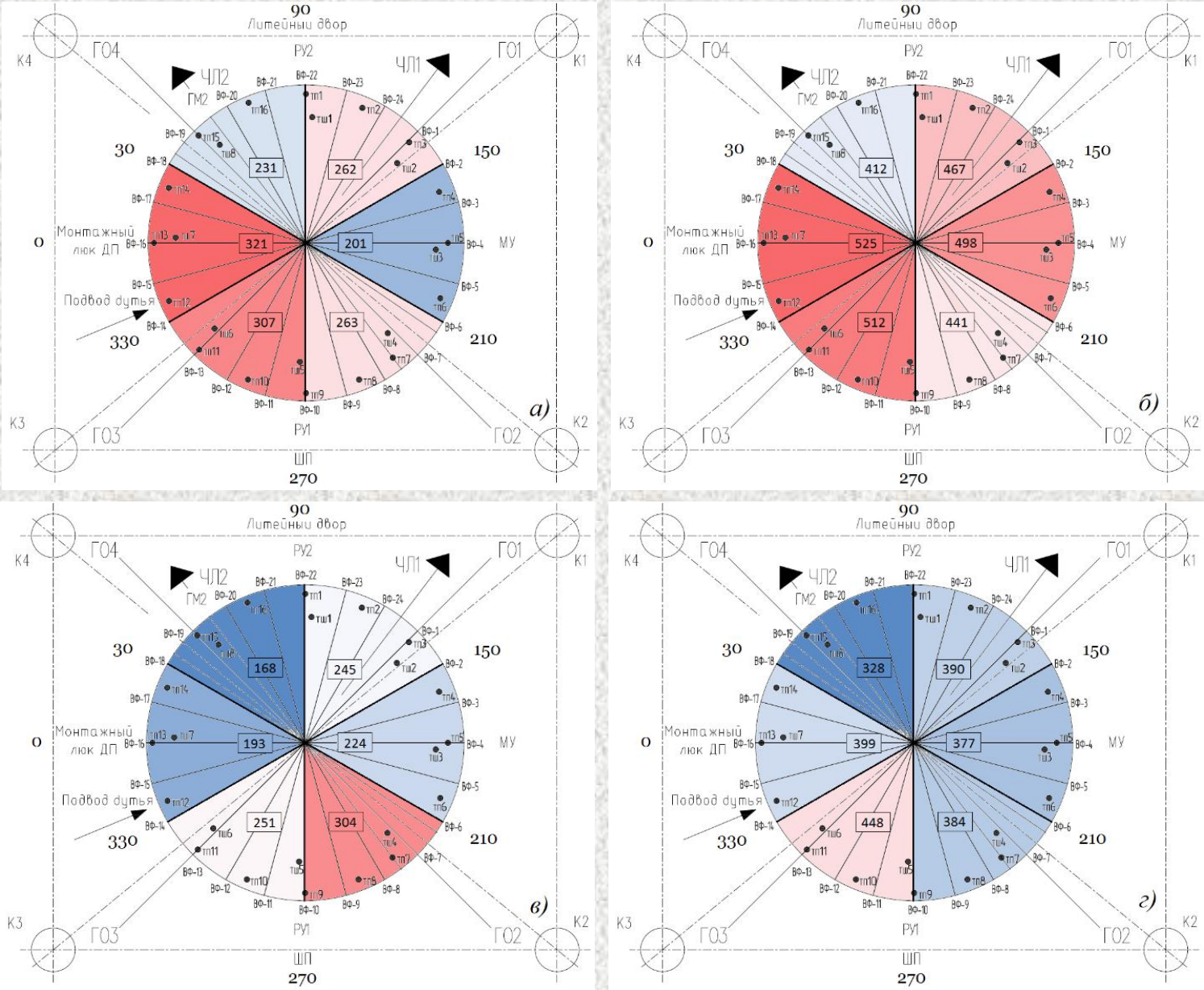


Використання інформації системи дозволяє технологічному персоналу здійснювати обґрунтований вибір діаметра повітряних фурм, кількості і розташування закритих фурм, коригувати режим окружного розподілу шихтових матеріалів, а також контролювати стан кореня зони в'язко-пластичного стану

Метод управління розподілом газового потоку по окружності печі з використанням інформації системи моніторингу

Розподіл температур футерівки низу шахти, розпару і заплечиків 19-30.08.2016 (а) та 31.08-12.09.2016 (в)

Розподіл температур футерівки середини і верху шахти 19-30.08.2016 (б) та 31.08-12.09.2016 (г)

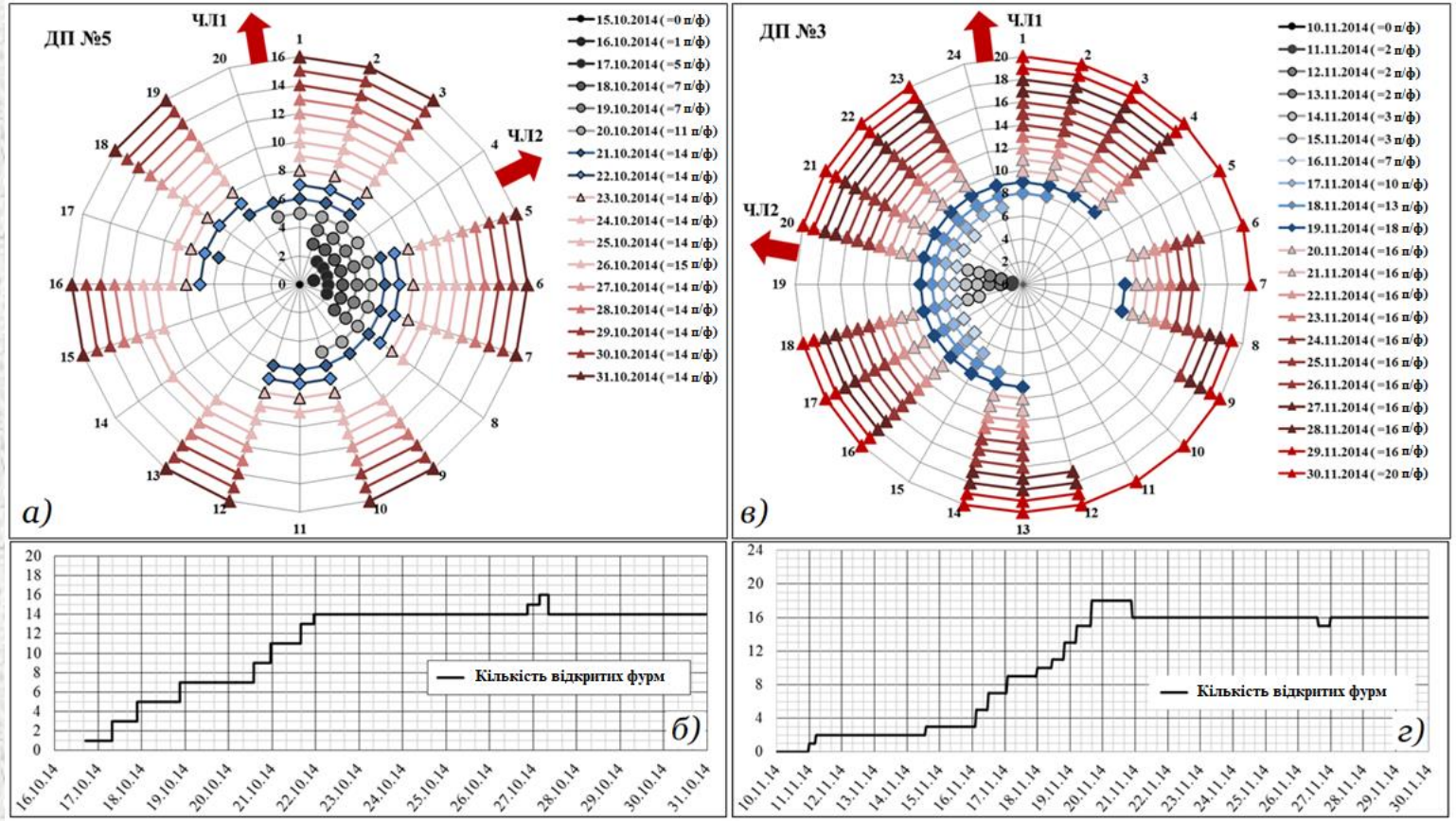


Фрагменти відеокадру системи моніторингу теплового стану шахти по висоті і окружності ДП до (*а, б*) і після (*в, г*) зміни розташування закритих повітряних фурм

В дослідних періодах роботи ДП, при використанні методу, в результаті зміни розташування закритих фурм зменшилися як окружна нерівномірність температур футерівки, так і середні значення температур. Середня температура футерівки низу шахти, розпару та заплечиків зменшилася на 33 °С – від 264 до 231 °С, а температура футерівки середини і верху шахти зменшилася на 88 °С – від 476 до 388 °С, що обумовлено перерозподілом інтенсивності газового потоку. Крім того, в результаті використання запропонованого методу перерозподіл газового потоку сприяв зменшенню питомої витрати коксу на 1,7% при практично незмінних витратах ПВП і коксового горіха, температури дуття, а також якісних та кількісних характеристик залізорудної сировини та косу

Розвиток способів задувки доменної печі після тривалої зупинки

Схема розташування (*а* і *в*) та динаміка відкриття повітряних фурм (*б* і *г*) по окружності ДП в період задувки і роздувки ДП №5 (*а* і *б*) та ДП №3 (*в* і *г*)



Заходи, виконані перед і в процесі задувок доменних печей після тривалої стоянки сприяли виведенню печей на задані планово-економічні показники, забезпечили при цьому збереження вогнетривкої футерівки, конструкцій і обладнання. На підставі наведених основних положень задувок з урахуванням підготовчих заходів і технологічних особливостей розроблено регламент задувок доменних печей після тривалих зупинок без попереднього випуску «козлового» чавуну, які внесені доповненням в технологічну інструкцію по доменному виробництву

Розроблено основні технологічні вимоги до задувки доменної печі після її тривалої зупинки. На підставі позитивного досвіду такої задувки після тривалої, понад нормативної, стоянки без випуску «козлового» чавуну, сформульовані наступні основні вимоги до задувки:

– зменшене, в порівнянні з традиційним, рудне навантаження на об'єм задувочної шихти (~ 0,10–0,15 т/т);
– використання в шихті першого об'єму і перших робочих шихт легкоплавких матеріалів невисокої основності (наприклад, доменний шлак 50–100%, плавиковий шпат в перших шихтах), в тому числі, передбачити можливість подачі легкоплавких матеріалів через повітряні фурми;
– секторна задувка з боку розташування чавунної льотки на малій кількості повітряних фурм (на початку задувки 1–2 фурми), забезпечення до початку задувки впевненого прогріву по висоті льотка-повітряна фурма, шляхом установлення в чавунну льотку труб, через які подається природний газ і повітря для його горіння, забезпечення швидкості потоку дуття на виході з повітряної фурми не менше 150 м/с;
– низька інтенсивність нарощування газодуттєвих параметрів на начальному етапі задувки (витрата 1 м³ дуття/м³ об'єму на 5–7 добу та нарощування 1,6–1,8 м³ дуття/м³ об'єму через 10–15 діб);
– низька інтенсивність відкриття повітряних фурм в одному секторі (по 1–2 фурми на добу до досягнення 50% відкритих фурм через 7–10 днів) та перехід до секторного окружного відкриття фурм до кількості 75%, тривалістю 3–5 діб при забезпеченні нарощування кількості проплавляємої шихти і газодинамічних параметрів дуття;
– зменшене, в порівнянні з прийнятим, рудне навантаження перших робочих шихт при пониженому вмісті заліза в шихті (1,0–1,5–2,0 т/т, що забезпечує утримання [Si] в чавуні ~ 5,0% в перші три доби, перехід на ливарний чавун в наступні 2–4 доби).