

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ ім. З.І. НЕКРАСОВА

О.Л. ЧАЙКА, Б.В. КОРНІЛОВ, Є.І. ШУМЕЛЬЧИК,
О.Є. МЕРКУЛОВ, В.І. НАБОКА, А.О. МОСКАЛИНА

**МЕТОДИ І МОДЕЛІ КОНТРОЛЮ Й
ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ОГОРОДЖЕННЯ
ПЕРИФЕРІЙНОЇ ЗОНИ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ**

Дніпро
ВІЗІОН
2026

УДК 669.162.21.008.6

Ч-15

doi: 10.52150/978-617-8656-06-5.30042026

*Друкується за рішенням вченої ради Інституту чорної металургії
ім. З. І. Некрасова НАН України від 04.03.2026 р. протокол №2*

Рецензенти:

О. М. Смірнов – доктор технічних наук, професор, завідувач відділом Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України;

Л. П. Грес – доктор технічних наук, професор ННІ “Дніпровський металургійний інститут” Українського державного університету науки і технологій.

Ч-15 Чайка О.Л., Корнілов Б.В., Шумельчик Є.І., Меркулов О.Є., Набока В.І., Москалина А.О. Методи і моделі контролю й діагностики стану огороження периферійної зони доменної печі: Монографія, Дніпро: ВІЗІОН, 2026. 129 с.

У монографії викладено результати розробки методів і моделей контролю та діагностики стану огороження доменної печі, які відкривають нові можливості для аналітичних досліджень закономірностей тепло- та масообміну в периферійній зоні доменних печей. Отримані наукові положення можуть бути ефективно використані під час проєктування та реконструкції доменних печей, управління їх тепловим режимом, технічної експертизи стану футерівки, а також при вдосконаленні конструкцій і режимів роботи систем охолодження.

У роботі представлено результати практичної реалізації запропонованих моделей у доменному виробництві чавуну та наведено кількісну оцінку ресурсу і енергоефективності роботи доменних печей. Це дало змогу здійснити комплексний аналіз як відомих, так і нових технологічних режимів, технічних рішень і технологій на основі взаємопов’язаної оцінки фактичних і прогнозних параметрів процесу плавки.

На основі отриманих результатів сформульовано напрями конструювання та модернізації профілю доменних печей і систем їх охолодження, спрямовані на підвищення ресурсу роботи агрегатів і покращення техніко-економічних показників доменної плавки.

Книга призначена для наукових та інженерно-технічних працівників металургійної промисловості, а також для викладачів, аспірантів і студентів металургійних спеціальностей.

УДК 669.162.21.008.6

ISBN 978-617-8656-06-5

Якщо Ви в змозі виміряти і висловити те, про що Ви говорите, у числах, то Ви дещо про це знаєте, але якщо ви не можете виміряти це і висловити в числах, Ваші знання мізерні та незадовільні.

Вільям Томсон

ВСТУП

Доменні печі відносяться до найбільш енергоємних та теплонапружених агрегатів металургійного циклу. Забезпечення стабільної, надійної та безперебійної роботи доменної печі з необхідною продуктивністю заданої якості при обмеженнях на витрату енергетичних і сировинних ресурсів є важливою задачею. Для вирішення цієї задачі, зокрема, необхідно достовірно прогнозувати роботу доменної печі з використанням інформації про її технічний стан і процесах, що протікають в ній. Труднощі в проведенні експериментальних досліджень, для отримання інформації про роботу доменної печі, зумовили розвиток методів математичного моделювання доменного виробництва.

Сучасна технологія доменної плавки є складною системою, яка включає різні заходи і міри, спрямовані на збільшення економічності, надійності та продуктивності доменних печей. Надійність плавки, в першу чергу, забезпечується безперервною і безпечною роботою системи огороження доменної печі. Контроль її технічного стану є важливим питанням, яке в наш час активно досліджується і розвивається [1, 2].

Більшою мірою, технічний стан шахти доменної печі залежить від теплової роботи її периферійної зони, термінів служби, стійкості до зношування футерівки та холодильних плит.

Розвиток та реалізація в доменному виробництві методів і математичних моделей кількісної оцінки ресурсу та енергоефективності роботи доменних печей дозволяє отримати формалізований інструмент для комплексного аналізу вивчених і нових режимів, технічних рішень та технологій на основі взаємопов'язаної оцінки фактичних і очікуваних параметрів і показників плавки.

Освоєння технології доменної плавки з пиловугільним паливом (ПВП) в Україні висунуло ряд вимог щодо конструювання доменних печей та реконструкції її системи охолодження для забезпечення економічної, безпечної та довготривалої роботи доменних печей. Використання ПВП, що призвело до збільшення навантажень на огороження доменної печі, сприяло активній реалізації математичних моделей теплової роботи печі в складі автоматизованих систем управління технологічним процесом (АСУ ТП). Це пов'язано з тим, що контроль теплових навантажень та залишкової товщини футеровки metalloприймача печі багато в чому визначає надійну і безпечну роботу доменної печі з високими технічними показниками і тривалість міжремонтного періоду її роботи. В цьому напрямку Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ веде постійні розробки [2]. Однак, як показали аналітичні та експериментальні дослідження ІЧМ НАНУ динаміки виходу з ладу холодильників, зміни теплових навантажень по висоті і периметру печі, теплових втрат в системі охолодження доменних печей ПАТ «Запоріжсталь», ПАТ «АМК», ПрАТ «ММК ім. Ілліча» та ПрАТ «МК «Азовсталь» технологія вдування ПВП надає основний вплив на ресурс роботи заплечиків, маратору та низу шахти внаслідок змін в тепловій та газодинамічній роботі при переході на технологію плавки з ПВП [3-5]. У цих умовах важливою задачею є автоматизований контроль теплового і технічного стану не тільки футерівки metalloприймача, але і футерівки шахти доменної печі.

Контроль втрат теплоти робочого простору печі вважається

третім по важливості серед засобів контролю та автоматизації доменного процесу в світі після контролю витрат залізорудної сировини, коксу і технології відпрацювання продуктів плавки [6, 7].

На систему охолодження доменної печі припадає до 95% всіх теплових втрат робочого простору печі, і до 15% витрат коксу. Процеси руйнування футерівки, утворення гарнісажу і температурно-теплові умови роботи по висоті і периметру доменної печі, як у великому калориметрі, позначаються на полі температур на поверхні кожуха і теплових втратах в системі охолодження печі. Тому теплове навантаження на охолоджувальні елементи є одним з інтегральних параметрів роботи, як доменної печі в цілому, так і окремих її периферійних зон [1, 3-5, 7-16].

Методи і моделі контролю й діагностики стану огороження периферійної зони доменної печі, розглянуті в монографії, відкривають широкі можливості для аналітичних досліджень закономірностей тепло- та масообміну в периферійній зоні доменних печей. Ці результати доцільно використовувати при проєктуванні та реконструкції доменних печей, управлінні тепловим режимом, технічній експертизі стану футерівки агрегатів, удосконаленні конструкцій та параметрів роботи систем охолодження.

Автори хочуть висловити величезну подяку та шану своїм вчителям – Бородуліну Олександру Васильовичу та Панчохі Галині Василівні, котрі стояли біля витоків розвитку методів контролю та діагностики стану огороження периферійної зони доменної печі, які в подальшому були розвинуті та наведені у монографії.

Автори монографії висловлюють велику вдячність у сприянні реалізації математичних моделей працівникам ПАТ «Запоріжсталь», ТОВ «МІХ» та ПрАТ «МК «Азовсталь», а саме Фоменко Олександру Павловичу, Сафонову Сергію Євгеновичу, Болотову Михайлу Борисовичу, Ополюніну Вадиму Олександровичу, Голоядову Андрію Валентиновичу та Махову Олександру Сергійовичу.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАПРЯМІВ ПРОКТУВАННЯ ФУТЕРІВКИ І СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ І ДІАГНОСТИКИ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ СТАНУ ФУТЕРІВКИ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ

1.1 Напрями проєктування футерівки та системи охолодження доменних печей

При переході доменного виробництва України на технологію плавки з ПВП змінилися умови утворення гарнісажу, відновлювальної та теплової роботи газового потоку, якість та хімічний склад палива, що вплинуло як на технологію ведення доменної плавки, так і на її техніко-економічні показники та ресурс роботи доменних печей.

Також на даний час актуальним напрямом розвитку металургійної галузі в світі є повна або часткова відмова від агломерату та переходом на роботу з окатишами, що дозволить зменшити негативний вплив на екологію планети. Перехід на підвищену частку окатишів призведе до збільшення теплових навантажень на футерівку шахти доменної печі, що може призвести до передчасного виходу з ладу футерівки доменної печі та системи охолодження [17].

Досвід освоєння пиловугільного палива у 2009-2023 роках на доменних печах середнього об'єму ($1500\div 3000\text{ м}^3$) та ПАТ «Запоріжсталь», ПАТ «ММК ім. Ілліча», ПАТ «АМК» та ПрАТ «МК «Азовсталь», показав, що окрім організаційних факторів (якість сировини, технологія) є й технічні, які зменшують ефективність застосування технології ПВП в Україні порівняно із зарубіжною практикою. Це насамперед зменшення ресурсу роботи системи охолодження печі, збільшення виходу з ладу холодильників та фурмених приладів, і, як наслідок, збільшення простоїв та тихого ходу, зменшення виробництва, збільшення

витрати палива на тонну продукції, передчасне зупинення печі на капітальний ремонт [2-5, 8, 9, 11, 13, 15, 16, 18-25].

Результати виконаних досліджень теплової роботи та зношування шахти доменних печей України, що перейшли на технологію плавки з ПВП, вказали на необхідність перегляду технічних рішень, що приймаються при розробці системи охолодження та конструкції печей, що переходять на технологію роботи з ПВП, наприклад, як для печей Європи, Японії, Китаю [2, 3, 9, 11, 18, 19].

Зміни до конструкції профілю доменної печі, які на сьогоднішній день підтверджуються успішною практикою роботи ДП №3 ПАТ «Запоріжсталь» і ДП №3 ПрАТ «МК АЗОВСТАЛЬ», реалізовані в рамках капремонтів 1-ого розряду в 2016 р. та 2019 р. відповідно та часткові рішення, реалізовані на ДП №2 та ДП №4 ПАТ «Запоріжсталь» і ДП №4 ПрАТ «МК АЗОВСТАЛЬ», реалізовані в рамках капремонтів в 2016-2021 рр. наведено нижче.

1.1.1 Конструкція шахти, розпару та заплечиків доменної печі

Заплечики

Зменшенню теплових навантажень на заплечики, більш стабільній тепловій роботі низу печі та збільшенню рівності ходу печі при технології роботи з ПВП та підвищеною часткою окатишів сприятиме збільшення висоти заплечиків та розпару при збільшенні відношення діаметра розпару до діаметра горна та зменшення кута нахилу шахти, що дозволить покращити умови для протитечії газів, шихти та розплаву. Опір висхідному потоку газів і призведе до розпушування шару шихтових матеріалів у районі розпару та заплечиків [11, 13].

Аналіз сучасної практики показав, що кути нахилу утворює заплечиків при експлуатації печей з технологією вдування ПВП змінюються в межах $69,0 \div 78,0^\circ$, а кути, властиві для «традиційної» конструкції доменних печей не задовольняють умовам роботи з ПВП та підвищеної частки окатишів.

Встановлено, що для умов України, раціональним є кут нахилу заплечиків близько $75 \div 76^\circ$ та збільшенням їх висоти не менше $\sim 3,0$ м.

У заплечиках кожух повинен забезпечити можливість встановлення над фурменним холодильником 2 рядів вертикальних, попередньо футерованих карбідокремнієвим вогнетривом, мідних холодильників. Така конструкція сприятиме збільшенню ресурсу роботи цієї зони та футерування фурменої зони.

Розпар

У світовій практиці доменних печей, що працюють з ПВП та підвищеною часткою окатишів, розпар формується на підставі відповідного вигину кожуха під прямим кутом та кріплення до нього на всю висоту розпару холодильної плити. Висота розпару становить $1,5 - 3,5$ м.

При реалізації сучасного профілю доменної печі доцільно передбачити реалізацію розпару, шляхом встановлення в ньому вертикального мідного холодильника, футерованого карбідокремнієвим вогнетривом, висотою не менше $2,5$ метрів.

Для забезпечення стійкої газодинамічної роботи доменної печі варто забезпечити відношення діаметра розпару до діаметра горна доцільно забезпечити на рівні $1,2 - 1,25$.

Шахта

Висота та кут нахилу шахти печей повинні забезпечувати нормальні умови для сходу шихти, розвитку периферійності ходу, зносу футерування, відновлювальних процесів та теплової обробки матеріалів.

Зі збільшенням висоти заплечиків та розпару зменшується кут нахилу шахти, посилюється тенденція розвитку периферійного потоку газу, що прогресує в процесі зносу футерування та системи охолодження, що може бути однією причиною зростання теплових навантажень на холодильники печей великого об'єму [26, 27]. Досвід ІЧМ НАНУ, накопичений

при освоєнні роботи доменних печей великого та середнього обсягу, показав, що зменшити теплові навантаження на систему охолодження та продовжити кампанію доменної печі можна за рахунок формування у печі інтенсивного осьового газового потоку та раціонального дутьового режиму плавки. Ефективно реалізувати ці заходи дозволяють сучасні безконусні завантажувальні пристрої [2-5, 8, 9, 11, 13, 15, 16, 18-25].

При цьому в конструкції шахти варто позбутися «L» образних холодильних плит, які провокують спотворення профілю, обвалення футерування при зношуванні «зубів».

Нижня частина шахти обладнується 3-4 рядами вертикальних мідних холодильників, висотою ~1,8-2,0 метрів кожен, футерованих карбідокремнієвим вогнетривом. Решту конструкції шахти пропонується виконати чавунними холодильними плитами, попередньо футерованими карбідокремнієвим вогнетривом та ШПД.

Колошник

Висоту циліндричної частини колошника доцільно забезпечити не менше 2,5 метрів для можливості забезпечення стійких шарів шихтових матеріалів.

Система охолодження

Рекомендується організувати три замкнуті контури охолодження печі холодною хімічно очищеною водою.

Перший контур включає підведення води на охолодження денця, поду, чавунних льоток та горнових холодильників.

Другий контур охолодження «холодною» хімічно очищеною водою включає холодильники заплечиків, розпару та шахти.

Третій контур включає фурмові холодильники та тіло фурм (при використанні двоконтурного охолодження фурменного приладу); носки фурм при використанні двохконтурного охолодження фурменного приладу або всієї фурми при одноконтурному охолодженні приладу.

1.1.2 Напрямки в конструюванні металоприймачів

Металоприймач є зоною доменної печі, футерівка якого зазнає хімічного впливу внаслідок відновлення заліза і формування кінцевого шлаку та високих температур від розплавів, що знаходяться в ньому. Саме стан горну та поду, в значній мірі, визначає тривалість кампанії доменної печі. Тому збільшення стійкості та експлуатаційної надійності горну і поду сучасних доменних печей є актуальною задачею.

Проблеми з футерівкою і системою охолодження в доменній печі вище рівня фурм часто можуть бути вирішені різними способами під час кампанії печі, такими як зменшення інтенсивності роботи доменної печі, зміною газодуттьового режиму та режиму завантаження, переведенням на іншу систему охолодження, проведенням відновного ремонту футерівки шляхом торкретування та ін. [3-5, 11, 12, 28]. Однак проблеми з горном вимагають більш серйозних втручань.

У всьому світі питання підвищення експлуатаційної надійності горна і продовження кампанії доменних печей вирішуються за рахунок [29-33]:

- удосконалення конструкцій горна та поду доменних печей, застосуванням нових вогнетривких матеріалів, що забезпечують надійність роботи доменної печі;

- вибором надійної системи або вдосконаленням існуючої системи охолодження металоприймача;

- використання сучасних АСУ ТП, що мають в своєму складі підсистему контролю розпалу футерівки горну та поду.

Сучасний напрямок в конструюванні металоприймачів доменних печей базується в основному на наступному:

- збільшення висоти горна;
- збільшення висоти мертвого шару (глибини зумпфу);
- зменшення товщини поду;
- зменшення товщини стінок горна;

- використання для футерування горна і поду нових поколінь вогнетривких матеріалів.

Як показав досвід останніх десятиліть збільшення висоти горна, відстані від осі чавунних льоток до рівня повітряних фурм, сприятливо позначається на стійкості повітряних фурм та чавунних льоток, рівномірності відпрацювання продуктів плавки, а також полегшує зупинку печі на нетривалий час, наприклад, для заміни фурм.

Збільшення висоти горна надає можливість працювати з більш високим рівнем накопичення чавуну і ферростатичного тиску, що сприяє збільшенню радіуса дії льотки. Підвищення рівня повітряних фурм щодо осі чавунних льоток також позитивно позначається на стійкості дуттьового режиму, так як зменшує вірогідність деформації фурмених вогнищ при накопиченні чавуну і шлаку у горні. При цьому створюються умови для роботи з більшою швидкістю витікання дуття. Практика показала, що висота горна ($H_{горн}$) співвідноситься з діаметром горна ($D_{горн}$) вираженням $0.34 < H_{горн}/D_{горн} < 0.42$.

Збільшення глибини зумпфа дозволяє зменшити вплив негативних факторів гідродинаміки розплаву на стійкість зони стику горна та поду, тому є одним із найважливіших факторів при конструюванні металоприймача доменної печі. Для оцінки глибини зумпфа загальноновизнаним є його зв'язок з діаметром горна. Раніше глибина зумпфа становила порядку $(0.16 \div 0.22) \cdot D_{горн}$ [34], то останнім часом глибина зумпфа на доменних печах більше наведених значень і досягає $(0.23 \div 0.28) \cdot D_{горн}$ [31].

Збільшення глибини зумпфу не може не призвести до перегляду розмірів інших елементів конструкції металоприймача, оскільки головні розміри доменної печі, такі як висота печі і висота її елементів (шахти, розпару, заплечиків, горна) технологічно взаємопов'язані і не підлягають вільному

варіюванню, то збільшення глибини зумпфа найчастіше відбувається за рахунок зменшення товщини поду.

У зарубіжній методології конструкції горнів доменних печей розробляються два основних напрямки [35]:

- «термічний» підхід – намагання пов'язати комбінацію вогнетривких матеріалів із системою охолодження, використання матеріалів з високими теплопровідними властивостями на основі графіту, напівграфіту та вуглецю (рис. 1.1);

Схемы конструктивных решений «термической» футеровки

Конструктивные схемы термической футеровки с манжетой безопасности

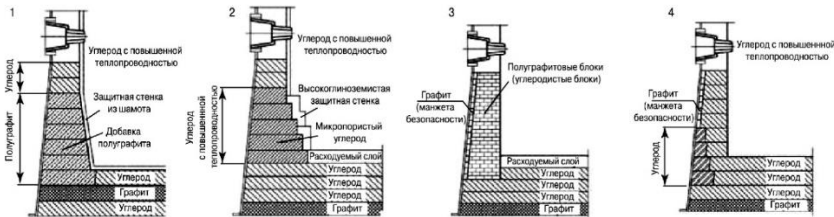


Рис. 1.1 – Приклади різних варіантів «термічної» футерівки[36]

- «вогнетривкий» підхід – використання комбінації зносостійких матеріалів на основі вуглецю і кераміки («керамічний стакан») (рис. 1.2).

Можна виділити основні конструкції горнів, що набули широкого поширення:

- на основі великоформатних, високотеплопровідних, мікропористих або супермікропористих вуглецевих блоків;
- на основі дрібноформатних обпалених вуглецевих цегл;
- з керамічним стаканом, робоча поверхня такої конструкції виконана з керамічних вогнетривів, за якими розташовано високотеплопровідний вуглецевий шар.

Незважаючи на розробку різноманітного асортименту вуглецевих вогнетривів, основною причиною зупинки доменних печей на капітальні ремонти, як і раніше, є стан футерівки горна. Особливо значний знос відбувається в зоні стику горна і поду та

в області чавунних льоток. Найчастіше знос футерівки металоприймача обмежено двома профілями – якщо у верхній частині поду вдається організувати знос в формі зворотного зводу, то профіль зносу горна буде йти паралельно вихідній поверхні футерівки. Якщо же знос верхньої частини поду відсутній, або паралельний до вихідної поверхні футерівки поду, то профіль зносу горна буде приймати форму слонової ноги від верхньої кромки поду в напрямку системи периферійного охолодження. При цьому явною є небезпека прориву. Між цими профілями розпапу можливі й інші перехідні стани.

Схемы конструктивных решений «керамической» футеровки

Конструктивные схемы футеровки с керамическими манжетами

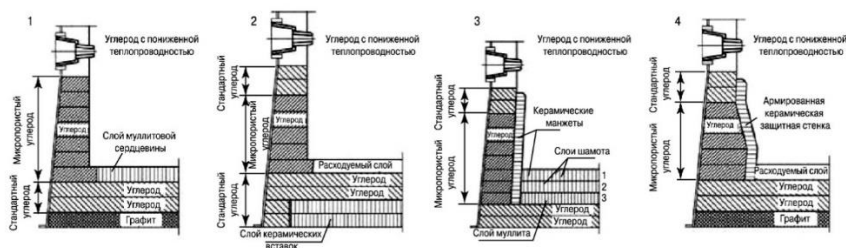


Рис. 1.2 – Приклади різних варіантів «керамічної» футерівки[36]

Проникнення у вуглецеві вогнетриви рідких продуктів плавки пов'язано з наявністю пір та їх розмірами. У зв'язку з цим на поверхні контакту з рідким металом необхідно використовувати матеріали з досить щільною текстурою. Вуглецеві матеріали, що містять пори на 70% $< 0,5$ мкм, дозволяють забезпечити максимальний опір фізичному проникненню розплавлених чавуну і лугів. При появі супермікропористих вогнетривів, в яких спеціальні добавки і обробка пригнічують появу пір з розмірами ≥ 1 мкм, проникнення рідких продуктів плавки відбувається значно рідше.

Зношення стінок горна в звичайному або мікропористому виконанні пов'язано з виникненням термічних та механічних

напруг, в результаті чого в матеріалі футерівки з'являються тріщини, які значно погіршують властивості матеріалу, в тому числі і його теплопровідність.

Однак, найчастіше, знос стінок горна відбувається за рахунок сприяючих зовнішніх чинників, таких як надмірна товщина стін, відсутність запасу на термічне розширення та невідповідні властивості матеріалу. Серйозну небезпеку для вуглецевих блоків представляє окислення вуглецю внаслідок протікання охолоджуючої води.

На початку 70-х років в горнах доменних печей з великим успіхом почали застосовувати в верхній частині поду керамічні ряди (муліт), які дозволили запобігти зносу поду. Однак проблема зносу нижній частині стінок горна, як і раніше, залишалася невирішеною. Для боротьби із зносом такого характеру застосовувалися потовщені в нижній частині стінки поду (товщиною до 3,5 м). Але, як показав досвід, початкова інтенсивність зносу футерівки залишається високою, доки її залишкова товщина не доходить до рівня, при якому може утворюватися та підтримуватися на робочій поверхні стійкий, стабільний гарнісаж. Тому примітивне потовщення районів горна та поду, схильних до інтенсивного зносу, не є ідеальним рішенням проблеми.

Одним із основних теплотехнічних показників теплової роботи вогнетривкої футерівки є її термічний опір. Однак цей показник є відносним, тому що залежить не тільки від властивостей вогнетривкого матеріалу, але і від його товщини. Для зручності порівняння вогнетривких футерівок різної товщини, будемо розглядати термічний опір на одиницю товщини футерівки ($KL_{тр}$) – такий показник абсолютний і характеризує тільки теплотехнічні властивості футерівки.

Особливо облік цього показника є важливим при виборі конструкції поду. Оптимальною, по нашому уявленню, є конструкція поду (її висота та набір вогнетривких матеріалів) з

таким значенням показника $KL_{тр}$, при якому відбувається оптимальне охолодження поду, без невинуватених втрат тепла. Якщо конструювання поду відбувається без урахування показника $KL_{тр}$, то чим менше висота поду, тим менше її термічний опір (тим менше значення показника $KL_{тр}$), і, отже, тим вище теплові втрати горна через центральну частину поду. Тому головним є оптимальний підбір вогнетривів в поді, що дозволить пов'язати власне конструкцію поду та її стійкість, теплове навантаження на охолодження низу печі та мінімізувати втрати тепла. Крім того, великі теплові втрати горна через центральну частину поду безпосередньо пов'язані не тільки з витратами на охолодження низу печі, але й з витратами коксу. Тому, виходячи з бажання мінімізувати теплові втрати горна при витонченні поду, обмежимо величину теплового потоку через центральну частину поду (бажано протягом всієї кампанії) значеннями $1500 \div 3000 \text{ Вт/м}^2$, а висота поду та підбір вогнетривів повинен бути таким, щоб значення коефіцієнта $KL_{тр}$ потрапляло в інтервал $0,20 \div 0,24$.

Підводячи підсумок аналізу переходу на великі глибини зумпфа і, відповідно, на тонкі поди та, з огляду на зарубіжний досвід експлуатації тонкого поду, доцільним є використання товщини поду в інтервалі $3,2 \div 3,7 \text{ м}$ з підбором вогнетривких матеріалів в центральній частині поду, при якому показник $KL_{тр}$ потрапляв би в інтервал $0,20 \div 0,23$, а питомий тепловий потік на центр охолодження поду становив $1800 \div 2700 \text{ Вт/м}^2$.

Аналіз стійкості горнів доменних печей в залежності від їх конструкції (тобто вибір профілю горна, матеріали вогнетривів, які використовувалися для його футерівки, охолодження горна) було проведено в роботі [37]. Аналізуючи футерівку горнів по її термічним і керамічним характеристикам, а також дані по їх стійкості, отримані для доменних печей після їх видувки, що відносяться до тривалості кампанії і по фактично виміряній інтенсивності зносу горна, автори прийшли до висновку, що підвищена швидкість зносу футерівки горна і, особливо, поду

спостерігається в тих випадках, коли висота мертвого шару занадто мала, в порівнянні з тими доменними печами, для яких параметри профілю горна обрані вдало. Аналізуючи використання вуглецевих вогнетривів найкращих марок, автори віддають перевагу правильності обраного профілю та розмірів горну, наводячи приклади, коли використання таких вогнетривів при невдалих конструктивних рішеннях горна не в змозі забезпечити достатню тривалість кампанії печі, і навпаки, коли досить прості вогнетриви в горнах з правильним підбором профілю і розмірів, в змозі забезпечити достатню тривалість кампанії печі.

Цікавим є підхід для захисту внутрішньої футерівки горна «керамічним стаканом» [38]. Концепція керамічної футерівки робочої поверхні горна була прийнята з одного боку для збільшення терміну служби горна, так як кераміка в меншій мірі піддається ерозії під дією рідкого чавуну, ніж вуглець, а з іншого боку – висока теплопровідність вуглецевих вогнетривів дозволяє зсунути ізотерму 1150°C в керамічне кільце, надійно захистивши вуглецеві вогнетриви від впливу чавуну, лугів і цинку (ізотерма затвердіння яких $\sim 800^{\circ}\text{C}$). Таким чином, керамічна футерівка надійно перепиняє чавуну шлях до вуглецевої кладки. Велику роль відіграє також її висока стійкість до окислення в разі протікання води з фурменої зони та низька теплопровідність, що дозволяє зменшити втрати тепла з горну, а значить і зменшити витрати коксу. Основним недоліком таких конструкцій є невисока стійкість «керамічного стакану». За наявними в літературі даними середня стійкість «керамічного стакану» від 3 до 8 років, хоча відомі окремі випадки їх стійкості до 12 років [38].

Перші «керамічні стакани» було виконано з великорозмірних попередньо відлитих блоків. В результаті розробок компанії Saint-Gobain [35], в 1993 році була задута перша в світі ДП (Thyssen Schwelgern ДП2) з «керамічним стаканом», виконаним з корундової цегли на сіалоновій зв'язці. На

відміну від попередніх моделей, новий «керамічний стакан» складався з малорозмірних цегл, що підвищувало важливість дизайну стакану. Щоб уникнути «виринання», кожен елемент конструкції стакану потрібно надійно зафіксувати. Було запропоновано унікальну систему замкового з'єднання малорозмірних цегл, розробленої Saint-Gobain, що стало одним із ключових елементів успіху «керамічного стакану «Coranit AL», зі стійкістю 8-10 років.

В Україні доменна піч з таким дизайном горна була виконана в 2008 р. на ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» на ДП №8 та успішно функціонувала до видувки в 2011 році протягом 10 років експлуатації, і на ДП №3 ПрАТ «Єнакіївський металургійний завод», де «керамічний стакан» простояв 8 років.

У 2017 р. і 2019 р. по ТЛЗ ІЧМ було виконано капремонт 1-ого розряду на двох доменних печах – ДП №3 ПАТ «Запоріжсталь» і ДП №3 ПАТ «МК «Азовсталь». На даних доменних печах реалізовано «керамічний стакан» виробництва «Gongyi Anzheng».

1.1.3 Системи охолодження металоприймача

Охолодження периферії горна та поду

Охолодження периферії горна і поду на сучасних доменних печах здійснюється по одному з наступних варіантів (рис. 1.3):

- зовнішній полив (спреєрне охолодження);
- касетні холодильники (двостінна рубашка/подвійний кожух);
- плитові холодильні плити, які можуть бути чавунними і мідними.

У кожного з наведених вище способів охолодження металоприймача є переваги і недоліки (табл. 1.1).



Рис. 1.3 – Конструкції систем охолодження горну доменних печей

Залежно від особливостей конструкції, фінансових можливостей і вимог техніки безпеки застосовують різні системи охолодження доменних печей. Наприклад, мідні холодильні плити через їх високу вартість, як правило, застосовують тільки в секторах чавунних льоток в комбінації з високотеплопровідною футерівкою для забезпечення інтенсивного тепловідведення і можливості нарощування гарнісажу в даній зоні [39].

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки різних способів охолодження металоприймача

<i>Спосіб охолодження</i>		<i>Переваги</i>	<i>Недоліки</i>
Зовнішній полив (спреєрне охолодження)		1. Простота реалізації - низькі витрати; 2. Відсутні вимоги до якості води; 3. Можливість визначення місць перегріву кожуху.	1. Великі витрати води; 2. Немає можливості гнучкого регулювання витрат води; 3. Утворення накипу, іржі, відкладання бруду на кожусі печі; 4. Максимальний питомий тепловий потік – 20-40 кВт/м ² [36].
Подвійний кожух		1. Невеликі витрати води; 2. Гнучке регулювання витрат води; 3. Максимальний питомий тепловий потік – 60-80 кВт/м ² [36].	1. Достатньо висока вартість реалізації; 2. Неможливість забезпечити охолодження секторів кожуха, де спостерігається локальний перегрів, що вимагає установки в даних секторах додаткових спреєрів.
Плитові холодильники	Чавунні	1. Невеликі витрати води; 2. Гнучке регулювання витрат води; 3. Можливість контролювати теплові навантаження на кожен холодильник; 4. Максимальний питомий тепловий потік – 60-80 кВт/м ² [36].	1. Достатньо висока вартість реалізації; 2. Відсутня можливість заміни і ремонту до зупинки доменної печі.
	Мідні	1. Невеликі витрати води; 2. Гнучке регулювання витрат води; 3. Максимальний питомий тепловий потік – 200-320 кВт/м ² [36].	1. Потрібні значні капіталовкладення; 2. Відсутня можливість заміни і ремонту до зупинки доменної печі.

Охолодження поду

Після впровадження конструкції горна з вуглецевих блоків та застосування систем охолодження поду знос футерівки поду перестав бути причиною передчасного закінчення кампанії доменної печі. На практиці застосовують три методи охолодження поду: за допомогою рідини (води або масла), повітрям, шляхом укладання графіту.

Графітове охолодження поду особливо є ефективним при модернізації доменних печей з діаметром горна до 9 м. Шар графіту укладається між днищем поду і вуглецевими блоками. Тепло передається через шар графіту в холодильну плиту поду або в водоохолоджуваний сталевий кожух. Системи графітового охолодження поду застосовуються в основному в Північній Америці і на підставі наявної інформації проблем зі стійкістю поду там не існує (рис. 1.4).

Перевагою повітряного охолодження є те, що його конструкція відрізняється відносною простотою виготовлення, забезпечує запобігання бетону фундаменту від перегріву при практично однаковому розподілі температур по його перерізу. Загальним для всіх систем повітряного охолодження є недостатня герметичність.

Необхідність збільшення висоти мертвого шару для більшості доменних печей відбувається за рахунок зменшення товщини поду. Повітряне охолодження не дозволить впоратись з тепловим потоком, що надходить через тонкий під до систем охолодження поду. Як в практиці ІЧМ НАНУ, так і в зарубіжній, відомо випадки, коли при сильному зносі футерівки поду температура термопар футерівки була $\sim 350^{\circ}\text{C}$ і вище. Тому перехід до водяного охолодження, як більш інтенсивного, при потоншенні поду є неминучим.

Витрати води на систему охолодження поду невеликі, а перепад температури становить $\sim 1^{\circ}\text{C}$. З цієї причини контур охолодження поду розраховано на послідовне з'єднання з іншими

контурами охолодження. Так, в ряді схем фірми «Davy International» [40] контур охолодження поду з'єднано з контуром охолодження фурм або холодильників фуруменної зони.

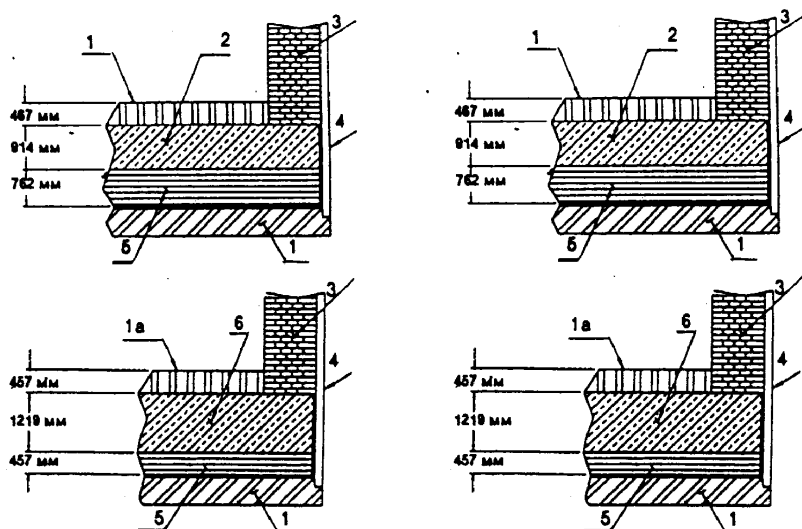


Рис. 1.4 – Системи графітового охолодження поду, що застосовуються в Північній Америці

Позначення: 1 – вогнетриви з вмістом 40-42% Al_2O_3 ; 1a – вогнетриви з вмістом 65% Al_2O_3 ; 2 – вогнетриви з вмістом 65% Al_2O_3 ; 3 – вуглецева цегла; 4 – холодильна плита; 5 – графітові блоки; 6 – мікропористі вуглецеві блоки.

Зазвичай водопровідні труби укладають нижче плити днища поду. На ДП №6 в Дуйсбурзі-Рурорте фірми «Тіссен» об'ємом 2480 м³ труби водяного охолодження розташовано під плитою в пазах графіту [41]. Оригінальна конструкція охолодження поду застосована на ДП-1 заводу Оута фірми Nippon Steel Corporation об'ємом 4880 м³ [42]. Система охолодження поду має здвоєну структуру: верхній ряд труб служить для регулювання роботи пристрою, а нижній – для охолодження бетонного фундаменту. Ця

система є надійною та застосовується вже протягом другої кампанії печі.

Для доменних печей №5 в Таранто, №4 в П'юмбіно і печі, побудованої фірмою «Італімпьянті» [41], було прийнято систему охолодження в прямому контакті з вуглецевим матеріалом (над опорною плитою). При реконструкції ДП №1 в Фос-сюр-Мері в 1993 р. для охолодження поду застосували масло, що циркулює в п'яти незалежних секціях, розташованих над днищем печі [43]. Низький перепад температур охолоджуючої води пов'язано, очевидно, з її великими витратами. На доменній печі №4 заводу Порт-Талбот фірми «British Steel» з діаметром горна 10,8 м на охолодження поду надходить 400 т/год води, яка проходить через 42 трубки діаметром 60,3 мм, які прокладено під плитою поду в набивній футерівці [44]. На охолодження поду доменної печі №3 в Вакаямі фірми «Сумімото кіндзоку коге» раніше надходило до 600 т/год води. З огляду на переохолодження поду витрати води переналаштували на 20 т/год для підтримки температури поду в нижньому ряду блоків на рівні 120°C [41].

Переведення охолодження низу печі з повітряного на більш інтенсивне водяне дозволяє зменшити товщину центральної частини поду за рахунок значного зменшення товщини графітового шару з 1600 до 400 мм.

В Україні конструкція системи водяного охолодження низу поду вперше було використано ІЧМ спільно з ДП «УКРДІПРОМЕЗ» на ДП №2 ПАТ «Запоріжсталь» при її реконструкції 2001-2003 рр. В подальшому – на ДП №8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ДП №3 ПрАТ «ЄМЗ», ДП №4 і ДП №3 ПАТ «Запоріжсталь», ДП №3 ПрАТ «МК «Азовсталь».

Останнім часом, як правило, застосовується комбінована система охолодження – водяне охолодження, спільно із закладенням 1-2 рядів графітових блоків, що дозволяє забезпечити інтенсивне охолодження поду і запобігти її прогару.

Зокрема, даний спосіб охолодження поду реалізовано на ДП №3 ПАТ «Запоріжсталь» і ДП №3 ПрАТ «МК «Азовсталь».

1.2 Аналіз існуючих методів контролю і діагностики теплової роботи та стану футерівки доменної печі

1.2.1 Аналіз існуючих способів моніторингу за станом футерівки шахти

Технічний стан шахти доменної печі залежить від теплової роботи її периферійної зони, термінів служби, стійкості до зношування футерівки та холодильних плит.

Контроль теплової роботи периферійної зони, а також контроль технічного стану футерівки та наявності на ній гарнісажу дозволяє знайти, оцінити фактори, що негативно впливають, та запобігти передчасному виходу з ладу футерівки, холодильних плит та кожуха доменної печі.

Доцільність автоматизованого контролю теплової роботи системи охолодження та можливість використання цієї величини для виявлення розладів в роботі печі у вітчизняному доменному виробництві вперше були обґрунтовані в 60-х роках минулого століття в роботі В.Я. Кожуха [45].

У вітчизняному доменному виробництві автоматизований контроль теплових втрат і температури футерівки використовувався, як правило, для контролю розпалу футерівки металлоприймача [46]. Виняток становлять роботи П.Г. Васильєва з автоматизованого контролю розпалу футерівки шахти на комбінаті ім. Петровського.

За кордоном автоматизованому контролю теплових навантажень на систему охолодження традиційно приділялося більше уваги [46]. Ці розробки активно почали впроваджувати закордонні фірми при реконструкції старих та при будівництві нових печей в Україні на пострадянському просторі, зокрема, на Челябінському та Новолипецькому металургійних комбінатах. Виняток становить доменна піч №6 ВАТ «Новолипецького

металургійного комбінату (НЛМК)», на якій своїми силами на початку 2000-их років встановлено та використовується для виявлення розладів в тепловій роботі печі автоматизований контроль теплових втрат у системі охолодження шахти та заплечиків [7].

Особливо гостро питання про необхідність реалізації на доменних печах України засобів автоматизованого контролю теплової роботи периферійної зони доменної печі стало при освоєнні технології доменної плавки з ПВП [13, 47].

За результатами аналітичних та експериментальних досліджень ІЧМ НАНУ динаміка виходу з ладу холодильників, зміни теплових навантажень по висоті і периметру печі, теплових втрат в системі охолодження доменних печей ПАТ «Запоріжсталь», ПАТ «АМК», ПрАТ «ММК ім. Ілліча» та ПрАТ «МК «Азовсталь» технологія вдування ПВП робить основний вплив на ресурс роботи заплечиків, маратору та низ шахти внаслідок змін у тепловій та газодинамічній роботі при переході на технологію доменної плавки з ПВП [3, 4, 13]. У цих умовах важливим завданням є автоматизований контроль теплового і технічного стану футерівки шахти доменної печі.

Температурні умови і теплове навантаження на шахту динамічно змінюється в залежності від технологічного режиму роботи печі. При цьому істотно змінюється і шар гарнісажу, що затвердів, тому необхідно безперервно визначати параметри роботи цього шару. Визначення і регулювання теплового стану шахти є ефективним засобом захисту футерівки та холодильників, зниження енергоємності доменного виробництва і збільшення тривалості кампанії печі, в тому числі і ефективності технологічних заходів по утворенню гарнісажу.

Оцінювати вплив технології доменної плавки і конструкції печі на ресурс її роботи із застосуванням ПВП, своєчасно вживати заходів щодо продовження кампанії печі дозволяє

автоматизований контроль теплової роботи периферійної зони і розпалу футерівки печі.

Аналіз інформації автоматизованого контролю теплової роботи периферійної зони і розпалу футерівки печі дозволяє:

- порівняти і обґрунтовано вибрати раціональну конструкцію системи охолодження і матеріали вогнетривів для збільшення ресурсу роботи доменної печі;

- встановити кількісні взаємозв'язки між технологією доменної плавки з ПВП і розпалом футерівки, тепловими втратами і витратами коксу на їх компенсацію, утворенням гарнісажу;

- розробляти рекомендації і заходи для збільшення ресурсу працюючих печей шляхом вибору раціональних режимів завантаження і розподілу газового потоку, параметрів і складу дуття, витрат ПВП і своєчасного проведення капітального ремонту печі.

На даний момент у світовій практиці використовується три основних принципових підходи до контролю залишкової товщини футерівки [23, 48, 49]:

1. Буріння кернів в металлоприймачі та свердління броні і футерівки в заплечиках, мараторі та шахті печі;

2. Методи, засновані на звуковому вимірюванні товщини футерівки;

3. Методи, засновані на законах теплопровідності та теплообміну в периферійній зоні та огороженні доменної печі.

Решта методів, такі як метод радіоактивних ізотопів, електротехнічний метод, заснований на розриві електричного кола при розпалі футерівки, електромагнітний метод та інші, не отримали суттєвого розвитку в доменному виробництві через небезпеки, які пов'язані з підвищеною радіоактивністю (ізотопний метод), та із труднощами в технічному виконанні та достовірністю отриманих результатів [48].

1. Спосіб буріння кернів і свердління броні та футерівки несе найбільш точну інформацію про стан і залишкову товщину футерівки та товщині гарнісажу, проте має вкрай істотні недоліки:

- порушення цілісності броні, футерівки і захисного шару гарнісажу;

- можливість проводити дослідження тільки на тривалих зупинках печей, відповідно, маючи велику періодичність вимірювань;

- відсутність можливості оперативного впливу на процес руйнування футерівки та утворення гарнісажу.

2. Метод, заснований на звуковій діагностиці стану футерівки, активно розвивається і застосовується такими відомими зарубіжними компаніями, як «Danieli Corus», «Berry Metal», «NDT Group», «Hatch» та іншими.

Методи звукової діагностики умовно можна розділити на два напрямки – діагностика ударними хвилями (прилад складається з імпактора та ресивера («NDT Group»; «Hatch»)) і ультразвуковий метод визначення довжини хвилеводу закладеного та який піддається зносу разом із футерівкою («Danieli Corus», «Berry Metal») (рис. 1.5).

У вітчизняній науці метод ультразвукової діагностики було випробувано П.Г. Васильєвим на заводі ім. Петровського, де в охолоджувану частину шахти з двох діаметрально протилежних сторін на 5-ти горизонтах доменної печі об'ємом 1033 м³ було закладено кварцові хвилеводи, які контролювалися ультразвуковим дефектоскопом і п'єзоелектричними перетворювачами, які підключалися до торця хвилеводу (рис. 1.6). Даний метод показав свою працездатність і завдяки йому було отримано результати швидкості зносу футерівки по висоті печі [49].

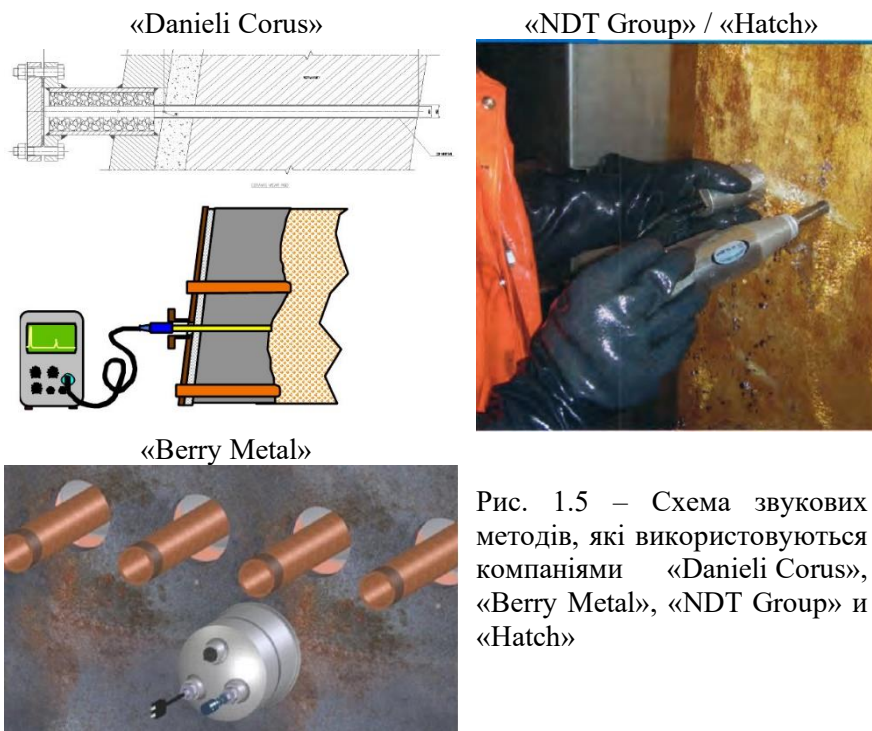


Рис. 1.5 – Схема звукових методів, які використовуються компаніями «Danieli Corus», «Berry Metal», «NDT Group» и «Hatch»

Звукові діагностичні методи дозволяють досить точно визначати залишкову товщину футерівки, але мають деякі недоліки:

- залежність швидкості проходження звукової хвилі від температури і її перепаду по довжині хвилеводу і, як наслідок, вплив на точність показань приладу [49];
- при методі ультразвукового сканування довжини хвилеводу немає можливості визначати товщину захисного гарнісажного шару;

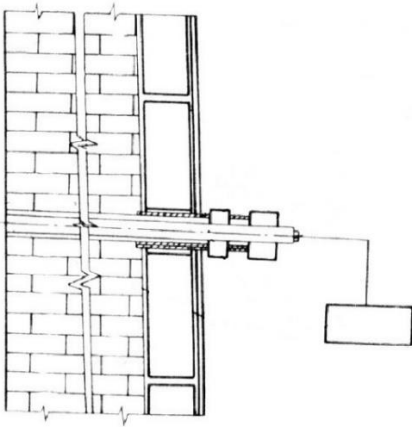


Рис. 1.6 – Схема ультразвукового контролю товщини футерівки
П.Г. Васильєва

- в разі використання переносного приладу для визначення довжини хвилеводу або використання імпактора та ресивера – періодичність замірів і безпеки пов'язані з перебуванням оператора приладу в газонебезпечному середовищі на працюючій печі;

- можливість відновлення роботи пошкодженого хвилеводу тільки при заміні вогнетривкої кладки печі.

3. Метод, заснований на законах теплопровідності і теплообміну в периферійній зоні і огороженні доменної печі.

Вперше на території України даний метод було застосовано П.Г. Васильєвим для контролю товщини футерівки шахти на доменній печі заводу ім. Петровського [50-51].

В основі методу лежить контроль теплових навантажень на футерівку доменної печі через різницю температур за показаннями термопар, закладених на різній глибині в футерівку. Це дозволяє автоматизовано визначати теплові навантаження і, як наслідок, товщину футерівки шахти.

Перевагами використання методу, заснованого на законах теплопровідності і теплообміну в периферійній зоні і огороженні доменної печі є:

- отримання достовірної інформації в автоматичному режимі щодо температур в футерівці шахти, теплової роботи периферії шахти доменної печі та стану футерівки без порушення цілісності броні, футерівки і захисного шару гарнісажу;

- відсутність небезпеки, пов'язаної з перебуванням оператора приладу в газонебезпечному середовищі на працюючій печі;
- є економічно менш затратним методом, в порівнянні з ультразвуковим, так як не потребує вартісних приладів для отримання та обробки інформації.

Однак даний метод має і свої недоліки:

- можливість відновлення роботи пошкоджених термопар тільки при заміні вогнетривкої кладки печі;
- залежність точності визначення товщини футерівки від процесів, що протікають в об'ємі доменної печі.

Для визначення температури пристінкового газу для визначення товщини футерівки, П.Г. Васильєвим на основі серії експериментів, виконаних на промисловій доменній печі [50], було встановлено тісний зв'язок температури пристінкового газу t_z з температурою периферійних газів t_n під захисними плитами колошника в секторі установки термопар і рівнем горизонту розташування точки виміру температури по висоті печі.

Емпіричні залежності П.Г. Васильєва було отримано для товстостінних шахт, виконаних з ущільненого шамоту, з охолодженням до середини шахти, і для печей, які працюють на холодному агломераті. Сучасний проєкт шахти доменних печей, розрахований на застосування ПВП, має тонкостінну конструкцію, комбіноване охолодження до колошника і футерівку, виконану різними, за своїми теплофізичними властивостями, матеріалами, та багато печей працює на гарячому агломераті [2, 13]. Тому емпіричні залежності розподілу температур пристінкового газу по висоті шахти непридатні для точного розрахунку залишкової товщини футерівки на доменних печах, що мають сучасну конструкцію шахт.

1.2.2 Аналіз існуючих способів моніторингу за станом футерівки металоприймача

Так як в сучасних умовах тривалість кампанії печі прогнозують на термін не менше 15 років, то забезпечення тривалої, безпечної і безаварійної роботи доменної печі вимагає регулярного контролю за станом вогнетривкої футерівки горна і поду доменної печі [52].

Найважливішими задачами контролю стану металоприймача, перш за все, є:

- визначення фактичного стану футерівки горна і поду;
- збільшення тривалості кампанії доменної печі, в результаті застосування гарнісажоутворюючих добавок.
- планування поточних і капітальних ремонтів футерівки металоприймача доменної печі.

На даний момент у світовій практиці використовують наступні основні методи контролю залишкової товщини футерівки [23, 46, 48, 49, 53-56]:

1. буріння кернів;
2. калориметричний (визначення теплових навантажень системи охолодження металоприймача);
3. термометричний (визначення температури кладки металоприймача);
4. ультразвуковий (визначення часу проходження і відображення ультразвукових коливань від внутрішньої поверхні кладки металоприймача).

Інші методи, такі як метод радіоактивних ізотопів, електротехнічний метод, заснований на розриві електричного кола при розпалі футерівки, електромагнітний метод та інші, не отримали суттєвого розвитку в доменному виробництві через небезпеки, які пов'язані з підвищеною радіоактивністю (ізотопний метод), та з труднощами в технічному виконанні і достовірністю отриманих результатів [48]. Кожен із зазначених методів має відмітні переваги і недоліки (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Переваги та недоліки різних методів контролю за станом металоприймача

<i>Метод контролю</i>	<i>Переваги</i>	<i>Недоліки</i>
Буріння кернів	1. дозволяє отримати найбільш точну інформацію про стан і залишкову товщину футерівки та товщину гарнісажу.	1. порушення цілісності броні, футерівки та захисного шару гарнісажу; 2. можливість проводити дослідження тільки на тривалих зупинках печей, відповідно, маючи велику періодичність вимірів; 3. відсутність можливості оперативного впливу на процес руйнування футерівки та утворення гарнісажу.
Калориметричний	1. вимірюваний тепловий потік дає теплові втрати з усієї поверхні холодильника або групи холодильників; 2. системи охолодження металоприймача, тим самим повністю контролюється тепловий стан горна і поду; 3. забезпечується визначення локальних ділянок з підвищеними тепловими навантаженнями, а також ступеня заростання або засмічування трубок холодильників.	1. розрахунок залишкової товщини футерівки по тепловим навантаженням дає усереднену товщину кладки по всій поверхні холодильника; 2. дискретність і трудоемність визначення теплових навантажень, які вимірюються вручну. В даний час, з появою вітчизняних засобів визначення перепадів температур і витрат охолоджувача з достатньою точністю в автоматичному режимі, це не суттєво.
Термометричний	можливість визначення в автоматичному режимі температури кладки, її змін по висоті, периметру та товщині стінок металоприймача доменної печі.	складність визначення ділянок локального зносу футерівки металоприймача, які не контролюються термопарами.

Ультразвуковий	1. можливість проведення експрес-аналізу діагностики стану горна та поду з будь-якого доступного місця робочого майданчика піддоменого приміщення; 2. достатня точність вимірювань; 3. можливість визначення фізико-механічних характеристик футерівки (наявність і параметри тріщин, тріщинуватість (кількість тріщин на одиницю площі), процентний вміст цинку і вологи).	1. висока вартість обладнання; 2. високі вимоги до якості установки обладнання; необхідність проведення великого числа вимірювань; 3. складність в організації та здійсненні вимірів в автоматичному режимі.
----------------	---	---

Загальним недоліком, властивим всім вище перерахованим методам контролю залишкової товщини футерівки металоприймача, є відсутність об'єктивних даних про зміну теплофізичних і механічних властивостей вогнетривів в процесі експлуатації печі. Цей недолік вносить суттєві похибки в розрахунок фактичної величини зносу кладки горна і поду доменної печі.

Здійснений короткий аналіз показує, що на сьогоднішній день, не існує універсального методу, який дозволяє однозначно визначати характер розпалу і залишкову товщину кладки і гарнісажу горна та поду доменної печі [46].

1.2.3 Аналіз існуючих способів моніторингу теплових втрат

Під час проведення значної кількості обстежень доменних печей фахівцями ІЧМ, в результаті виконання НДР було встановлено, що величина теплових втрат є інтегральним показником, що характеризує ефективність конструкції печі і технології плавки з точки зору наявності резерву зменшення витрат коксу, збільшення тривалості кампанії печі, переваги

доменних печей великого обсягу [8, 11, 12, 57, 58].

Етапи еволюції систем охолодження доменних печей та розвитку водного господарства на металургійних комбінатах пов'язані з історією інтенсифікації плавки чавуну: застосування гарячого дуття, збільшення об'єму печей та тиску під колошником, збагачення дуття киснем і вдуванням в горн паливних добавок [1, 59-61].

Інтенсифікація охолодження доменних печей призвела до того, що величина теплових втрат з охолоджувальною водою досягає 10-50 МВт в залежності від об'єму доменної печі, особливостей системи охолодження та технології ведення доменної плавки [8, 12, 58]. І ця стаття теплового балансу плавки на сучасному етапі розвитку доменного виробництва виходить на одну із ключових ролей у сучасних розробках технічних та технологічних заходів, направлених на зменшення витрат коксу [57, 11].

За звичай вимірювання теплових втрат проводилось інструментальним способом – за величиною витрати та температури вхідної та вихідної води на доменну піч/контур охолодження/елементи контуру охолодження. При наявності випарювальної системи охолодження (використовується для охолодження шахти ДП) – за витратою утвореної пари в контурі. Однак даний спосіб визначення теплових втрат має недоліки:

- визначення теплових втрат вимагає суттєвих витрат людських ресурсів та часу при проведенні вимірювань та обробки вхідної інформації;
- вплив людського фактора в ході вимірювання та обробки даних, що може вплинути на точність величини теплових втрат;
- відсутність можливості регулярного визначення теплових втрат для оперативного управління доменною плавкою.

Чинники, що впливають зовнішні втрати теплоти, є постійно діючі, наприклад, обсяг печі, або, навпаки, що залежать від організації виробництва та рівня технології (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Теплові втрати ($Q_{п.р.п}$, МВт) доменних печей різного об'єму ($V_{пол}$, м³)

Теплові втрати, МВт	Корисний об'єм доменних печей, м ³										
	180-260	350-450	1033	1386	1719	2000	2700	3000	3200	4200*	5000
$Q_{п.р.п}^{min}$	1,7	3,8	7,0	8,7	10,9	7,8	14,4	13,5	14,7	20,0	23,8
$Q_{п.р.п}^{mid}$	2,3	4,1	8,4	10,4	12,3	14,0	18,0	19,8	20,9	31,0	30,8
$Q_{п.р.п}^{max}$	3,3	4,3	15,8	17,3	21,6	22,3	21,9	24,0	22,7	42,0	48,0
Число вимірювань	7	3	7	15	12	9	6	7	18	2	44

* – за даними німецьких дослідників в роботі [62]

Результати досліджень наведених у табл. 1.3 підтвердили, що зі збільшенням об'єму доменних печей їх теплові втрати збільшуються. Максимальна і мінімальна величини зовнішніх теплових втрат однотипних печей відрізняються в 1,5-2 рази, а в окремих випадках і більше, що залежить від багатьох факторів: профілю та теплової потужності печі, виду чавуну, що виплавляється, розподілу газу по радіусу і периметру печі, тривалості кампанії роботи, використання різних паливних добавок тощо. Дані про теплові навантаження на охолоджувані елементи доменних печей лягли в основу методу контролю розпалу футерівки металопріймача, розробленого в ІЧМ, та апробованого на ряді металургійних підприємств СНД, частково увійшли до довідкової та навчальної літератури [63].

Дані про зовнішні теплові втрати доменних печей для вирішення різних питань теорії та практики металургії чавуну використовували: П.Г. Васильєв, Є.Г. Донсков, І.Ф. Курунов, Ф.М. Москаліна, Н.П. Сисоєв, С.М. Тлєгабулов, Ю.В. Федулов, П. Хайнріх, С.В. Шаврін, Ю.С. Юсфін, Ю.Г. Ярошенко та інші.

Це дозволило авторам роботи [7], підбиваючи підсумки розвитку доменного виробництва в XX столітті, відзначити наступне: «Велика багаторічна робота з експериментального дослідження теплових втрат на доменних печах різного обсягу, з різним ступенем зносу футерівки та працюючих з різним газорозподілом, виконана О.В. Бородуліним із співробітниками принесла цінні кількісні характеристики інтенсивності теплових потоків на стінки печі в різних зонах доменної печі, що дозволяють розраховувати теплові втрати при моделюванні доменної плавки».

Таким чином, використання інформації про теплові втрати в системі охолодження відкриває широкі можливості для аналітичних досліджень закономірностей тепло- та масообміну в периферійній зоні доменних печей. Ці результати доцільно використовувати при проєктуванні та реконструкції доменних печей, управлінні тепловим режимом, технічній експертизі стану футерування агрегатів, удосконаленні конструкцій та параметрів роботи систем охолодження, розробці науково обґрунтованих норм витрат води, при побудові математичних моделей та системи моніторингу доменної печі.

Однак, незважаючи на важливість контролю теплових втрат в системі охолодження, особливо в умовах застосування ПВП, на багатьох доменних печах України є відсутнім не тільки автоматизований контроль за тепловими втратами, але і не виконуються інструментальні вимірювання теплових втрат. Тому розробка і реалізація системи автоматизованого контролю теплових втрат в системі охолодження та витрат коксу на їх компенсацію є актуальною задачею.

РОЗДІЛ 2. МЕТОД І МОДЕЛЬ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ ПЕРИФЕРІЙНОЇ ЗОНИ І РОЗПАЛУ ФУТЕРІВКИ ШАХТИ

2.1 Метод контролю теплової роботи периферійної зони і розпалу футерівки печі

У ІЧМ отримав розвиток метод, заснований на законах теплопровідності та теплообміну в периферійній зоні і огороженні доменної печі, як найбільш інформативний та надійний. На відміну від методу, запропонованого П.Г. Васильєвим, запропонована конструкція і методика установки термопар у футерівку (рис. 2.1-2.2), а також застосовується теплогазодинамічна модель доменної плавки, а не статистичні дані для визначення граничних умов - температури внутрішньої стінки футерівки/гарнісажу в робочому просторі печі [64-66].

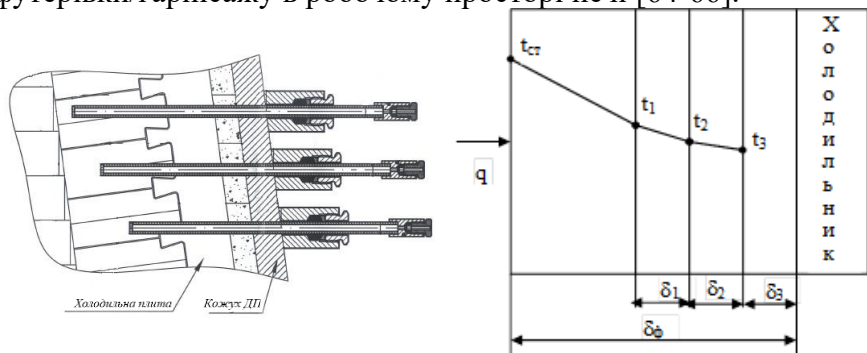


Рис. 2.1 – Загальний вигляд точки контролю

Рис. 2.2 – Схема закладки термопар у футерівку доменної печі

Запропоновано, щоб робоче закінчення термопар знаходилося в захисній металевій трубці і було зачekanено в її торцеві. Це дозволяє продовжити службу окремо взятої термопарі і точки контролю в цілому, так як в даному способі установки

заміну окремо взятих термопар можна проводити без вилучення решти двох термопар точки контролю.

Для роботи систем рекомендувалися до експлуатації термодатчики з верхньою межею вимірювання до 1250 °С. Це пов'язано з тим, що практика промислової експлуатації системи на ДП №4 показала, що температура на нижніх горизонтах може досягати 1200 °С і більше при наближенні розпалу футерівки до місця установки термопар. У якості термоперетворювачів, запропоновано використовувати термопары ТП - 0198/2 - ХА (К) з верхньою межею вимірювання не менше 1250 °С.

Розподіл точок контролю по колу доменної печі проводилося за принципом рівномірного розподілу шести точок контролю з вертикальною прив'язкою один до одного (рис. 2.3).

На основі серії експериментів, виконаних на промисловій доменній печі П.Г. Васильєвим [50], було встановлено тісний зв'язок температури пристінкового газу t_g з температурою периферійних газів t_n під захисними плитами колошника в секторі установки термопар і рівнем горизонту розташування точки виміру температури по висоті печі. Тепло-газодинамічна модель дозволила провести розрахунки при співставних умовах і показала високу збіжність результатів з залежностями, отриманими П.Г. Васильєвим (рис. 2.4).

Емпіричні залежності П.Г. Васильєва було отримано для товстостінних шахт, виконаних з ущільненого шамоту, з охолодженням до середини шахти, і для печей, які працюють на холодному агломераті. Сучасний проєкт шахти доменних печей, розрахований на застосування ПВП, має тонкостінну конструкцію, комбіноване охолодження до колошника і футерівку, виконану різними, за своїми теплофізичними властивостями, матеріалами, та багато печей працює на гарячому агломераті [2, 13]. Тому емпіричні залежності розподілу температур пристінкового газу по висоті шахти непридатні для точного розрахунку залишкової товщини футерівки на доменних печах, що мають сучасну конструкцію шахт.

Тепло-газодинамічна модель дозволяє визначити залежності розподілу температур газового потоку по висоті шахти печі при різних умовах роботи печі і застосуванні різних матеріалів та конструкцій футерівки і системи охолодження.

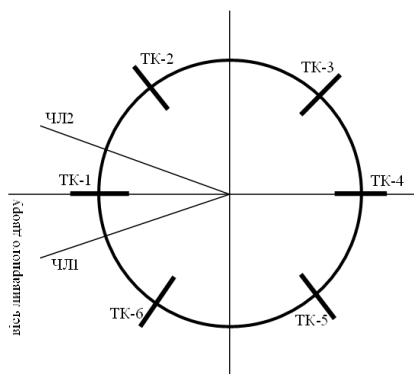


Рис. 2.3 – Схематичне розташування точок контролю по окружності печі

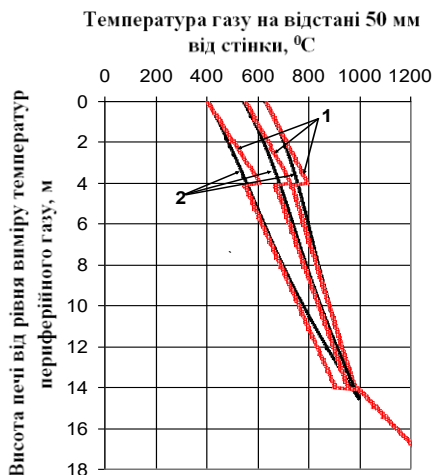


Рис. 2.4 – Співставлення результатів математичного моделювання теплообмінних процесів в шахті доменної печі з експериментальними дослідженнями:

1 – по емпіричним залежностям П.Г. Васильєва; 2 – по тепло-газодинамічному розрахунку

На основі моделювання отримано поліноміальне рівняння робочої поверхні стінки печі, яке в подальшому використовується в розрахунку товщини футерівки та гарнісажу доменної печі, в залежності від витрат дуття і температури периферійних термопар під захисними плитами:

$$T_{ст.в} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2$$

$$x_1 = (V_{дуть} - 2125)/1625,$$

$$x_2 = (T_{периф} - 500)/475,$$
(2.1)

де $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$ – коефіцієнти поліному;

$V_{дуть}$ – витрати дуття, $\text{м}^3/\text{хв.}$;

$T_{периф}$ – температура периферійних газів, $^{\circ}\text{C}$.

Коефіцієнти поліному розраховуються методом планованого експерименту [67] за результатами численних розрахунків тепло-газодинамічної моделі зі змінними параметрами в заданих межах витрат дуття і температури периферійних газів для кожної доменної печі індивідуально і залежать від її конструктивних особливостей та режимів роботи.

З огляду на те, що кожна із зон шахти печі в заданий момент часу працює в певних температурних і технологічних умовах теплопровідність футерівки доменних печей в цих зонах носить квазістаціонарний характер. Умови теплообміну на обмежуючих футерівку поверхнях такі, що маємо градієнт температур, який

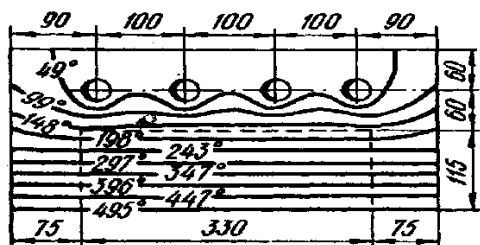


Рис. 2.5 – Розподіл температур у холодильнику та футерівці шахти [53, 68]

спрямовано лише в одному напрямку, від робочої стінки печі до холодильника, тобто тепловий потік є функцією однієї координати (рис. 2.5).

У цьому випадку розподіл температур відповідно до закону Фур'є описується одномірним стаціонарним рівнянням:

$$q = \lambda \frac{dT}{dx}$$
(2.2)

де q – тепловий потік, спрямований по нормалі до поверхні огороження доменної печі, $\text{кВт}/\text{м}^2$; T – температура, яка відповідає координаті x , К; $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності,

який залежить від температури, $\text{кВт/м}^2\text{К}$, x – координата вздовж якої розповсюджується тепловий потік, м

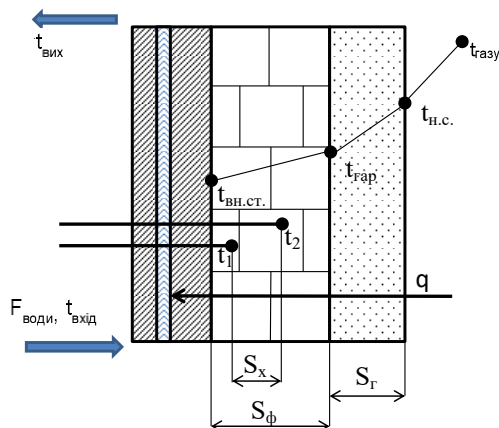


Рис. 2.6 – Схема теплопередачі в огороженні доменної печі

Схематично теплофізичну задачу теплопровідності через огороження доменної печі можна уявити, як теплопередачу через багатшарову плоску стінку (рис. 2.6).

Розв'язок рівняння (2.2) для багатшарової стінки утвореної з футерівки і гарнісажу має такий вигляд:

$$q = \frac{t_{н.с.} - t_{вн.с.}}{\frac{S_{\phi}}{\lambda_{\phi}} + \frac{S_{г}}{\lambda_{г}}}, \text{Вт} / \text{м}^2 \quad (2.3)$$

де $t_{н.с.}$ – температура зовнішньої (робочої) стінки футерівки, $^{\circ}\text{C}$; $t_{вн.с.}$ – температура внутрішньої поверхні футерівки (на стику між футерівкою і холодильником) $^{\circ}\text{C}$; S_{ϕ} – товщина футерівки, м; λ_{ϕ} – теплопровідність футерівки, Вт/мК ; $S_{г}$ – товщина гарнісажу, м; $\lambda_{г}$ – теплопровідність гарнісажу, Вт/мК .

Для знаходження товщини футерівки та гарнісажу з рівняння (2.3) першочергово необхідно знання величини теплового потоку (q) через футерівку та температур на зовнішній і внутрішній стінці футерівки ($t_{н.с.}$, $t_{вн.с.}$ відповідно).

Тепловий потік через огороження доменної печі можна визначити двома способами:

1. За допомогою виміру витрат води і перепаду її температур на вході і виході з окремо взятого охолоджуючого елемента печі (холодильника);

2. За перепадом температур у товщині вогнетривкої футерівки за допомогою декількох встановлених у футерівку термопар в одній площині із заданим кроком у напрямку від зовнішньої стінки до центру печі.

При використанні першого способу для контролю теплового потоку використовується наступне рівняння:

$$q = (C_{\text{води}} \cdot F_{\text{води}} \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{вхiд}})) / S_{\text{хол}}, \text{ Bm} / \text{м}^2 \quad (2.4)$$

де $C_{\text{води}}$ – теплоємність води, Дж/кг·К; $F_{\text{води}}$ – витрати води, кг/с; $t_{\text{вхiд}}$ и $t_{\text{вих}}$ – температури вхідної та вихідної води в охолоджуючий елемент, °С; $S_{\text{хол}}$ – робоча площа охолоджуючого елемента, м².

Контроль витрати охолоджуючої рідини і перепаду температур в системах водяного охолодження холодильних плит при застосуванні системи випарного охолодження (СВО), яка є досить поширеною у вітчизняному доменному виробництві, в країнах колишнього СНД і країнах зарубіжжя, не представляється можливим [69]. В цьому випадку, або при виникненні ряду інших причин, за якими немає можливості контролювати теплозйом з окремо взятого охолоджуючого елемента застосовується другий метод контролю теплового потоку через огорожі доменної печі.

Розрахунок теплового потоку по показанням термопар, закладених футерівку, здійснюється за класичним рівнянням теплопередачі через плоску стінку:

$$q = \frac{\lambda_{\text{фут}} \cdot (t_2 - t_1)}{S_x}, \text{ Bm} / \text{м}^2 \quad (2.5)$$

де t_1 – температура на ближній до холодильної плити термопарі, °С; t_2 – температура на дальній від холодильної плити термопарі, S_x – відстань між закладеними у футерівку термопарами, м.

При розрахунку коефіцієнт теплопровідності задається у вигляді функціональної залежності $\lambda_{\text{фут}}(T) = a \cdot T + b$, яка визначає теплопровідність футерівки в залежності від її температури, де a і b коефіцієнти.

Таким чином, проінтегрувавши рівняння (2.2), отримаємо рівняння для знаходження питомого теплового навантаження на футерівку за допомогою встановлених термопар (рис. 2.2, 2.6):

$$q = \frac{a * \frac{t_2^2 - t_1^2}{2} + b * (t_2 - t_1)}{S_x} \quad (2.6)$$

Маючи тепловий потік (2.6) і температуру на робочій стінці доменної печі (2.1) маємо можливість визначити залишкову товщину футерівки і утвореного гарнісажу.

У разі відсутності гарнісажу (рис. 2.2) рівняння для визначення залишкової товщини футерівки (S_ϕ) має вигляд:

$$S_\phi = \frac{a * \frac{t_{\text{зар}}^2 - t_{\text{вн.ст.}}^2}{2} + b * (t_{\text{н.с.}} - t_{\text{вн.ст.}})}{a * \frac{t_2^2 - t_1^2}{2} + b * (t_2 - t_1)} * S_x \quad (2.7)$$

де $t_{\text{зар}}$ – у разі відсутності гарнісажу – температура робочої поверхні футерівки печі, °С.

У разі збільшення сумарної товщини футерівки (тобто утворення на поверхні кладки гарнісажу або настилу), її слід розглядати як двошарову стінку (рис. 2.6). Товщина гарнісажу (S_e) в цьому випадку визначається з рівняння:

$$S_e = \frac{a_e * \frac{t_{\text{н.с.}}^2 - t_{\text{зар}}^2}{2} + b_e * (t_{\text{н.с.}} - t_{\text{зар}})}{a * \frac{t_2^2 - t_1^2}{2} + b * (t_2 - t_2)} * S_x \quad (2.8)$$

де a_e , b_e і a , b – коефіцієнти в поліноміальній залежності $\lambda(T)$, яка визначає, відповідно, теплопровідність гарнісажу і футерівки в залежності від їх температури.

Для обчислення товщини гарнісажу (S_e) за рівнянням (2.8) необхідно знати залежності коефіцієнта теплопровідності гарнісажу від температури на горизонтах установки термопар ($\lambda_e = f(t)$). Залежності коефіцієнту теплопровідності гарнісажу від температури, отримані на підставі відбору проб гарнісажу на

горизонтах верхньої і нижньої половини охолоджувальної частини шахти, мають вигляд:

для нижньої половини охолоджувальної частини шахти ($B/H < 0,5$):

$$\lambda_2 = - 5,41 \cdot 10^{-3} \cdot t_i + 7,705, \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \quad (2.9)$$

для верхньої половини охолоджувальної частини шахти ($B/H > 0,5$):

$$\lambda_2 = - 15,665 \cdot 10^{-3} \cdot t_i + 14,085, \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \quad (2.10)$$

де B/H – відношення відстані від нижньої кромки захисних плит колошника (рівень установки термопар периферійного газу) до горизонту замірів **В** до висоти від рівня повітряних фурм до нижньої кромки захисних плит колошника **Н**.

Температура внутрішньої поверхні футерівки печі ($t_{\text{гар}}$), що дотикається до гарнісажу, може бути обчислена за формулою:

$$t_{\text{гар}} = t_{\text{вн.ст.}} + q \cdot S_{\phi} / \lambda_{tx} \quad (2.11)$$

де q – питома теплове навантаження на футерівку, що обчислюється за формулою (2.6), Вт/м²; S_{ϕ} – залишкова товщина футерівки, м; λ_{tx} – теплопровідність футерівки при температурі t_x (°C), яка визначається за показаннями термopар, закладеної найбільш близько до зовнішньої поверхні футерівки, Вт/м·К.

Блок-схема алгоритму розрахунку величини розпалу футерівки та товщини гарнісажу, що утворюється на її поверхні (настилу), із використанням виведених вище формул, представлена на рис. 2.7. У разі «нормальної» роботи печі (немає перехідних режимів і т.д.) розрахунок за алгоритмом проводиться по середньодобовим/середньогодинним даним.

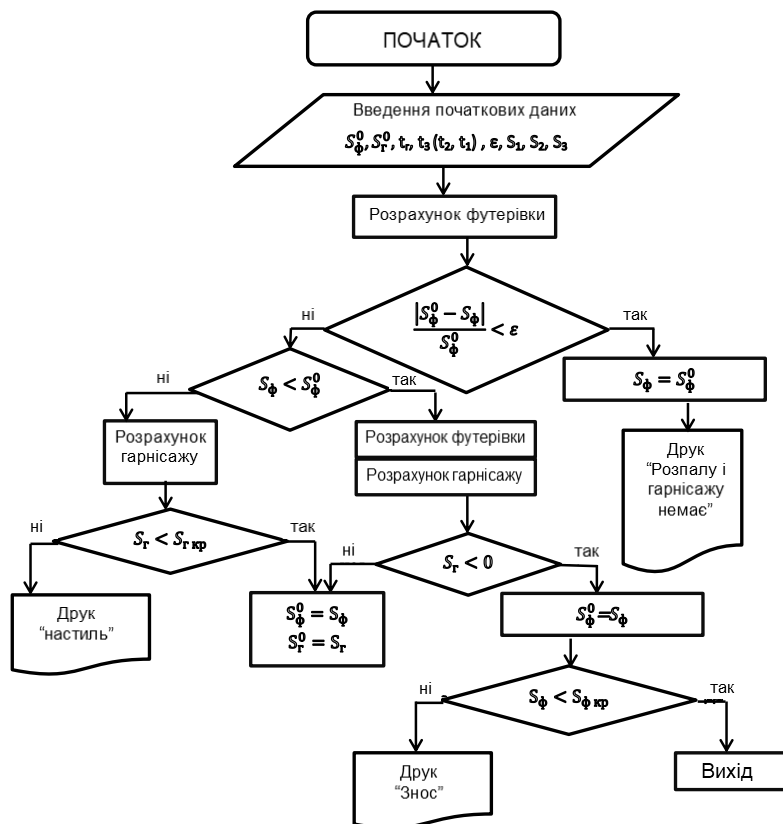


Рис. 2.7 – Блок-схема алгоритму розрахунку залишкової товщини футерівки та гарнісажу

S_{ϕ}^0 – початкова (в попередній момент часу) товщина футерівки; S_2^0 – початкова (в попередній момент часу) товщина гарнісажу; S_3, S_2, S_1 – глибина закладення термопар; $S_{\phi_{кр}}$ – товщина футерівки, після досягнення якої відсутня можливість контролювати зміну товщини футерівки або гарнісажу; $S_{r_{кр}}$ – товщина гарнісажу, що перевищує допустиму величину; t_r – температура пристінкового газу; t_3, t_2, t_1 – температура по даним термопар

Для визначення тільки розпалу футерівки та збільшення надійності (відновлення) роботи САК «Шахта» застосовується алгоритм, який засновано на використанні інформації про технічні характеристики термопар, даних про глибину їх закладання в футерівку та їхніх показаннях (рис. 2.8).

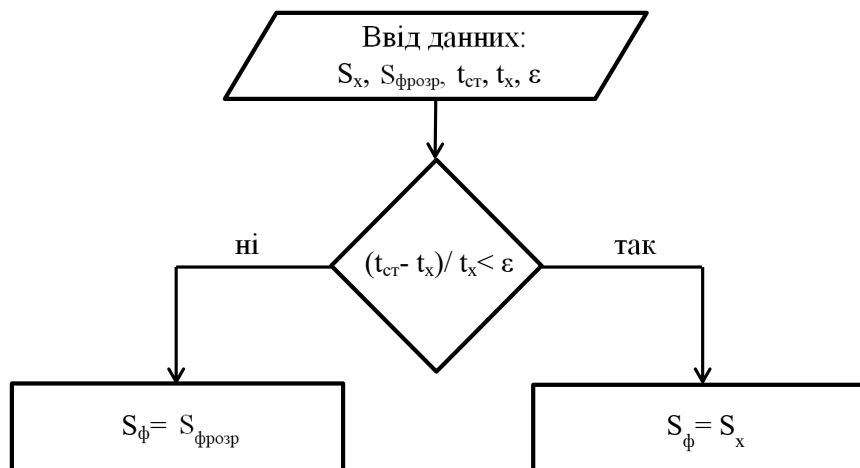


Рис. 2.8 – Алгоритм перевірки розрахункових даних товщини футерівки, де: S_x – глибина закладки термопари, $S_{\text{фрозр}}$ – товщина футерівки по розрахунку, $t_{\text{ст}}$, t_x – температури зовнішнього стінки футерівки і термопари близької до неї відповідно, ε – допустиме відхилення рівності температур

Особливістю даного методу розрахунку товщини футерівки є порівняння температури на зовнішній стінці футерівки з температурою близької до неї термопари. Якщо температури наблизяться по значенням і в певний момент будуть рівні або рівні з допустимим відхиленням ε – це буде означати, що футерівка зруйнована до глибини закладки даної термопари.

Визначити розпал футерівки, коли товщина футерівки зменшилася до рівня закладки, наприклад, термопари ближчої до робочої поверхні футерівки, дозволяє рівняння (2.12):

$$(t_{\text{ст}} - t_x) / t_x < \varepsilon \quad (2.12)$$

де t_{cm} – розрахункова температура на поверхні стінки по поліному, t_x – показання крайньої до робочої поверхні термопар, ε – допустиме відхилення рівності температур.

Виконання умови (2.12) дозволяє визначити момент, коли товщина футерівки зменшилася до рівня закладки термопар, з якої проводиться порівняння температури на стінці.

Для визначення розпалу футерівки запличиків (горизонт 1) застосовується алгоритм, який базується на використанні інформації про технічні характеристики термопар, даних про глибину їх закладання в футерівку та їхніх показаннях (рис. 2.9).

Особливістю даної методики розрахунку товщини футерівки є те, що вона заснована виключно на закономірностях теплообмінних процесів в стінці футерівки і не вимагає розрахунку теплообміну між футерівкою і робочим простором доменної печі.

Визначити розпал футерівки, коли товщина футерівки зменшилася до рівня закладки, наприклад, внутрішньої термопар №3 (ближньої до робочої поверхні футерівки) можна при застосуванні умови (2.13):

$$|(\Delta T_1 / \Delta T_{cp} - 1)| > \varepsilon, \quad (2.13)$$

де $\Delta T_1 = T_2 - T_1$, $\Delta T_2 = T_3 - T_2$, $\Delta T_{cp} = (\Delta T_2 + \Delta T_1) / 2$

Виконання умови (2.14) дозволяє визначити момент, коли товщина футерівки зменшилася до рівня закладки термопар №2:

$$|(T_3 / T_2 - 1)| < \varepsilon \quad (2.14)$$

Виконання умови (2.15) дозволяє визначити момент, коли товщина футерівки зменшилася до рівня закладки термопар №1:

$$|(T_2 / T_1 - 1)| < \varepsilon \quad (2.15)$$

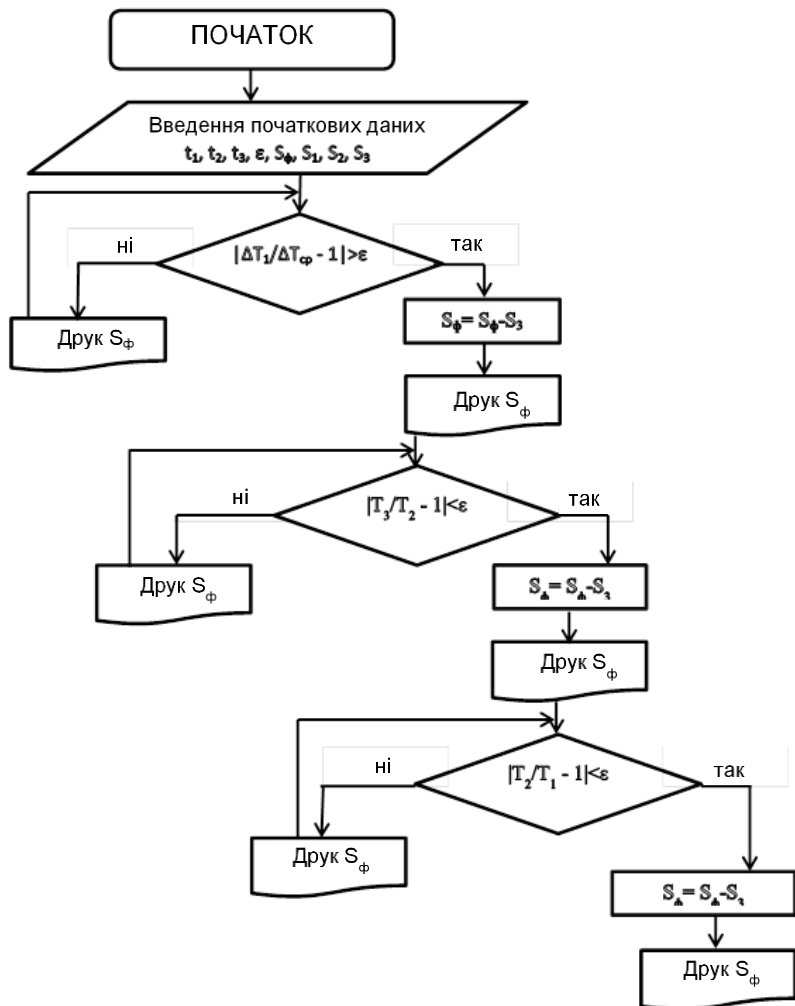


Рис. 2.9 – Блок-схема алгоритму контролю зношення футерівки заплечиків

t_1, t_2, t_3 – показання термопар, S_{ϕ} – повна товщина футерівки, S_1 – відстань між термопарами 1 і 2 по товщині футерівки, S_2 – відстань між термопарами 2 і 3 по товщині футерівки, S_3 – відстань між термопарою 3 і простором печі, $\epsilon=0,15$

2.2 Аналітичне дослідження теплової роботи периферійної зони шахти і стану футерівки із використанням запропонованого методу

Розрахунок проводився за технічними характеристиками доменної печі об'ємом 1513 м^3 , нижня частина шахти якої до половини охолоджується системою випарувального охолодження, а верхня частина – технічною водою.

Розташування горизонтів контролю – місць установки термопар по висоті шахти доменної печі – представлено на рисунку 2.10.

Умови теплової роботи футерівки шахти задавалися питомими тепловими навантаженнями q і температурою периферійних газів $t_{\text{п}}$. В таблиці 2.1 представлено тип і товщину футерівки, її теплопровідність і глибину закладки термопар. На заданих відмітках по висоті печі в футерівку закладаються по три термопар (рис. 2.1). Термопар встановлені з таким розрахунком, щоб при виході з ладу однієї з трьох термопар, розташованих в одній трубці, інші дві, які залишилися, продовжували функціонувати [10].

У розрахунку прийнято, що температура на робочій стінці футерівки дорівнює температурі пристінкового газу ($t_n = t_z$), а показання периферійних термопар рівні $t_n = 200\text{-}600 \text{ }^\circ\text{C}$. Розрахунок

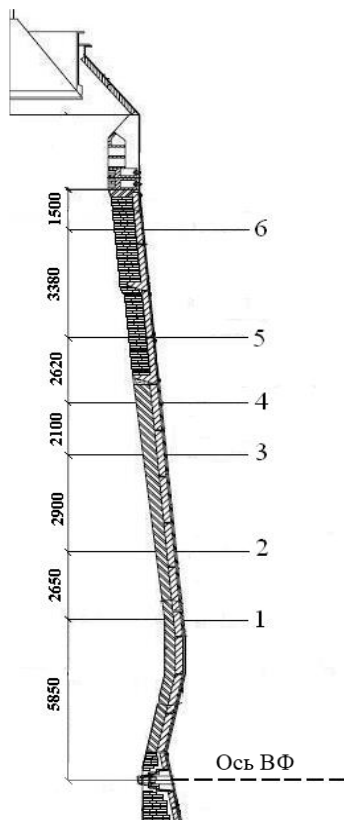


Рис. 2.10 – Схематичний вид розрахункової області шахти доменної печі

температури пристінкового газу, що дорівнює температурі робочої стінки футерівки для кожного з горизонтів, виконувався з використанням температури периферійних газів.

Значення питомих теплових навантажень для кожного горизонту, при максимальній відповідності можливим реальним показанням, розраховані в широких діапазонах. Отримані значення в подальшому дають максимальну адекватність розрахункових даних. Це узгоджується з дослідженнями теплових втрат в шахті ДП, проведених раніше на печах різного об'єму [10]. Дані значення були задані як початкова умова для подальшого варіювання величини питомих теплових навантажень.

Таблиця 2.1 – Параметри футерівки на кожному горизонті

№ горизонту	Глибина закладки термопар в перерізі, м	Матеріал	Товщина футерівки по горизонтам, м
1	0,05/0,15/0,25	Бетон теплопровідністю 5,8 Вт/м·К	0,316
2	0,05/0,15/0,25		0,372
3	0,05/0,15/0,25	Бетон теплопровідністю 1,5 Вт/м·К	0,430
4	0,05/0,15/0,25		0,500
5	0,15/0,25/0,35	Шамотні матеріали, 2 Вт/м·К	0,690

Розрахунок температурних показників термопар у футеровці проведено із варіюванням наступних параметрів:

- питомі теплові навантаження (збільшення в 1,5 рази і зменшення в 2 рази відносно до початкового значення);
- температура периферійних газів (збільшення і зменшення на 200°C щодо початкового значення – 400°C);
- товщина футерівки (зменшення в процентному співвідношенні від початкової товщини до 10%).

Зміна питомих теплових навантажень

Розрахунок показань термопар при різних теплових навантаженнях на систему охолодження доменної печі виконано при температурі пристінного газу, визначеної при температурі периферійних газів $t_n = 400^\circ\text{C}$.

Встановлено вплив питомих теплових навантажень на розподіл температур по товщині футерівки. Збільшення питомих теплових навантажень призводить до більш нерівномірного температурного градієнту як по висоті печі, так і по товщині футерівки. При зменшенні питомих теплових навантажень абсолютні значення температури в футерівці збільшуються (рис. 2.11).

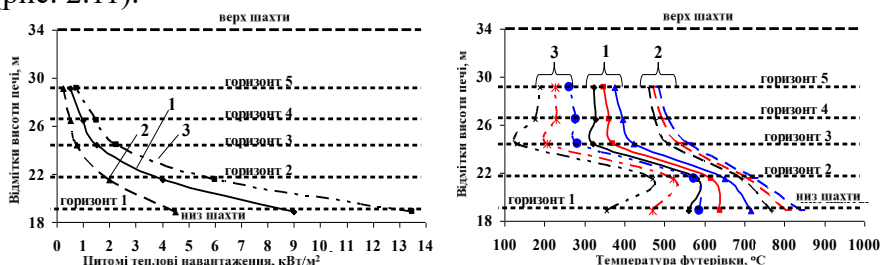


Рис. 2.11 – Зміна питомих теплових навантажень та показань термопар

Теплові навантаження: 1 – початкові значення; 2 – зменшення в 2 рази; 3 – збільшення в 1,5 рази

Зміна температури периферійних газів

Збільшення температури периферійних газів супроводжується збільшенням температур в самій футерівці і згладжуванню температурного градієнту по висоті печі (рис. 2.12).

При незмінних питомих теплових навантаженнях і незмінною товщиною футерівки зміна температур на робочій стінці футерівки не впливає на зміну температурного градієнта по товщині футерівки.

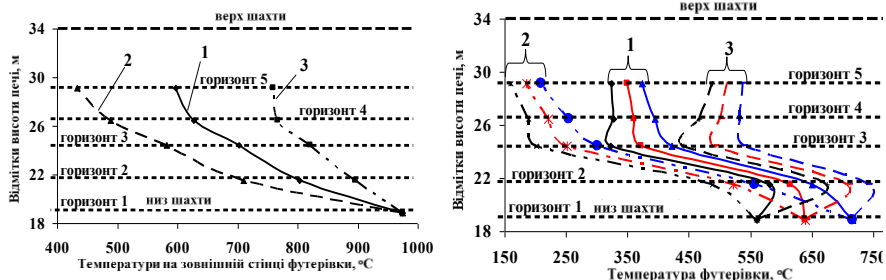


Рисунок 2.12 – Зміна температури робочої поверхні футерівки та показань термопар

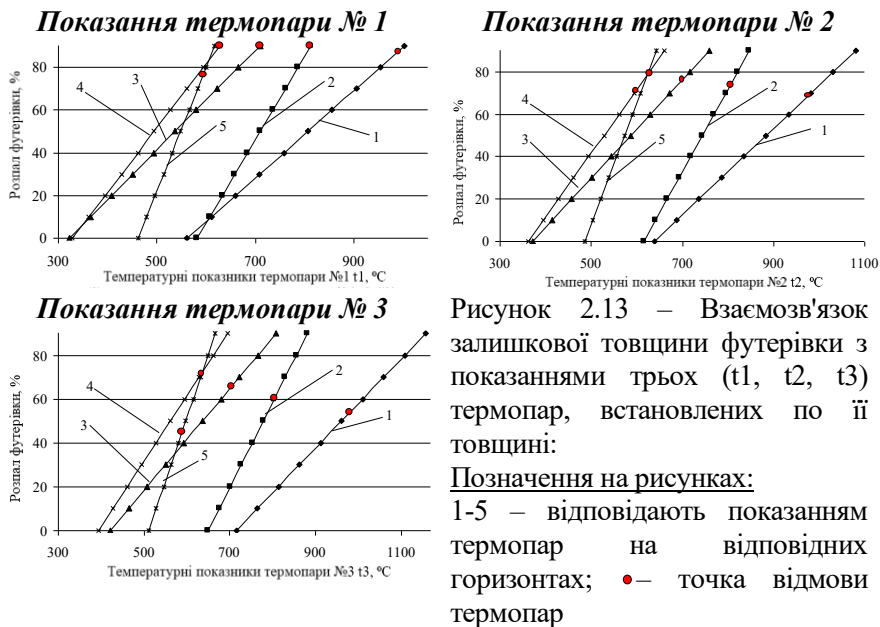
Температура периферійних газів: 1 – $t_n = 400^\circ\text{C}$; 2 – $t_n = 200^\circ\text{C}$; 3 – $t_n = 600^\circ\text{C}$

Зміна товщини футерівки

Виконано розрахунок показань термопар при зміні товщини футерівки і незмінних питомих теплових навантажень та температурах робочої стінки футерівки з урахуванням початкового розподілу температур по товщині футерівки. Розпал задавався в процентному співвідношенні щодо початкової товщини від 0% до 90% (0% – ціла футерівка). Враховувалося, що при розпалі футерівки починали виходити з ладу закладені в неї термопари (рис. 2.13).

Якщо розрахункові показання термопар вище або дорівнюють температурі зовнішньої стінки футерівки – це означає, що дані показання не можуть бути адекватними реальності процесам теплообміну і це є показником того, що термопара не є робочою (рис. 2.13).

На підставі серії розрахунків встановлено перспективність даного методу як для первинного аналізу, так і для розвитку та реалізації автоматизованого контролю за станом футерівки шахти доменної печі [70].



2.3 Модель контролю теплової роботи периферійної зони і розпалу футерівки печі (САК «Шахта»)

Розроблений метод контролю теплової роботи і розпалу футерівки шахти було покладено в основу системи автоматизованого контролю теплової роботи і розпалу футерівки шахти САК «Шахта».

У період з 2014 по 2020 рр. 3 печі доменного цеху ПАТ «Запоріжсталь» та 2 печі ПрАТ «МК «Азовсталь» за технологічним завданням ІЧМ НАНУ було оснащено системами автоматизованого контролю розпалу футерівки шахти (САК «Шахта»). Це дозволило обґрунтовано оцінювати вплив технічних, конструкційних та технологічних рішень на стан футерівки і тривалість кампанії цих доменних печей.

Основними функціями розробленої САК «Шахта» є:

1. Відображення трендів зміни температури футерівки по рівням установки термопар.

2. Розрахунок і відображення трендів локальних питомих теплових навантажень на футерівку шахти в місцях установки термопар;

3. Розрахунок і відображення трендів залишкової товщини футерівки та утвореного гарнісажу в місцях установки термопар.

4. Відображення горизонтальних і вертикальних профілів розпалу футерівки та утворення гарнісажу по периметру шахти печі по рівням установки термопар.

5. Відображення розгортки профілю шахти і теплових навантажень у кольоровій шкалі.

6. Своєчасне визначення та запобігання розпалу футерівки і утворення настилів, розладів у тепловій роботі печей.

7. Забезпечення інженерно-технічного персоналу інформацією, що дозволяє своєчасно стежити за станом футерівки доменної печі, товщиною утвореного гарнісажу і питомих теплових навантажень та впливати на них.

Вибір точок контролю на доменних печах обирається індивідуально в залежності від особливостей конструкції доменної печі, розташування холодильних плит та її футерівки.

САК «Шахта» дає можливість в автоматизованому режимі контролювати динаміку зміни товщини футерівки та гарнісажу, теплових навантажень і температур футерівки в точках контролю та виводити дану інформацію на екран для технологів доменної печі (рис. 2.14).

Розділ 2. Метод і модель контролю теплової роботи периферійної зони і розпалу футерівки шахти

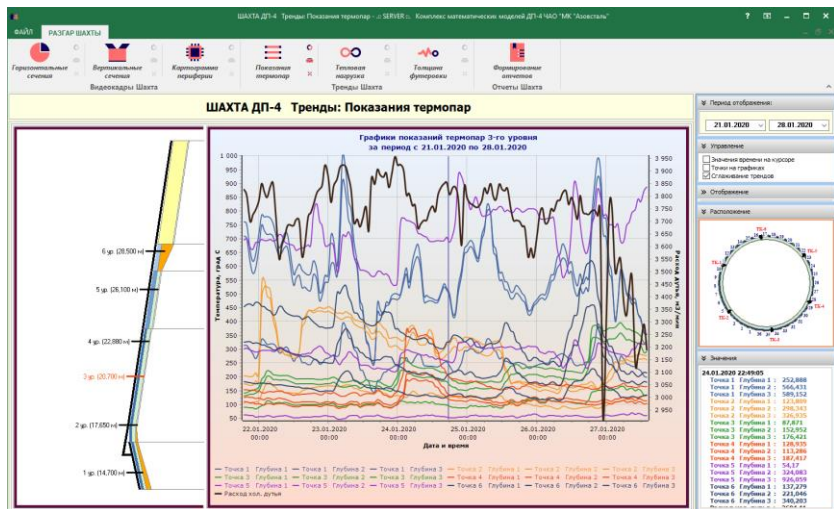


Рисунок 2.14 – Приклад відеокадру трендів

Теплові навантаження, товщина футерівки та гарнісажу виводиться на відеокадри вертикальних та горизонтальних перерізів в залежності від розташування точок контролю та на картограму периферії при виборі дати (рис. 2.15-2.17).

На рисунку 2.18 наведено приклад звіту про залишкову товщину футерування, гарнісажу та сумарну їх товщину (профіль) за добу.

Залишкова товщина футерівки формується за даними останнього розрахунку обраної дати, проведеного за середньогодинними параметрами, товщина гарнісажу наводиться за середньою за 24 години величиною, сумарна товщина футерівки і гарнісажу (профіль) виходить в результаті підсумовування вищеписаних значень. У таблиці також вказана інформація про вихідну товщину футерівки та її тип на кожному горизонті контролю. У полі звіту діє умовне форматування для товщини футерування та гарнісажу: для футерування – застосована триколірна шкала від зеленого (проектна товщина футерування) до червоного (0 мм) через жовтий (половина

проектної товщини футерування); для гарнісажу – двокольорова шкала від білого (0 мм) до синього (300 мм та більше).

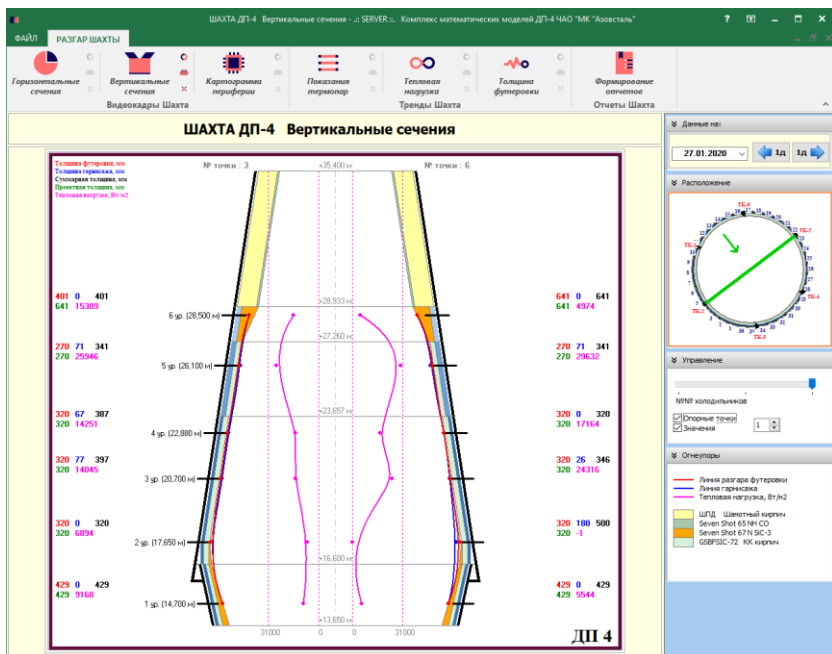


Рисунок 2.15 – Приклад відеокадру вертикального перерізу профілю розпалу футерівки шахти

Розділ 2. Метод і модель контролю теплової роботи периферійної зони і розпалу футерівки шахти

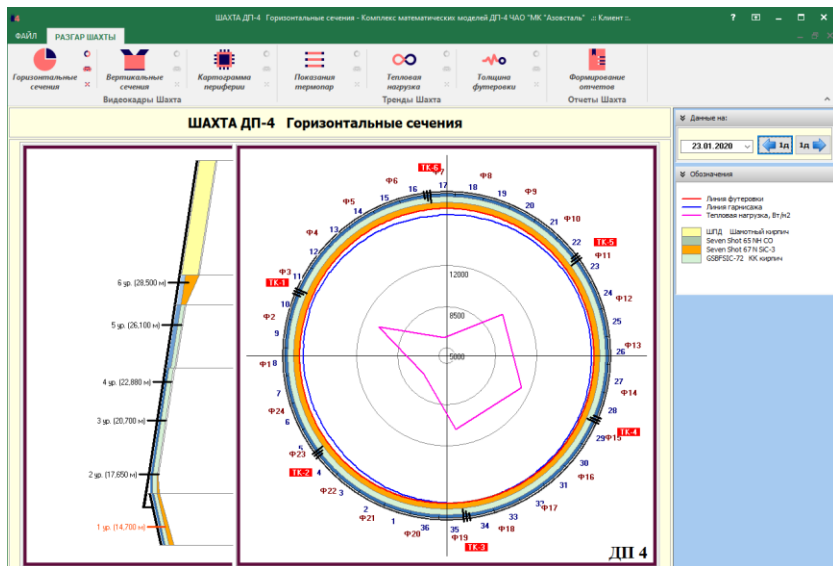


Рисунок 2.16 – Приклад відеокадру горизонтального перерізу профілю розпалу футерівки шахти

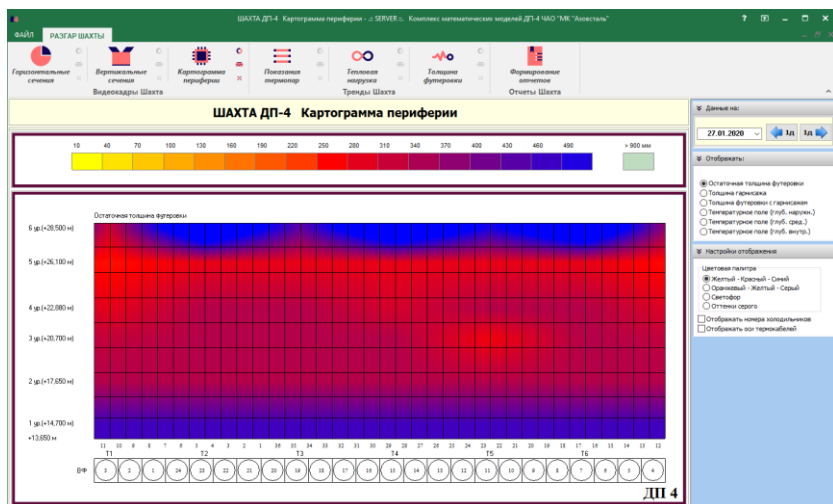


Рисунок 2.17 – Приклад відеокадру картограми периферії шахти

Горизонт	Отметка и ряд ХП		Параметр контроля	Точка контроля по окружности (1 - ось ЛД)						Проектная толщина футеровки
				1	2	3	4	5	6	
6	Отметка 28,500 м	7 ряд ХП шахты	Остаточная толщина футеровки, мм	200	180	150	120	150	200	641 ¹
			Толщина гарнисажа, мм	220	100	140	110	110	110	
			Суммарная толщина, мм	420	280	290	230	260	310	
5	Отметка 26,100 м	6 ряд ХП шахты	Остаточная толщина футеровки, мм	225	200	150	120	130	190	270 ²
			Толщина гарнисажа, мм	200	170	20	110	0	0	
			Суммарная толщина, мм	425	370	170	230	130	190	
4	Отметка 22,880 м	4 ряд ХП шахты	Остаточная толщина футеровки, мм	350	200	50	120	50	210	320 ³
			Толщина гарнисажа, мм	110	170	180	100	100	100	
			Суммарная толщина, мм	460	370	230	220	150	310	
3	Отметка 20,700 м	3 ряд ХП шахты	Остаточная толщина футеровки, мм	290	180	40	100	120	300	320 ³
			Толщина гарнисажа, мм	0	15	15	30	25	30	
			Суммарная толщина, мм	290	195	55	130	145	330	
2	Отметка 17,650 м	1 ряд ХП шахты	Остаточная толщина футеровки, мм	310	100	120	60	150	320	320 ³
			Толщина гарнисажа, мм	65	15	25	100	0	0	
			Суммарная толщина, мм	375	115	145	160	150	320	
1	Отметка 14,700 м	1 ряд ХП заплечики	Остаточная толщина футеровки, мм	310	250	200	210	320	360	429 ⁴
			Толщина гарнисажа, мм	0	105	75	10	40	10	
			Суммарная толщина, мм	310	355	275	220	360	370	
1 - Торкретбетон										
2 - Карбидокремниевый кирпич 200 мм + Торкретбетон 70 мм										
3 - Карбидокремниевый кирпич 250 мм + Торкретбетон 70 мм										
4 - Карбидокремниевый кирпич 250 мм + Торкретбетон 179 мм										

Рисунок 2.18 – Приклад звіту «Залишкова товщина футерівки, гарнісажу та їх сумарна товщина (профіль)» за добу

2.4 Використання інформації САК «Шахта» в доменному виробництві

Інформація з САК «Шахта» дозволила розширити розуміння про вплив технологічного режиму доменної плавки на зміну товщини футерівки доменної печі, оцінити особливості

утворення гарнісажу в шахті доменної печі, забезпечити технологічний персонал інформацією для оперативного управління доменною плавкою. Це дозволило збільшити ресурс роботи доменної печі та надало інформацію щодо проведення відновних ремонтів футерівки шахти.

2.4.1 Вплив витрат ПВП на розпал футерівки, теплові втрати та витрат коксу на їх компенсацію

З використанням інформації від систем автоматизованого контролю розпалу футерівки шахти (САК «Шахта») та сумарних теплових втрат у системах їх охолодження (САК «Теплові втрати») доменних печей ПАТ «Запоріжсталь» виконано аналіз впливу збільшення витрат пиловугільного палива на розпал футерівки, зміни теплових втрат і витрат коксу на їх компенсацію на доменних печах ПАТ «Запоріжсталь».

Збільшення витрат ПВП з 18 до 22 т/год на ДП №4 призвело до повного руйнування футерівки з торкретбетону в нижній частині шахти, охолоджувальної чавунними холодильними плитами протягом перших чотирьох-п'яти місяців від задувки ДП №4. Активний розпал футерівки привів до збільшення в 2 рази і більше теплових втрат в СВО шахти ДП №4, що відповідало збільшенню витрат коксу на їх компенсацію з 15 до 25 кг/т (рис. 2.19) [5, 19].

Експлуатація систем ІЧМ в доменному цеху ПАТ «Запоріжсталь» підтвердила, що при вдуванні ПВП найбільш схильними до руйнування футерівки є заплечики, розпар і нижня частина шахти [5, 11, 12, 28].

Перехід, під час відновлювальних ремонтів та реконструкцій доменних печей ПАТ «Запоріжсталь», до використання комбінованих систем охолодження, із застосуванням мідних холодильних плит і високотеплопровідної карбідокремнієвої футерівки в нижній частині шахти і чавунних холодильних плит і ШПД – у верхній, дозволив збільшити ресурс роботи шахти доменних печей. Проте, тенденція негативного

впливу «підвищеної» витрати ПВП на технічний стан футерівки збереглась.

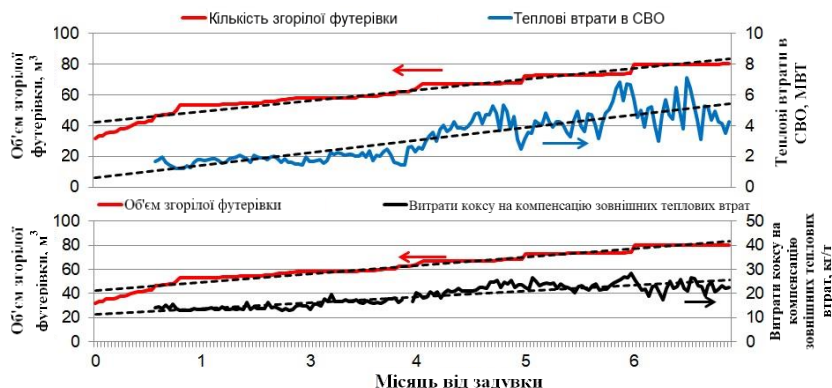


Рисунок 2.19 – Вплив розпалу футерівки на збільшення теплових втрат в СВО шахти ДП №4 і витрат коксу на їх компенсацію за перші 6 місяців після задувки печі

Аналіз даних з систем САК «Теплові втрати» і САК «Шахта» показав, що збільшення витрат ПВП в доменному цеху ПАТ «Запоріжсталь» зі 140 до 160 кг/т призвело до збільшення теплових втрат доменних печей і витрат коксу на їх компенсацію. На основі цих даних виконано аналіз впливу витрат ПВП на стан футерівки, теплові втрати в системі охолодження і витрат коксу на їх компенсацію на доменних печах №3 і №4 ПАТ «Запоріжсталь».

Найбільший вплив збільшення витрат ПВП з 20 до 24 т/год спричинило на стан футерівки, теплові втрати і витрат коксу на їх компенсацію на ДП №4. Збільшення витрат ПВП призвело до зменшення залишкової товщини футерівки шахти і розпару з 73% до 59% (рис. 2.20). Основний знос футерівки стався в розпарі та нижній частині шахти до відмітки печі +24,600 м (6 ряд холодильних плит шахти).



Рисунок 2.20 – Динаміка змін витрат ПВП і залишкової товщини футерівки шахти і розпару ДП №4

Внаслідок збільшення витрат ПВП і зносу футерівки, що послідував за ним, відбулося збільшення теплових втрат в системі охолодження з ~ 8 до 12 МВт і більше з піками до 15 МВт. Збільшення теплових втрат у системі охолодження призвело до збільшення витрат коксу на їх компенсацію з 15 до 20-25 кг/т (рис. 2.21).

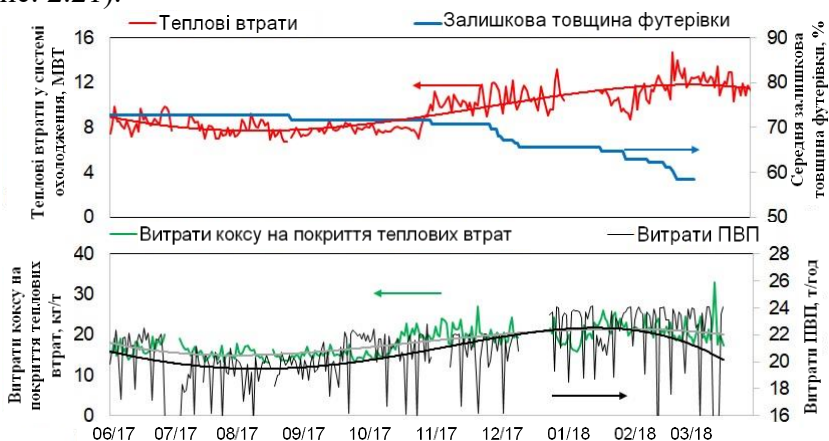


Рисунок 2.21 – Динаміка зміни витрат ПВП, теплових втрат в системі охолодження, витрат коксу на їх компенсацію та залишкової товщини футерівки шахти і розпару ДП №4

На ДП №3 поступове збільшення витрат ПВП з 22 до 25 т/год збігається з поступовим зменшенням середньої залишкової товщини футерівки в шахті з 80 до 70% і, як наслідок,

збільшенням теплових втрат в системі охолодження з 18 до 20 МВт з піками до 23 МВт, при цьому витрати коксу на компенсацію теплових втрат змінюються в межах від 32 до 38 кг/т чавуну (рис. 2.22).

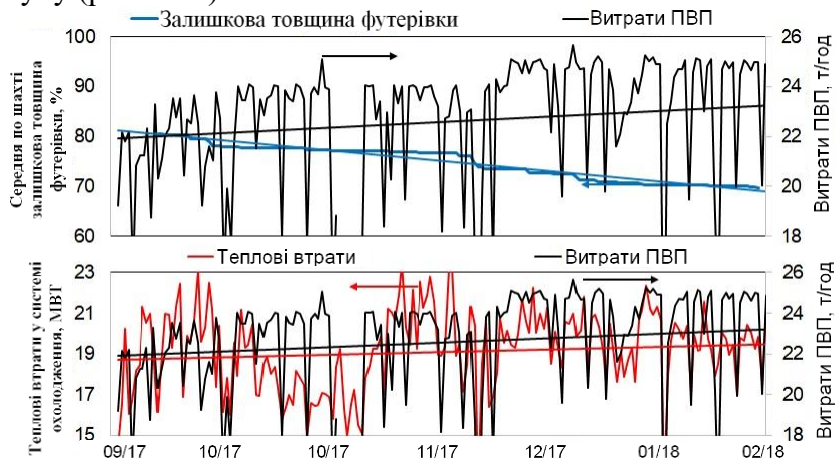


Рисунок 2.22 – Динаміка змін витрат ПВП, теплових втрат в системі охолодження і залишкової товщини футерівки шахти і розпару ДП №3

У порівнянні з ДП №4, на ДП №3 збільшення теплових втрат зі збільшенням витрат ПВП є помірним – на 2 МВт, проти 4 МВт на ДП №4. Це може бути пов'язано з наявністю стабільного гарнісажного шару завтовшки в ~50 мм і більше, спочатку з більшими на 10 МВт тепловими втратами на ДП №3 в порівнянні з ДП №4, що, в свою чергу, обумовлено особливостями режиму завантаження (більш розвинений периферійний газовий потік), більшою площею охолодження шахти попередньо футерованими мідними холодильниками, тонкостінною високотеплопровідною футерівкою і, відповідно, великим відведенням тепла системою охолодження.

2.4.2 Порівняльний аналіз теплової роботи і розпалу футерівки шахти ДП №3 з ДП №2 і ДП №4 ПАТ «Запоріжсталь»

За результатами роботи систем автоматизованого контролю теплової роботи і розпалу футерівки шахти (САК «Шахта») в доменному цеху ПАТ «Запоріжсталь» було виконано співставлення розпалу футерівки (рис. 2.23) і швидкості її зносу (рис. 2.24), питомих теплових навантажень (рис. 2.25) і утворення гарнісажу (рис. 2.26) в шахтах ДП №2, ДП №3 і ДП №4 старої і нової конструкції за перші п'ять місяців експлуатації печей від моменту їх задувки після капітального/відновлювального ремонту.

Досвід експлуатації систем в доменному цеху ПАТ «Запоріжсталь» підтвердив концепцію, яка розвивається в ІЧМ [11], що найбільш схильною до руйнування футерівки зоною, при вдуванні ПВП, є розпар і нижня частина шахти.

Найбільший розпал футерівки, через п'ять місяців експлуатації печей (рис. 2.23), спостерігався в нижній частині шахти і розпарі ДП №4, футерований торкретбетоном поверх чавунних холодильних плит, і становив 100% і 65% відповідно. Найменший знос в даній зоні відзначено на ДП №2, який склав 7-8%.

На ДП №3 в нижній частині шахти і в розпарі розпал футерівки склав 29-30% від початкової товщини футерівки, однак варто відзначити, що такий істотний знос футерівки обумовлений швидким зносом захисного шару торкретбетону, нанесеного поверх вмонтованого в ХП карбідкремнієвої цегли. Знос ж самого карбідкремнію склав до 10% від його первісної товщини (4-7% від загальної товщини футерівки). Подібна ситуація спостерігалася і на ДП №4, де на позначці +18,685 комбінована футерівка була зношена на 56% в результаті інтенсивного зносу шару торкретбетону нанесеного на карбідкремнієву цеглу, при цьому в зазначений період знос карбідкремнієвої футерівки не спостерігався.

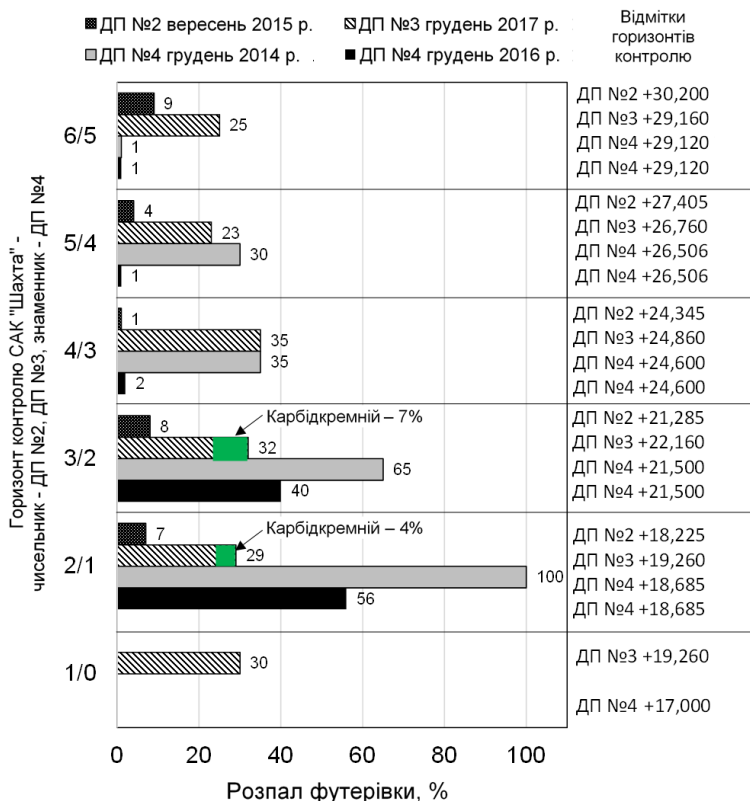


Рисунок 2.23 – Зіставлення середнього по окружності печі відсотку розпалу футерівки шахти ДП №2, ДП №3, ДП №4 (2014) і ДП №4 (2016) через п'ять місяців експлуатації печей від моменту їх задувки після капітального/відновлювального ремонту

У середній і верхній частинах шахти найбільший знос футерівки відмічено у шахті ДП №4 конструкції 2014 р. футерованої торкретбетоном (30 і 35%) і на ДП №3 (23-35%) футерованої в даній зоні ШПД. На ДП №2 знос ШПД в даній зоні склав до 9% (неохолоджувана частина).

Істотна різниця між ДП №2 і ДП №3 в зносі футерівки середньої та верхньої частин шахти може бути викликана

нестабільною роботою ДП №3 в період її задувки і виходу на проєктні показники, що могло вплинути на стійкість футерівки у даній зоні. Вибір більш теплопровідного торкретбетону при відновленні футерівки середньої частини шахти ДП №4 дозволив істотно зменшити його знос в даній зоні за вказаний період (1-2%), однак на поточний момент вона також зазнала суттєвого зносу.

За даними про розпал футерівки з САК «Шахта» була отримана середня швидкість зносу футерівки по висоті (рис. 2.24) за період перших п'яти місяців від початку експлуатації печей. Найбільша швидкість зносу футерівки (від 55 до 73 мм/міс.) Відповідає торкретбетону в нижній частині шахти і розпару ДП №4.

В цілому, за розглянутий період, футерівка з торкретбетону має найвищі показники по швидкості зносу, особливо в нижній частині шахти і розпару. Футерівка з карбідкремнію має мінімальну швидкість зносу, яка в залежності від виконання (вмонтована в холодильник або кладку) варіюється від 3 до 9 мм/міс. відповідно.

Швидкість зносу ШПД варіюється в широких межах від 0 до 40 мм/міс., і, як у випадку з ДП №3, більшою мірою залежить від механічних впливів при роботі в нестабільних умовах. Також після проведення реконструкції ДП №4 в 2016 р. футерівка із торкретбетону в середній частині шахти, за період в перші п'ять місяців, мала мінімальну швидкість розпалу.

З наведеного вище впливає висновок, що найбільш перспективним напрямком у виборі конструкції і матеріалів системи охолодження і футерівки, в заплечиках і до середини шахти є застосування мідних охолоджувальних елементів та високотеплопровідної футерівки із карбідкремнієвих вогнетривів, вмонтованих у холодильну плиту. У середині шахти було рекомендовано випробувати один або два ряди сталевих холодильних плит футерованих вмонтованим карбідкремнієвим

вогнетривом. З середини шахти і до колошника доцільним є використання чавунних холодильних плит з вмонтованим ШПД.

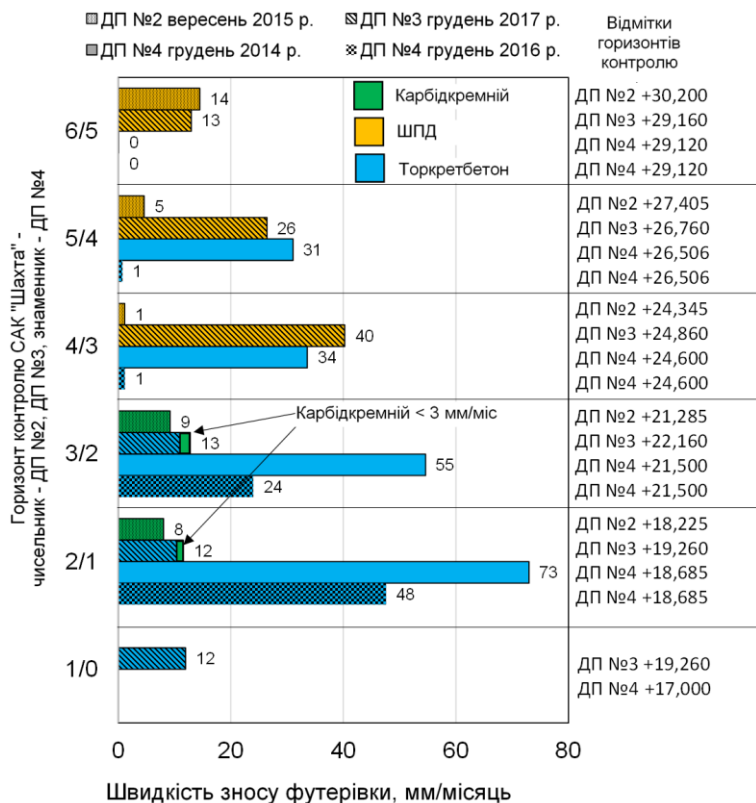


Рисунок 2.24 – Зіставлення середньої швидкості зносу футерівки по висоті для різних матеріалів футерівки шахти ДП №2, ДП №3, ДП №4 через п'ять місяців експлуатації печей від моменту їх задувки після капітального/відновлювального ремонту

Величина питомих теплових навантажень на футерівку і систему охолодження залежить від теплообмінних процесів, що розвиваються в периферійній зоні доменної печі, матеріалів футерівки і конструкції системи охолодження.

Найбільші питомі теплові навантаження, за даними САК «Шахта», спостерігаються в заплечиках, розпару та нижній частині шахти і мають тенденцію до різкого зменшення вище середньої частини шахти (рис. 2.25).

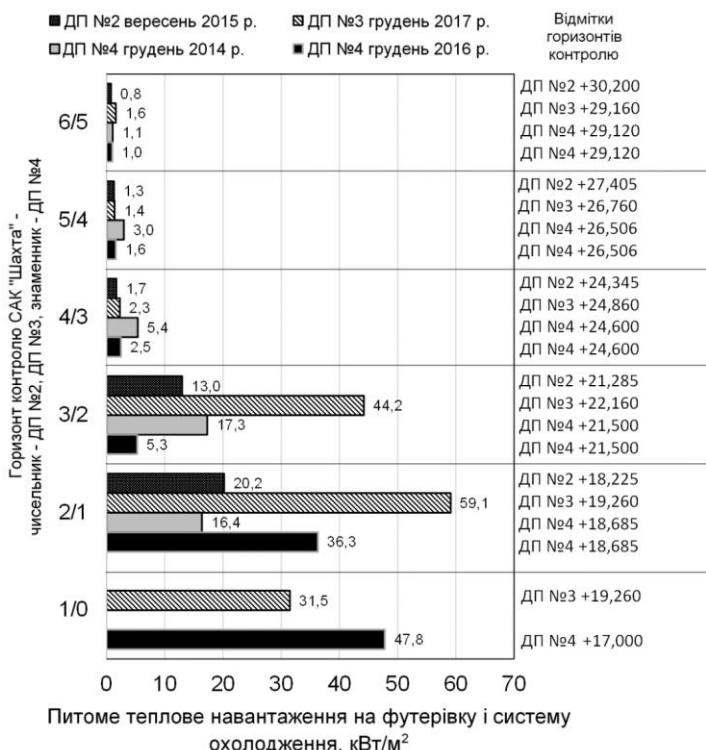


Рисунок 2.25 – Розподіл питомих теплових навантажень на футерівку та системи охолодження ДП №2, ДП №3, ДП №4*

* Для ДП №4 старої конструкції (зверху) з огляду на розпал футерівки і, як наслідок, виходу з ладу термопар питомі теплові навантаження взято за останній період роботи термодатчиків

Найбільші питомі теплові навантаження в розпарі та нижній частині шахти відзначено на ДП №3 (до 60 кВт/м²), найменші – на ДП №4 (до 18 кВт/м²).

У середній частині шахти максимальні теплові навантаження спостерігалися на ДП №4 конструкції 2014 р. футерованної торкретбетоном, який має велику теплопровідність, ніж ШПД на ДП №2 і ДП №3.

У верхній частині шахти найбільші питомі теплові навантаження спостерігаються на ДП №3 (до $1,6 \text{ кВт/м}^2$).

На ДП №3 питомі теплові навантаження на футерівку і ХП заплечиків менше, ніж на ДП №4 з огляду на те, що на ДП №3 карбідокремнієві вогнетриви покриті більш низькотеплопровідним торкретбетоном, на відміну від ДП №4, де футерівка складається повністю з карбідокремнієвої цегли.

У розпарі і нижній частині шахти великі питомі теплові навантаження на футерівку ДП №3 в порівнянні з ДП №4 і ДП №2, що обумовлено застосуванням високотеплопровідної тонкостінної футерівки в поєднанні з мідними холодильними плитами, охолоджуваними «холодною» хімічно очищеною водою, а також особливостями режиму завантаження печі.

За інформацією систем автоматизованого контролю середня товщина гарнісажу має тенденцію до зменшення у напрямку від верхньої до нижньої частини шахти, тобто тенденція зворотна розподілу питомих теплових навантажень (рис. 2.26).

Максимальна середня по окружності товщина гарнісажу (290 мм) за п'ятий місяць від моменту задувки спостерігалася на ДП №4 конструкції 2016 року в зоні охолодження шахти технічною водою.

Нижній частині шахти і розпару відповідає мінімальна товщина гарнісажу на всіх доменних печах. Її максимальне значення в даній зоні було відзначено на ДП №4 і склало 80 мм. У розпарі максимальна товщина гарнісажу спостерігалася на ДП №3 і складала 30 мм. На ДП №4 зважаючи на вихід з ладу термопар в розпарі і нижній частині шахти в результаті розпалу футерівки була відсутня можливість визначити товщину гарнісажу. В цілому, по висоті, товщина утвореного гарнісажу на всіх доменних печах має порівняльний порядок.

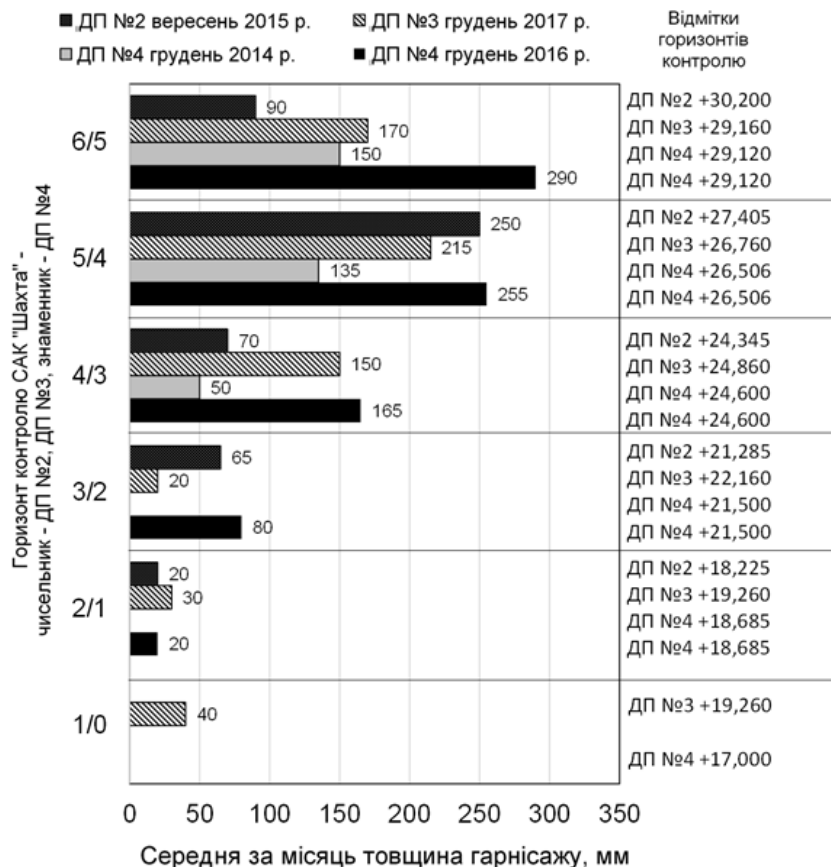


Рисунок 2.26 – Середня по окружності товщина гарнісажу за п'ятий місяць експлуатації ДП №2, ДП №3, ДП №4 від моменту їх задувки після капітального / відновлювального ремонту

РОЗДІЛ 3. МЕТОД І МОДЕЛЬ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ ТА ВИТРАТИ КОКСУ НА ЇХ КОМПЕНСАЦІЮ

Контроль втрат теплоти робочого простору печі вважається третім по важливості серед засобів контролю та автоматизації доменного процесу в світі після контролю витрат залізорудної сировини, коксу і технології відпрацювання продуктів плавки, однак, на жаль, протягом довгого час, автоматизація контролю теплових втрат не отримала поширення в доменному виробництві [6, 7]. За наявною інформацією, на закордонних доменних печах використовується автоматизований контроль теплових навантажень на окремі зони доменної печі, що не дає можливості кількісного контролю на всю піч та визначення витрат коксу на їх компенсацію. Тому розробка і реалізація системи автоматизованого контролю теплових втрат в системі охолодження та витрат коксу на їх компенсацію є актуальною задачею.

3.1 Метод контролю теплових втрат в системі охолодження та витрати коксу на їх компенсацію

Загальні теплові втрати доменної печі ($Q_{\text{сум.}}$) розраховуються по методиці, розробленою ІЧМ [25, 71, 72], і являють собою кількість тепла, відведеного із печі системою охолодження:

$$Q_{\text{сум.}} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (3.1)$$

де Q_i – кількість тепла, що відводиться з різних контурів охолодження/зон доменної печі, МВт; n – кількість контурів охолодження/зон доменної печі.

Використання різних систем охолодження і визначає зміни в алгоритмі та вхідну інформацію, необхідну для розрахунку теплових втрат по зонам печі та доменної печі в цілому (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Вихідна інформація для розрахунку теплових втрат доменної печі в залежності від системи охолодження

Система випарювального охолодження	Система охолодження технічною водою	Система охолодження хімічно очищеною водою (ХОВ)
1. Виробка пара, т/год 2. Температура вхідної води в систему охолодження 3. Температура пару в баках-сепараторах	1. Витрати води 2. Температура вхідної води 3. Температура вихідної води	<i>У контурі охолодження:</i> 1. Витрати ХОВ 2. Температура вхідної ХОВ 3. Температура вихідної ХОВ <i>У контурі теплообмінників (ТО):</i> 1. Витрати ХОВ 2. Температура вхідної із печі ХОВ 3. Температура вихідної із ТО ХОВ 4. Витрати тех. води на охолодження ХОВ 5. Температура вхідної тех. води в ТО 6. Температура вихідної тех. води в ТО

Для автоматизованого вимірювання температури вхідної та вихідної води ІЧМ запропоновано використання занурювальних термометрів опору, які мають меншу похибку, в порівнянні з термопарами, які встановлюються на напірних і зливних трубопроводах системи охолодження печі (рис. 3.1).

Розрахунок теплових втрат в контурі ХОВ/технічної води визначається за формулою (3.3):

$$Q = c \cdot \Delta t \cdot F \quad (3.3)$$

де F – сумарні витрати води в контурі, м³/год; c – теплоємність води, $c=4,187$ кДж/(кг·°С) [73]; Δt – перепад між температурою вихідної і температурою вхідної води в систему охолодження, °С.

Застосування ХОВ дозволяє істотно зменшити витрати води в системі охолодження в порівнянні з технічною (морською) водою, однак вимагає установки теплообмінних апаратів (ТОА) для охолодження ХОВ. При використанні теплообмінних апаратів типу «вода - вода» є можливість додаткового контролю теплових втрат доменної печі через тепло, яке технічна вода забирає у ХОВ в ТОА.



Рисунок 3.1 – Приклад установки термометрів опору для контролю температури води, що виходить із печі

Таким чином, розрахунок теплових втрат доменної печі через ТОА буде визначатися за формулою (3.4):

$$Q = c \cdot \Delta t_{\text{ТОА}} \cdot F_{\text{ТОА}} \quad (3.4)$$

де $F_{\text{ТОА}}$ – сумарні витрати технічної води в ТОА, м³/год;

c – теплоємність води, $c=4,187$ кДж/(кг·°С) [73]; $\Delta t_{\text{ТОА}}$ – перепад між температурою вихідної і температурою вхідної технічної води в ТОА, °С.

Величина теплових втрат є важливим параметром для аналізу ефективності роботи доменної печі при різних шихтових та дуттьових умовах, однак більш важливим є оцінка витрат коксу на компенсацію теплових втрат, яку слід враховувати в теплових та матеріальних балансах доменної плавки.

Для автоматизованого розрахунку витрат коксу на компенсацію теплових втрат необхідно налагодити автоматизоване надходження даних, або їх регулярне ручне введення, наступних параметрів:

- P – продуктивність печі, т/год;
- $t_{\text{дут}}$ – температура дуття, °С;
- O_2 – вміст кисню в дутті, %;
- $t_{\text{кол}}$ – температура колошникового газу, °С.

При відсутності можливості вводу виробництва чавуну можна використовувати розрахункове виробництво чавуну (3.5):

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot \varepsilon_{Fe i}}{\varepsilon_{Fe \text{ чав.}}} \quad (3.5)$$

де F_i – витрати шихти, що завантажується, т/год;

$\varepsilon_{Fe i}$ – вміст заліза в шихті, що завантажується, %

$\varepsilon_{Fe \text{ чав.}}$ – вміст заліза в чавуні, %

Розрахунок питомих теплових втрат (МДж/т чавуну) виконується по формулі (3.6):

$$Q_{\text{пит.}} = \frac{3600 \cdot Q_{\text{сум}}}{P} \quad (3.6)$$

де P – продуктивність печі, т/ч;

$Q_{\text{сум.}}$ – сумарні теплові втрати доменної печі, МВт.

Розрахунок витрат коксу на компенсацію сумарних теплових втрат печі (кг/т) здійснюється по формулі (3.7):

$$K = \frac{100 \cdot Q_{\text{пит.}}}{q \cdot \varepsilon_c \cdot \eta_c} \quad (3.7)$$

де $Q_{\text{пит.}}$ – питомі теплові втрати доменної печі, МДж/т.

q – теплота повного спалювання 1 кг вуглецю, $q=33,412$ МДж/кг;

ε_c – вміст вуглецю в коксі, %

η_c – коефіцієнт використання теплоти палива вуглецю коксу в печі (КВТ), який можна визначити з використанням поліноміальної формули (3.8) [8, 73].

$$\eta_c = \frac{9798 + 0,933 \cdot t_o \cdot \left((-3 \cdot 10^{-8} \cdot t_d^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot t_d + 1,306) + \frac{(100 - O_2)}{O_2} \cdot (4 \cdot 10^{-8} \cdot t_k^2 + 6 \cdot 10^{-5} \cdot t_k + 1,298) \right) + 2475}{33412} - \frac{t_k \cdot \left(1,867 \cdot (2 \cdot 10^{-14} \cdot t_k^4 - 10^{-10} \cdot t_k^3 + 2 \cdot 10^{-7} \cdot t_k^2 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot t_k + 1,298) + \frac{(100 - O_2) \cdot 0,933}{O_2} \cdot (4 \cdot 10^{-8} \cdot t_k^2 + 6 \cdot 10^{-5} \cdot t_k + 1,298) \right)}{33412} \quad (3.8)$$

де t_d – температура дуття, °С; O_2 – вміст кисню в дутті, %; t_k – температура колошникового газу, °С.

3.2 Реалізація системи автоматизованого контролю теплових втрат (САК «Теплові втрати») на доменних печах України

На сьогоднішній день ІЧМ НАНУ займає провідні позиції в Україні щодо реалізації та впровадження на доменних печах систем автоматизованого контролю теплових втрат і витрат коксу на їх компенсацію (САК «Теплові втрати»).

Розроблений метод контролю теплових втрат в системі охолодження було покладено в основу системи автоматизованого контролю теплових втрат і витрат коксу на їх компенсацію САК «Теплові втрати», яка встановлена на 7 доменних печах України ДП №9 ПАТ «АМКР» (2011 р.), ДП №2 та ДП №3 ПАТ «МК «Азовсталь» (2019-2021 рр.), всіх доменних печах ПАТ «Запоріжсталь» (2016-2019 рр.). У 2024-2025 рр. на ПАТ

«Запоріжсталь» САК «Теплові втрати» було вдосконалено доповненням модулю з розрахунку витрат коксу на компенсацію теплових втрат та узагальнено результати для доменного цеху в цілому.

Розроблена САК «Теплові втрати» включає визначення по теплових втрат по зонах печі, розрахунок їх сумарної величини і визначення витрат коксу на їх компенсацію. Подібна система важлива не тільки для уточненого нормування витрат палива, але й дозволяє призначати своєчасно заходи щодо забезпечення або посилення захисних характеристик футерівок, оцінити ефект шоткретування.

Основні функції САК «Теплові втрати»:

1. Розрахунок і контроль теплових втрат в печі по середньогодинним даним.

2. Відображення трендів теплових втрат по контрольованим зонам доменної печі і загальних теплових втрат по печі в цілому.

3. Своєчасне визначення та запобігання збільшенню теплових навантажень на систему охолодження, збільшення витрат коксу на компенсацію теплових втрат, розладів в тепловій роботі печей.

4. Забезпечення інженерно-технічного персоналу інформацією, що дозволяє своєчасно стежити за відхиленнями контрольованих і розрахункових параметрів та впливати на них.

САК «Теплові втрати» дає можливість в автоматизованому режимі контролювати динаміку загальних теплових втрат, їх величини по зонах печі та витрати коксу на їх компенсацію (рис. 3.2).

В САК «Теплові втрати» реалізований модуль, що дозволяє визначати теплоенергетичні показники доменної плавки, такі як загальна та засвоєна потужності, питомі теплові витрати на тону чавуну та коефіцієнт використання теплоти коксу в доменній печі в автоматизованому режимі (рис. 3.3).

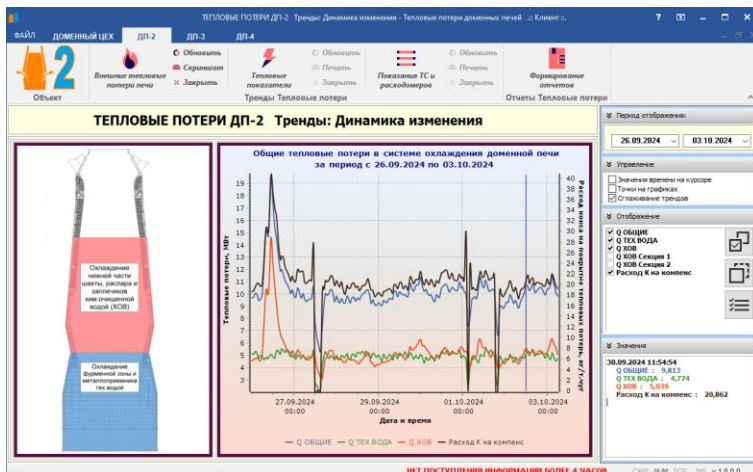


Рисунок 3.2 – Приклад відеокадру трендів теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію

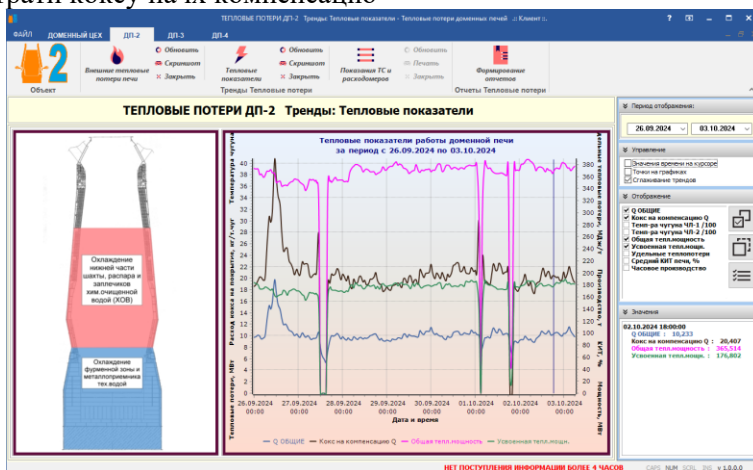


Рисунок 3.3 – Приклад відеокадру трендів теплоенергетичних показників доменної плавки

Для оперативної перевірки персоналом доменного цеху витрати та температур вхідної і вихідної води з системи охолодження доменних печей реалізовано виведення на екран динаміки цих показників (рис. 3.4)

Розділ 3. Метод і модель контролю теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію

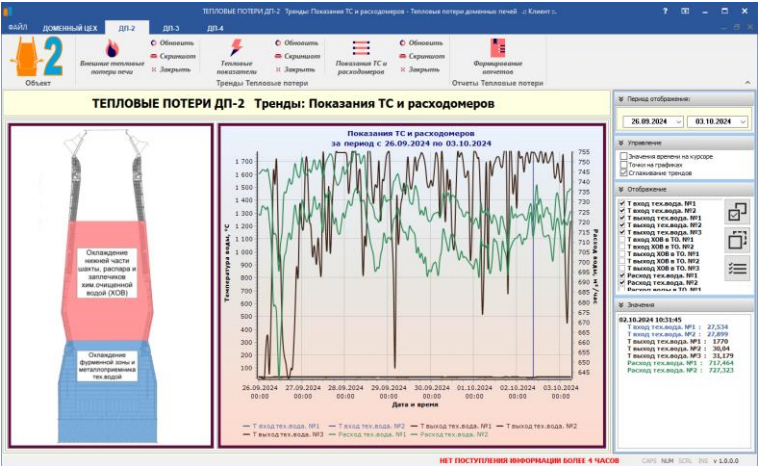


Рисунок 3.4 – Приклад відеокадру трендів витрати та температур вхідної і вихідної води з системи охолодження доменної печі

Для порівняння та якісної оцінки на окремому відеокадрі виведено динаміку зміни теплових втрат та витрат коксу на їх компенсацію на всіх печах та витрати коксу доменного цеху ПАТ «Запоріжсталь» (рис. 3.5).

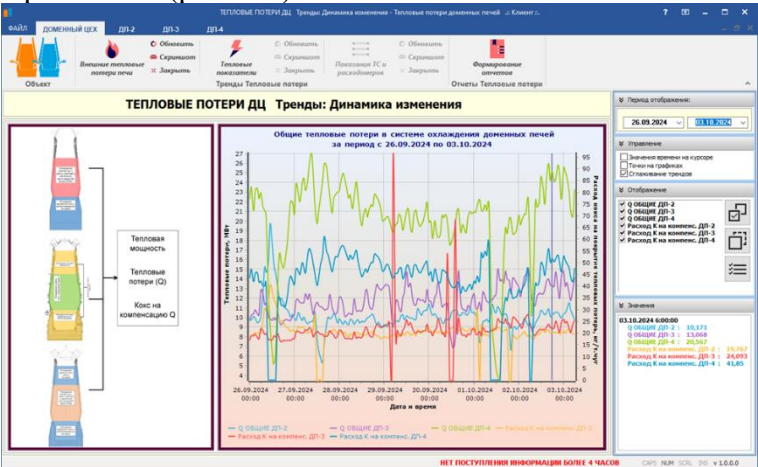
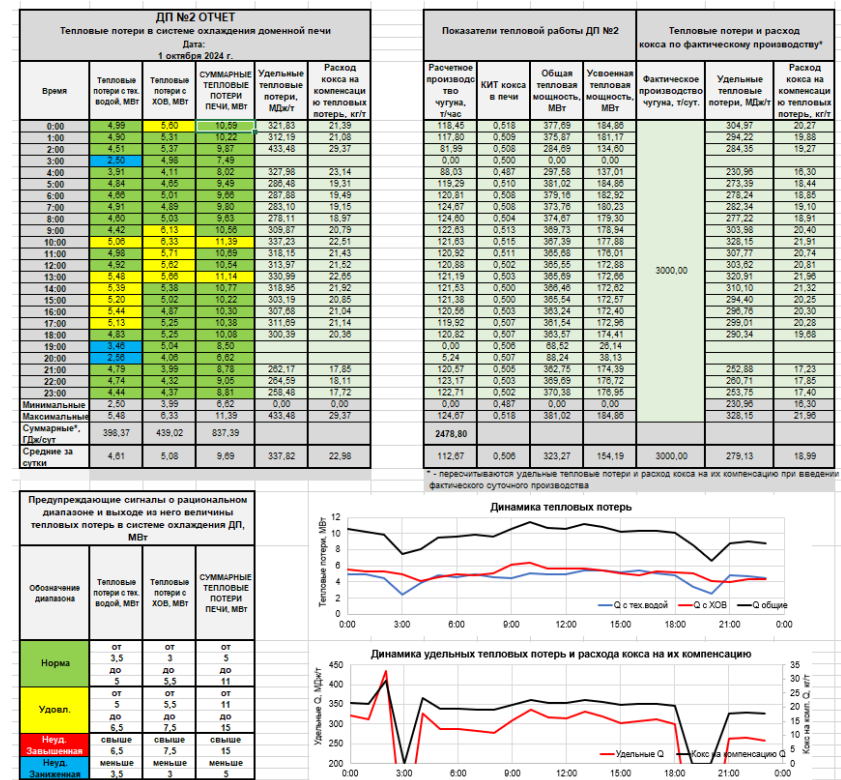


Рисунок 3.5 – Приклад відеокадру трендів витрати та температур вхідної і вихідної води з системи охолодження доменної печі

Реалізовано передачу інформації щодо теплових витрат та витрати коксу на їх компенсацію в файл в 2 форматах – за обрану добу (рис. 3.6) та в період 30 діб (рис. 3.7), де наведено числові значення та графіки їх зміни протягом заданого періоду.



Розділ 3. Метод і модель контролю теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію

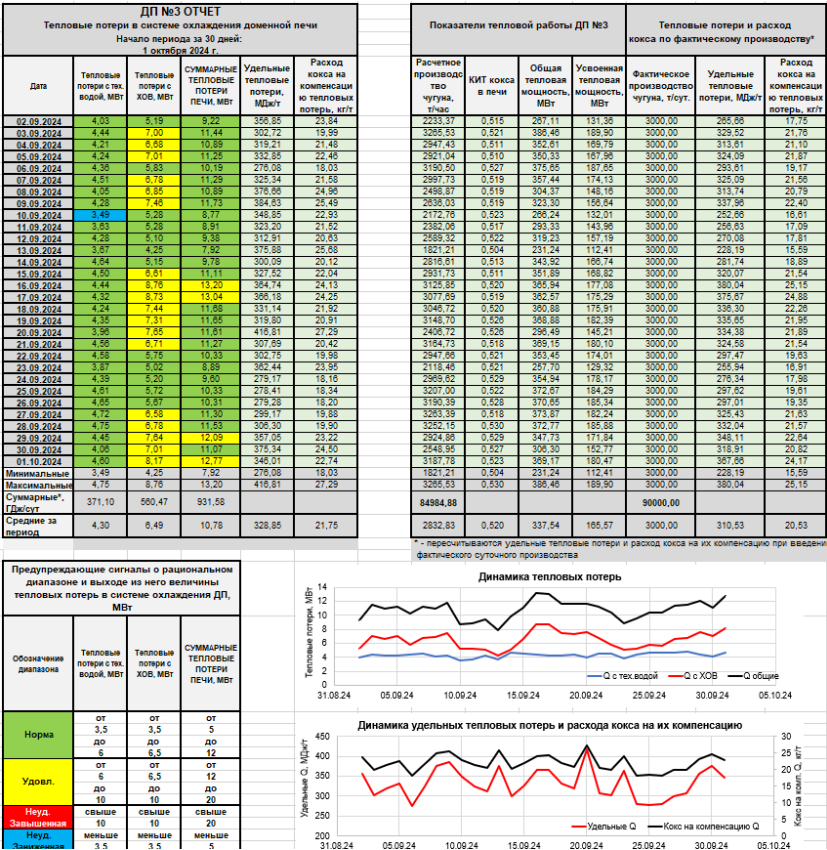


Рисунок 3.7 – Приклад звіту «Теплові втрати в системі охолодження доменної печі» за 30 діб

3.3 Використання інформації САК «Теплові втрати» в доменному виробництві

3.3.1 Дослідження теплових втрат в системі охолодження та витрати коксу на їх компенсацію на доменних печах різного об'єму

Виконані дослідження показали, що абсолютна величина теплових втрат доменної печі, перш за все, залежить від її об'єму. При цьому в залежності від конструкції, технічного стану печі,

радіального розподілу газового потоку і форсування, теплові втрати печі можуть відрізнятись більш ніж в два рази (рис. 3.8). Витрати коксу на компенсацію теплових втрат можуть змінюватись від 10 до 55 і більше кг коксу на тону чавуну [8, 11, 12, 57, 58].

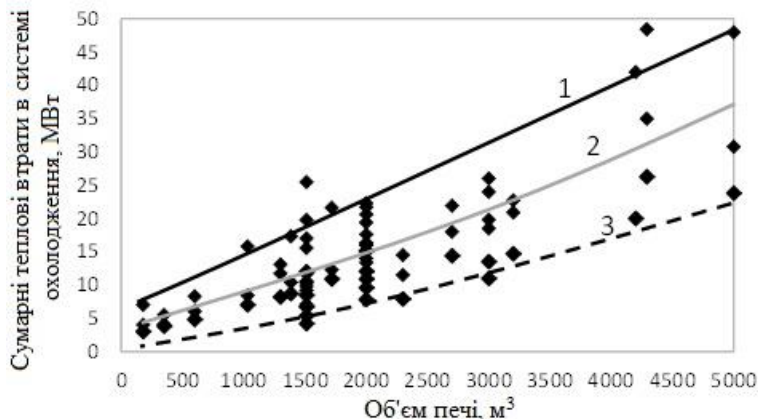


Рисунок 3.8 – Залежність сумарних теплових втрат в системі охолодження доменної печі від її об'єму: 1 – максимальні теплові втрати; 2 – середні теплові втрати; 3 – мінімальні теплові втрати

Зі збільшенням об'єму печі абсолютна величина теплових втрат збільшується, а її питоме значення на тону виплавленого чавуну, навпаки, зменшується (рис. 3.9). Таким чином, збільшення об'єму печі є основним фактором, який за інших рівних умов дозволяє зменшити питомі теплові втрати на доменних печах і, відповідно, витрат коксу на їх компенсацію.

Другим за важливістю фактором, що впливає на витрати коксу на компенсацію теплових втрат, після об'єму печі, є зйом чавуну з одного метру кубічного корисного об'єму печі, – чим він більший, тим менше питомі теплові втрати і витрати коксу на їх компенсацію (рис. 3.9 – 3.10).

Узагальнення результатів дослідження теплових втрат більше 40 доменних печей України та близького зарубіжжя дозволило визначити граничні значення витрат коксу на

компенсацію теплових втрат в залежності від обсягу печей (рис. 3.11).

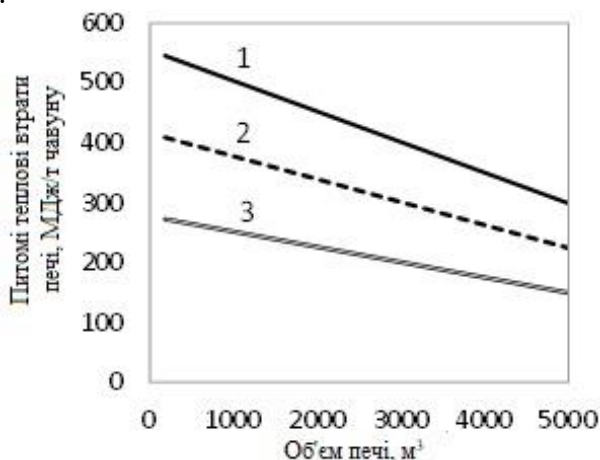


Рисунок 3.9 – Залежність питомих теплових втрат доменних печей (МДж/т чавуну) від їх обсягу та продуктивності (т/м³).

Зйом чавуну з одного м³ корисного об'єму печі: 1 – 1,5 т/м³; 2 – 2,0 т/м³; 3 – 3,0 т/м³

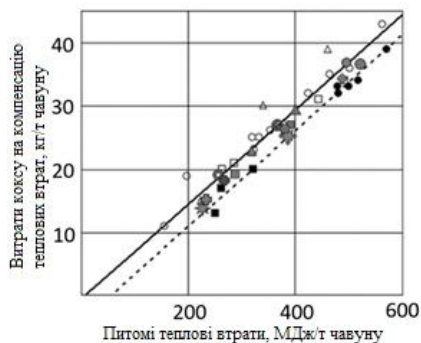


Рисунок 3.10 – Залежність витрат коксу на компенсацію теплових втрат від питомих втрат теплоти на тонну чавуну для доменних печей, корисним об'ємом від 1000 до 5000 м³

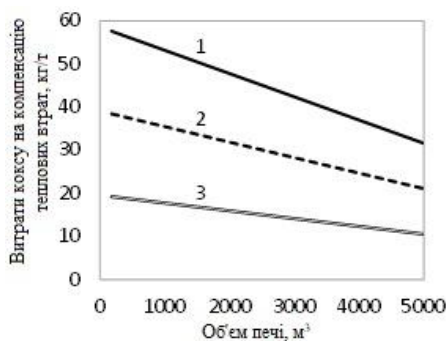


Рисунок 3.11 – Діапазон і зміна витрат коксу на компенсацію теплових втрат в залежності від об'єму печей:

1 – мінімальні витрати; 2 – середні витрати; 3 – максимальні витрати

Отриманий діапазон характеризує величину можливого резерву економії коксу за рахунок збільшення об'єму печі, реконструкції системи охолодження і футерівки, а також технологічних заходів по організації центрального газорозподілу, зменшення зносу футерівки і системи охолодження печі.

3.3.2 Дослідження теплових втрат і витрати коксу на їх компенсацію до і після проведення відновлювальних ремонтів шахти доменних печей ПАТ «Запоріжсталь»

Перехід на технологію вдування пиловугільного палива (ПВП) зменшує ресурс роботи футерівки і систем охолодження доменних печей (ДП). Для тривалого виробництва чавуну із застосуванням ПВП потрібен особливий, новий, підхід до вибору конструкції печі, систем контролю її технічного стану та теплової роботи [5, 6, 23, 57, 58, 74-76].

Одним із інтегральних показників ефективності конструкції печі і технології плавки, з точки зору наявності резерву зменшення витрат коксу і умовного палива на виплавку чавуну, збільшення тривалості кампанії є величина теплових втрат в системі охолодження доменних печей.

Витрати коксу після проведення капітального / відновлювального ремонту печей зменшуються на 8-26 кг/т чавуну в залежності від стану печі, яка видута та змін, внесених в конструкцію футерівки і системи охолодження.

Сумарні теплові втрати в системі охолодження чотирьох печей доменного цеху в різні періоди становили 30-55 МВт, а витрата коксу на їх компенсацію 17-35 кг/т, при середньому значенні ~21 кг/т (рис. 3.12).

Доменні печі ПАТ «Запоріжсталь» при зіставному корисному об'ємі близько 1500 м³, мають різну конструкцію холодильників, футерівки та системи охолодження, різну продуктивність, тривалість кампанії і, як наслідок, різну величину теплових втрат. На сьогоднішній день серед печей доменного цеху найменші теплові втрати становлять ~10 МВт,

заплечиків ДП №5 вперше в Україні із застосуванням п'яти рядів сталевих холодильників, попередньо футерованих карбідокремнієвим вогнетривом. При цьому ДП №3 з мідними холодильними плитами в шахті має більші теплові втрати в середньому на ~5 МВт і витрати коксу на їх компенсацію на ~5 кг/т, ніж ДП №5 зі сталевими холодильними плитами в шахті, що пов'язано з більшою теплопровідністю мідних холодильників і особливостями газорозподілу на ДП №5, так як на ній більш виражений центральний газорозподіл.

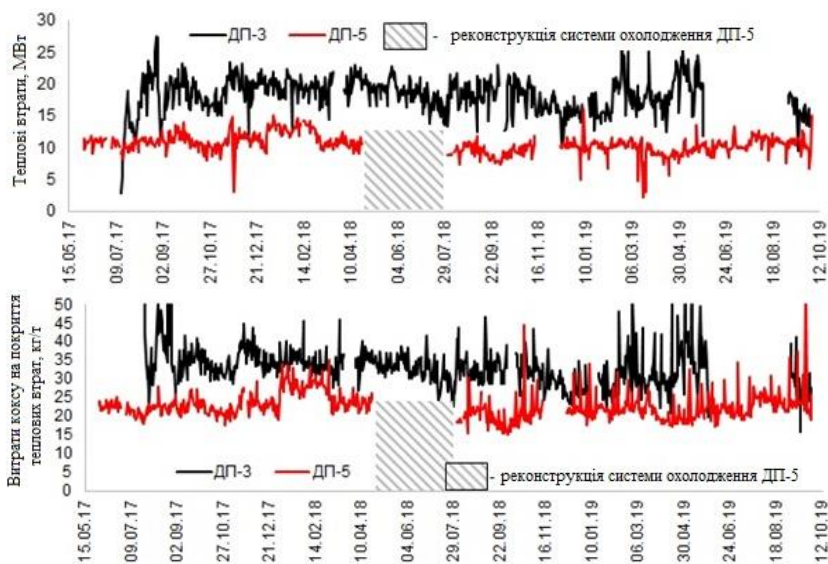


Рисунок 3.13 – Теплові втрати і витрати коксу на їх компенсацію на ДП №3 з мідними холодильниками в шахті і ДП №5 зі сталевими холодильниками

У 2018 і 2019 рр. здійснено реконструкцію шахти ДП №4 і ДП №2 з відновленням її футерівки та заміною чавунних холодильників заплечиків на мідні і заміною системи випарювального охолодження (СВО) на систему охолодження «холодною» хімічно очищеною водою (ХОВ), що вплинуло на

величину і розподіл теплових втрат по зонам печей (рис. 3.14 - 3.15).

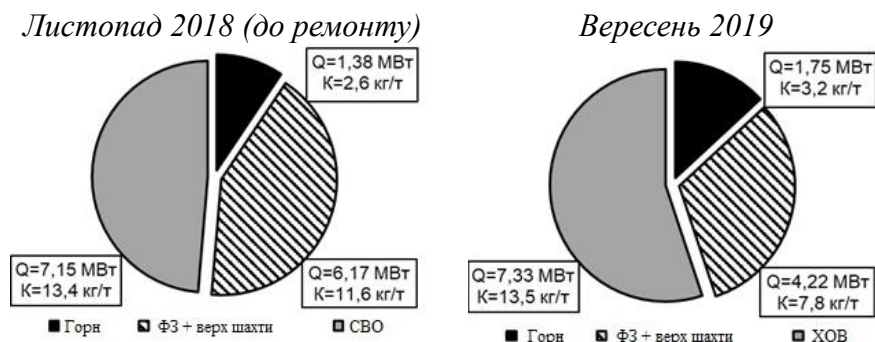


Рисунок 3.14 – Розподіл теплових втрат і витрат коксу на їх компенсацію по зонам охолодження ДП №4

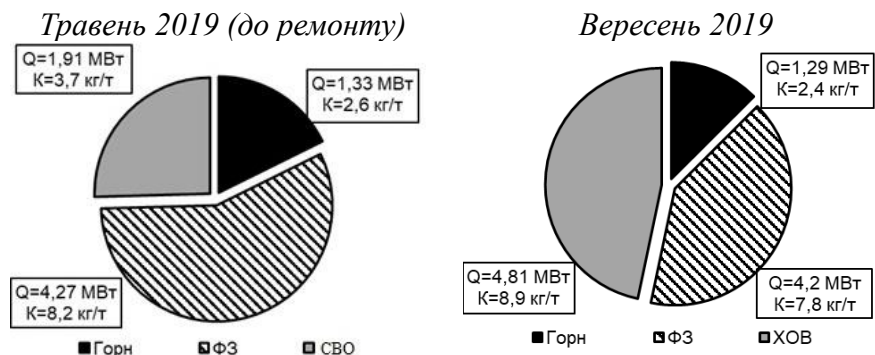


Рисунок 3.15 – Розподіл теплових втрат і витрат коксу на їх компенсацію по зонам охолодження ДП №2

Теплові втрати ДП №4 з 2016 р., після відновлювального ремонту із установкою в шахті мідних холодильників, до чергового відновлювального ремонту в листопаді 2018 р. збільшилися на ~4 МВт з 9 до 13 МВт з піками до 20 МВт в період перед зупинкою, витрати коксу на їх компенсацію виросли на ~8 кг/т чавуну, що, перш за все, пов'язано з руйнуванням

футерівки шахти і відсутністю стабільного гарнісажу [5, 12]. Після відновлювального ремонту шахти в 2018 році і переведення системи охолодження шахти ДП №4 з СВО на ХОВ змінилася структура розподілу теплових навантажень на зони печі: частка теплових втрат охолодження шахти збільшилася з 49% (7,15 МВт) до 55% (7,33 МВт), фурменної зони і верхніх рядів шахти зменшилася з 42% (6,17 МВт) до 32% (4,22 МВт), в металоприймачу збільшилися з 9% (1,38 МВт) до 13% (1,75 МВт).

Теплові втрати ДП №2 з 2017 р. після шоткретування зменшилися на 6 МВт [10, 13]. Після перших чотирьох місяців експлуатації печі, теплові втрати збільшилися на ~6 МВт, витрата коксу на їх компенсацію збільшилася на ~10 кг/т чавуну [10,13]. У 2019 році після переведення системи охолодження шахти ДП №2 з СВО на ХОВ змінилася структура розподілу теплових навантажень на зони печі: частка теплових втрат охолодження шахти збільшилася з 25% (1,91 МВт) до 47% (4,81 МВт), фурменної зони зменшилася з 57% (4,27 МВт) до 41% (5,1 МВт), в металоприймачу зменшилися з 18% (1,33 МВт) до 12% (1,29 МВт).

Встановлено, що збільшення витрат ПВП в доменному цеху ПАТ «Запоріжсталь» призводить до збільшення теплових втрат і витрат коксу на їх компенсацію [76]:

- на ДП №3 поступове збільшення витрат ПВП з 22 до 25 т/год збігається зі зменшенням середньої залишкової товщини футерівки в шахті з 80 до 70% і, як наслідок, збільшенням теплових втрат в системі охолодження з 18 до 20 МВт, з «піками» до 23 МВт, при цьому витрата коксу на їх компенсацію змінюється в межах від 32 до 38 кг/т чавуну.
- на ДП №2 і №4 збільшення витрат ПВП з 20 до 25 т/год або з 140 до 160 кг/т чавуну і більше призвело до інтенсифікації процесів руйнування їх футерівки і, як наслідок, до збільшення теплових втрат на 2-4 МВт і витрат коксу на їх компенсацію на 5-10 кг/т.

- на ДП №5 збільшення витрат ПВП з 140 до 150 кг/т чавуну призвело до збільшення теплових втрат в системі охолодження на ДП №5 з 11 до 14 МВт і збільшення витрат коксу на їх компенсацію з 23 до 30 кг/т чавуну.

За даними досліджень, виконаних в доменному цеху ПАТ «Запоріжсталь» в період 2016-2019 рр., збільшення теплових втрат на кожен 1 МВт при посиленні периферійного газового потоку або руйнуванні футерівки та гарнісажу, посилення інтенсивності охолодження призводить в середньому до збільшення витрат скіпового коксу на $\approx 2,5$ кг/т чавуну або на $\approx 0,7\%$.

3.3.3 Дослідження впливу технологічного режиму роботи ДП №2 ПАТ «МК «Азовсталь» на величину теплових втрат і витрати коксу на їх компенсацію

Виконано аналіз впливу технологічних факторів роботи доменної печі №2 на теплові втрати та витрату коксу на їх компенсацію.

Встановлено, що визначальний вплив на зміну теплових втрат ДП №2 та витрати коксу на їх компенсацію має витрата природного газу. Встановлено, що є тенденція до збільшення теплових втрат на 1 МВт при зменшенні витрати природного газу на $6-7 \text{ м}^3/\text{т}$ (рис. 3.16-3.17).

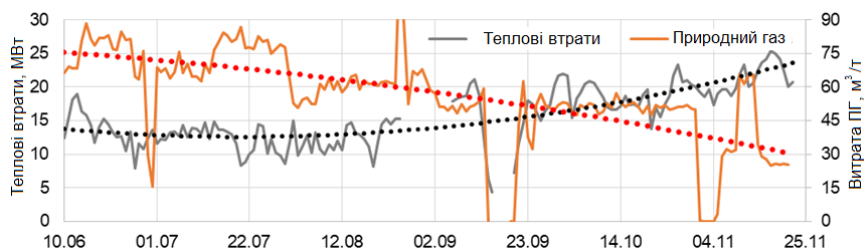


Рисунок 3.16 – Динаміка теплових втрат та витрати природного газу

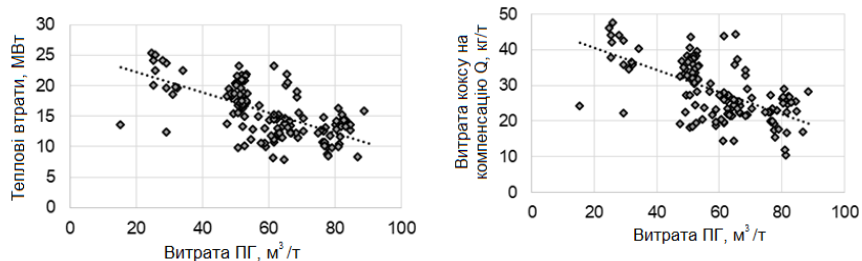


Рисунок 3.17 – Залежність зміни теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію від витрати природного газу

Теплові втрати та витрата коксу на їх компенсацію зменшуються зі збільшенням вмісту водню в колошниковому газі (рис. 3.18).

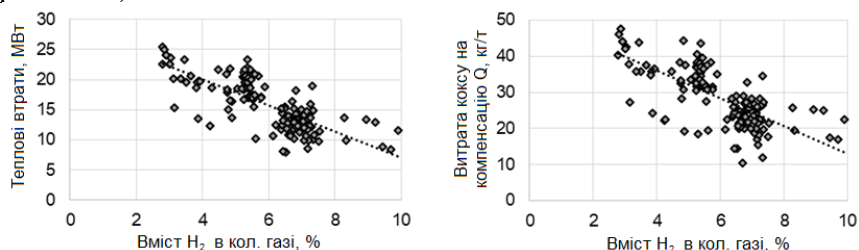


Рисунок 3.18 – Залежність зміни теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію від вмісту водню в колошниковому газі

Взаємозв'язок вмісту водню в колошниковому газі з тепловими втратами узгоджується із залежністю збільшення вмісту водню зі збільшенням витрати природного газу (рис. 3.19).

Виконано аналіз зміни теплових втрат та витрати на їх компенсацію залежно від відношення витрати

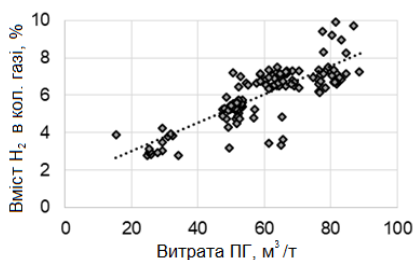


Рисунок 3.19 – Залежність вмісту H_2 в колошниковому газі від витрати природного газу

природного газу до пиловугільного палива (ПГ/ПУТ, м³/кг). Встановлено, що раціональне відношення ПГ/ПУТ ~1,0 (витрата ПУТ 60-80 кг/т, ПГ – 60-80 м³/т), при якому величина теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію відповідає мінімальній величині (рис. 3.20).

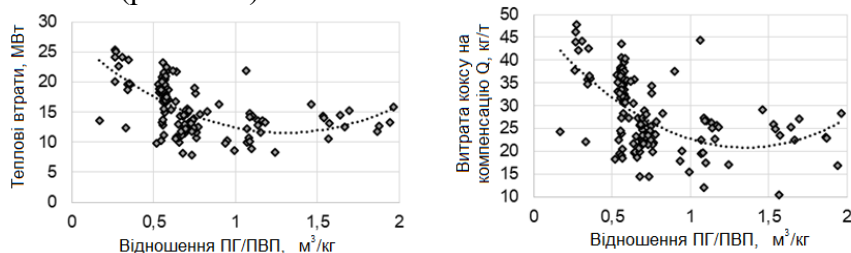


Рисунок 3.20 – Залежність зміни теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію від співвідношення ПГ/ПВП

У разі збільшення теплових втрат у системі охолодження збільшується витрата скіпового коксу (рис. 3.21).

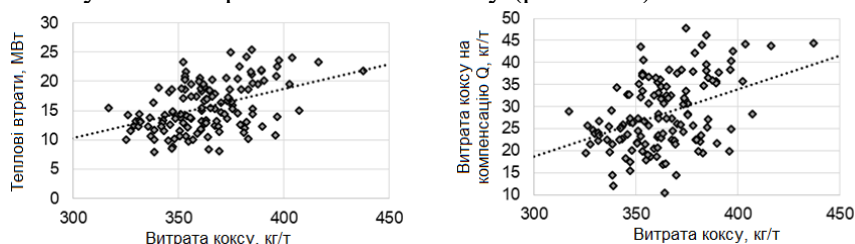


Рисунок 3.21 – Взаємозв'язок зміни теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію з питомою витратою коксу

Встановлено вплив шихтових умов (основність агломерату, частка окатишів, застосування руди та іншої залізозмісної сировини) на зміну теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію (рис. 3.22).

Мінімальні теплові втрати та витрати коксу на їх компенсацію відповідають періодам, у яких використовувався агломерат основністю ~1,5-1,6.

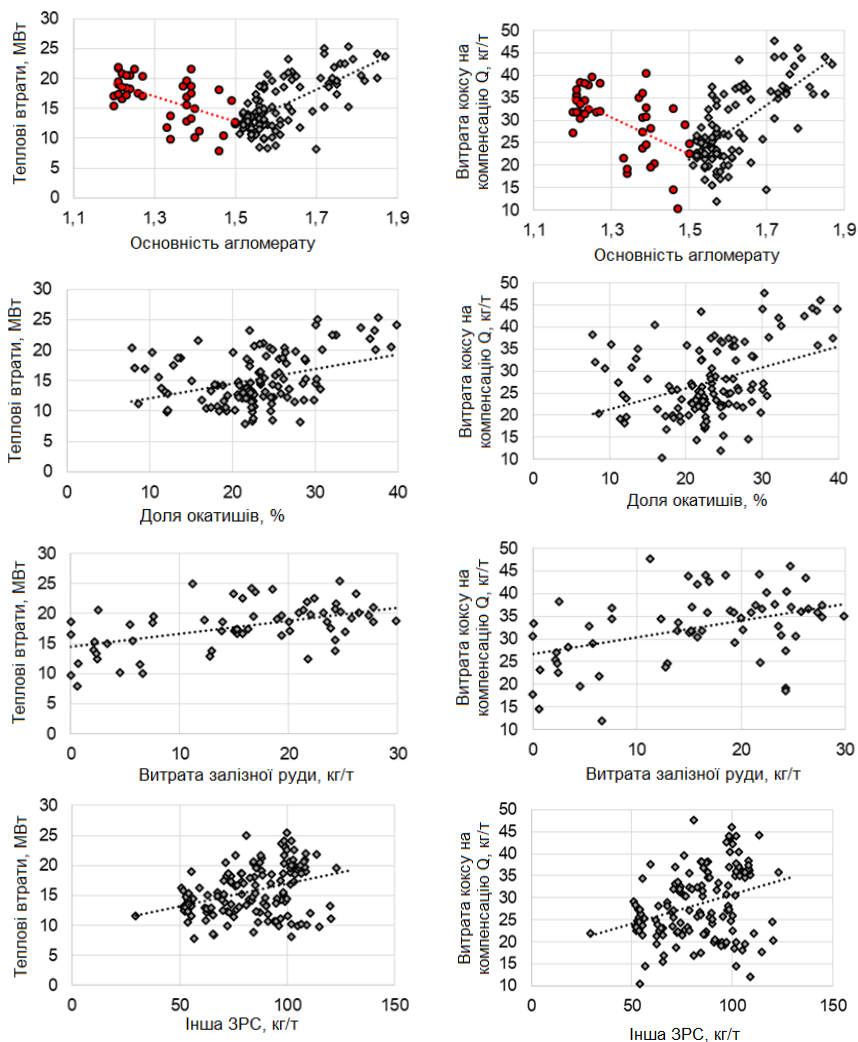


Рисунок 3.22 – Залежність зміни теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію від основності агломерату, частки окатишів, витрати залізної руди та іншої залізородної сировини (ЗРС)

Збільшення витрати окатишів, залізної руди та іншої залізовмісної сировини призводить до збільшення теплових втрат

і витрати коксу на їх компенсацію, що, ймовірно, пов'язано зі зменшенням товщини гарнісажу при використанні даних шихтових матеріалів.

Зменшення вмісту кремнію в чавуні та зменшення величини коливань вмісту кремнію призводить до зменшення теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію (рис. 3.23).

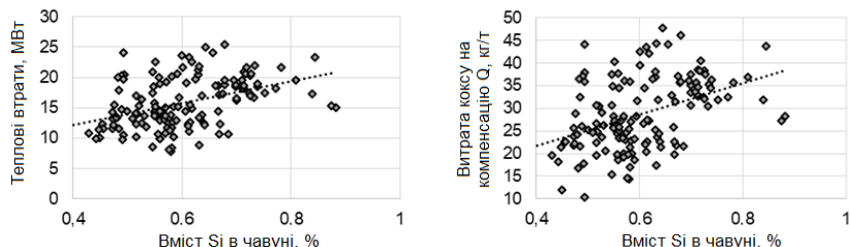


Рисунок 3.23 – Залежність зміни теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію від вмісту кремнію в чавуні

За результатами аналізу шлакового режиму встановлено, що робота печі з кислішими шлаками супроводжується великими тепловими втратами та витратою коксу на їх компенсацію (рис.3.24).

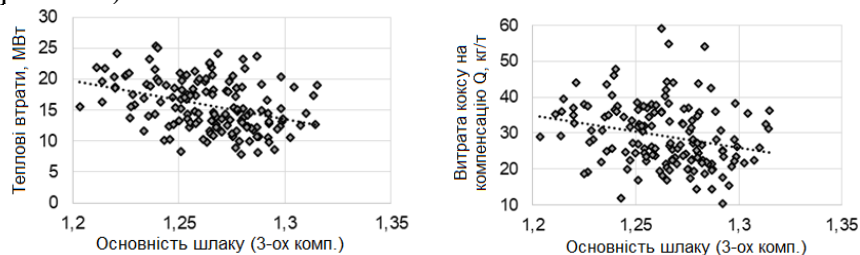


Рисунок 3.24 – Залежність зміни теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію від трикомпонентної основності шлаку

Аналіз газодинамічного режиму ДП №2 показав неоднозначний вплив втрат тиску на величину теплових втрат у системі охолодження – збільшення верхнього перепаду тиску призводить до зменшення теплових втрат, збільшення нижнього

перепаду тиску – призводить до збільшення теплових втрат (рис. 3.25).

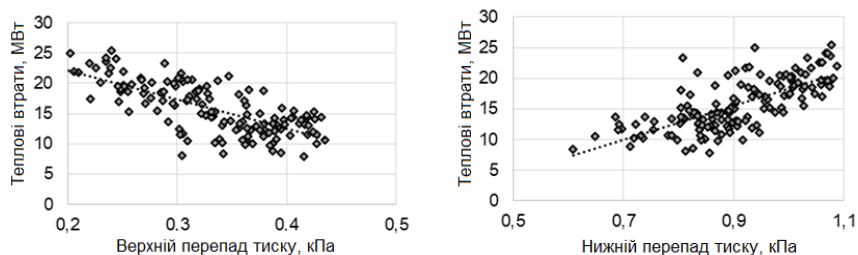


Рисунок 3.25 – Залежність зміни теплових втрат від перепадів тиску печі

Збільшенню верхнього перепаду та, відповідно, зменшенню теплових втрат сприятиме зменшення тиску під колошником. Зменшенню нижнього перепаду сприяла робота ДП №2 із природним газом (рис. 3.26).

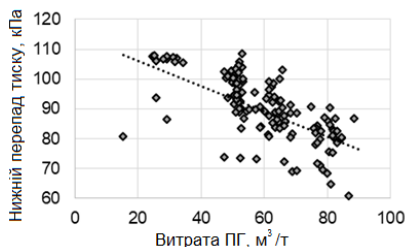


Рисунок 3.26 – Залежність зміни нижнього перепаду тиску від витрати природного газу

3.4 Розробка норм теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію

Зважаючи на те, що теплові втрати є інтегральним показником, який характеризує роботу периферійної зони доменної печі та відображається на техніко-економічних показниках, в першу чергу, на витрату коксу розроблено норми теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію.

3.4.1 Взаємозв'язок теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію

Аналіз теплових та витрати коксу на їх компенсацію на доменних печах ПАТ «Запоріжсталь» показав, що теплові втрати змінювалися в межах 7-25 МВт, а витрата коксу на їх компенсацію – в межах 15-60 кг/т чавуну.

Статистичний аналіз даних про теплові втрати у системі охолодження доменних печей ПАТ «Запоріжсталь» показав взаємозв'язок величину витрати коксу з їхньою компенсацію (рис. 3.27). Однак використання теплових втрат для аналізу в різні періоди не є раціональним внаслідок зіставлення абсолютної (теплові втрати в системі охолодження) та питомої (витрата коксу на компенсацію теплових втрат) величин, що не дозволяє належним чином оцінити інтенсивність доменної плавки. Встановлено, що кожен 1 МВт збільшення теплових втрат призводить до збільшення витрати коксу на їх компенсацію на 1,45 кг/т для ДП №2, 1,4 кг/т для ДП №3 і 1,55 кг/т для ДП №4.

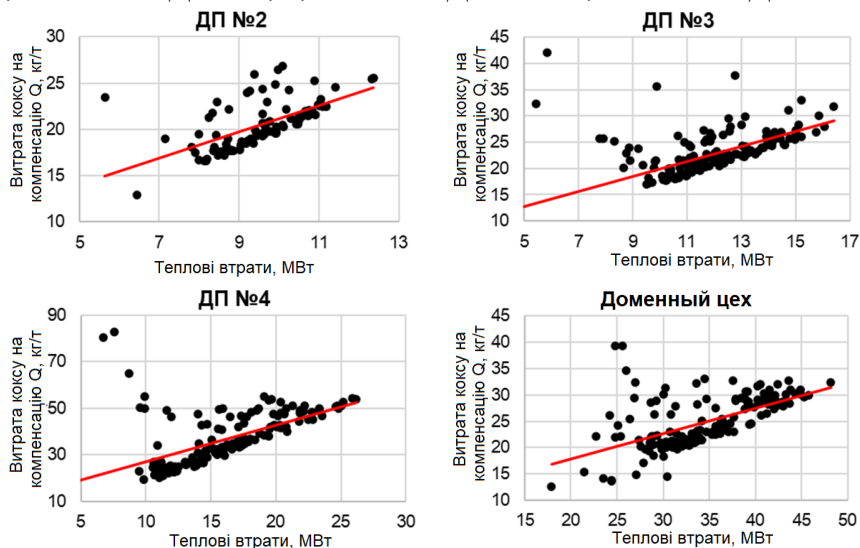


Рисунок 3.27 – Взаємозв'язок теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію

Тому для нормування витрати коксу на компенсацію теплових втрат було обрано питомі теплові втрати на тонну чавуну, які якісно дозволяють оцінювати ефективність роботи системи охолодження та пояснювати нев'язку в показниках роботи доменної печі.

Статистичний аналіз показав, що питомі теплові втрати на тонну чавуну ($q_{\text{пит.}}$) є визначальним параметром, що дозволяє оцінювати величину витрати коксу компенсацію теплових втрат: збільшення $q_{\text{пит.}}$ на 10 МДж/т чавуну призводить до збільшення витрати коксу на їх компенсацію на 0,69 кг/т як у доменних печах окремо, так і доменного цеху загалом (рис. 3.28).

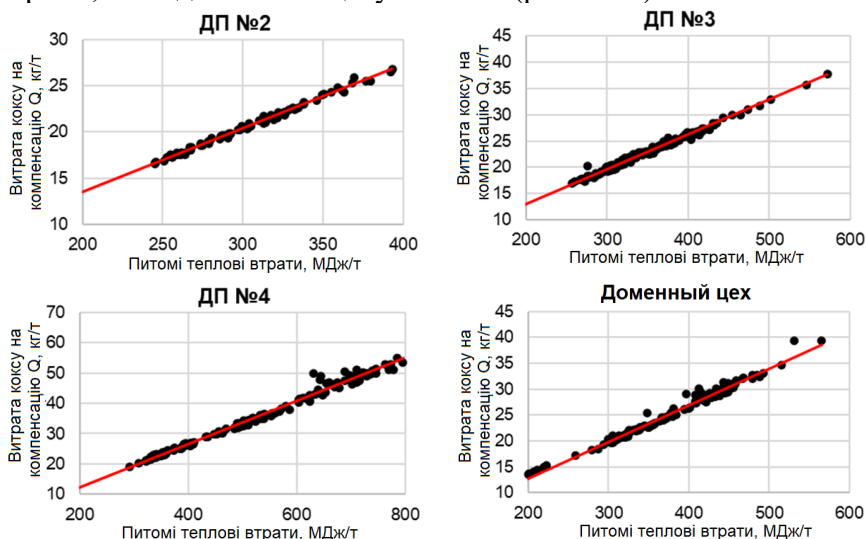


Рисунок 3.28 – Взаємозв'язок питомих теплових втрат доменного цеху з витратою коксу на їх компенсацію

3.4.2 Методика для використання при аналізі змін питомої витрати коксу в залежності від величини теплових втрат при пофакторному аналізі доменної плавки

На основі вищевикладеного, як параметр (фактор) для нормування для пофакторного аналізу пропонується використовувати питомі теплові втрати на тону чавуну:

Збільшення питомих теплових втрат кожні 10 МДж/т чавуну призводить до збільшення витрати коксу на $\Delta K = 0,69 \cdot \text{кг/т}$.

Для підтвердження запропонованої методики виконано пофакторний аналіз роботи ДП ПАТ «Запоріжсталь» при зіставленні її роботи в пізній період роботи в 2024 році.

Параметри роботи ДП ПАТ «Запоріжсталь» в періоді 1:

Теплові втрати $Q = 14,82$ МВт

Продуктивність $P = 2748,1$ т/добу

Параметри роботи ДП ПАТ «Запоріжсталь» в періоді 2:

Теплові втрати $Q = 12,72$ МВт

Продуктивність $P = 2977,9$ т/добу

1. Визначення питомих теплових втрат у різні періоди роботи ДП №4:

$$q_{\text{пит.1}} = \frac{8,64 \cdot 10^4 \cdot 14,82}{2748,099} = 465,94 \text{ МДж/т} \quad (3.9)$$

$$q_{\text{пит.1}} = \frac{8,64 \cdot 10^4 \cdot 12,72}{2977,885} = 369,06 \text{ МДж/т} \quad (3.10)$$

2. Визначення різниці питомих теплових втрат між періодами 1 та 2:

$$\Delta q_{\text{пит.}} = q_{\text{пит.1}} - q_{\text{пит.2}} = 465,94 - 369,06 = 96,88 \text{ МДж/т} \quad (3.11)$$

3. Визначення різниці витрати коксу між періодами 1 та 2:

$$\Delta K = 0,069 \cdot \Delta q_{\text{пит.}} = -6,68 \text{ кг/т} \quad (3.12)$$

Отримані результати використано у пофакторному аналізі, наведеному одної з доменних печей ПАТ «Запоріжсталь» з доповненням фактору теплових втрат (табл. 3.2).

Внаслідок застосування теплових втрат у пофакторному аналізі нев'язка витрати коксу була зменшена на 6,68 кг/т (з -8,66 кг/т до -1,97 кг/т). Таким чином, спеціалістам ПАТ «Запоріжсталь» було рекомендовано внести теплові втрати як параметр (фактор) для пофакторного аналізу.

Таблиця 3.2 – Пофакторний аналіз роботи ДП ПАТ «Запоріжсталь» у 2024 році

№ п/п	Найменування показників	Од. вим.	Аналізований період				
			Період 1	Період 2	Відх., +-	Вплив факторів на К, кг/т	Вплив факторів на Р, т/добу
	Виробництво чавуну за місяць	тис. т	83,359	90,409	7,050		
	Виробництво чавуну (Р) в номінальну добу	т/добу	2748,1	2977,9	229,8		
	Кокс скіповий сухий (К)	кг/т	459,8	454,7	-5,1		
1	Вміст заліза у всій шихті без коксу та CO ₂ флюсів	%	59,18	58,98	-0,20	1,3	-9,5
2	Витрата металодобавок у перерахунку на чисті (100% Fe)	кг/т	13,5	40,8	27,3	-3,6	24,3
3	Витрата вапняку флюсового звичайного	кг/т	0,0	1,1	1,1	0,3	-1,6
4	Витрата вапняку флюсового доломітизованого	кг/т	0,0	0,0	0,0	0	0
6	Якість коксу, всього					-2,6	17,5
	A	%	10,93	10,55	-0,38	-3	13,6
	S	%	0,96	0,88	-0,08	-1,9	8,4
	M25	%	85,99	86,72	0,73	-2,7	12
	M10	%	7,42	7,56	0,14	2,4	-10,8
	+80 мм	%	7,76	5,37	-2,39	-3	13,1
	- 25 мм	%	3,24	4,00	0,76	2,3	-10,4
	CSR	%	42,73	42,14	-0,59	3,3	-8,4

Розділ 3. Метод і модель контролю теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію

7	Вміст Si в чавуні, %	%	0,60	0,58	-0,02	-1,5	6,6
8	Вміст Mn в чавуні, %	%	0,11	0,16	0,05	0,6	-2,7
9	Вміст P в чавуні, %	%	0,055	0,043	-0,012	-0,4	2
10	Вміст S в чавуні, %	%	0,025	0,022	-0,003	3,3	-16,5
11	Температура гарячого дуття	°C	1105,0	1135,0	30	-5,2	23,1
12	Вологість дуття природна	г/м³	7,7	4,3	-3,4	-3,7	9,4
13	Вологість дуття	г/м³	1,2	4,2	3,0	3,2	-8,3
14	Ступінь збагачення дуття киснем (вміст O₂ у дутті)	%	20,80	20,80	0,00	0	0
15	Витрата ПВП	кг/т	75,0	72,8	-2,2	1,8	
16	Витрата природного газу	м³/т	0,0	0,0	0,0	0	
17	Витрата антрациту	кг/т	0,0	0,0	0,0	0	
18	Витрата коксового горіху	кг/т	31,0	22,3	-8,7	6,3	
19	Тиск газу під колошником (надлишковий)	атм	0,95	0,95	-0,01	0,1	-1,4
20	Загальний час простоїв (щодо номінального часу роботи)	%	0,00	0,77	0,77	2,4	-31,7
21	Загальний час роботи на "тихому ході" (щодо номінального часу роботи)	%	0,00	0,42	0,42	1,3	-11,5
22	Кількість випадків затримки випуску чавуну (за середньої тривалості затримки 0,5 інтервалу часу між суміжними випусками)	%	96,5	96,5	0,0	0	0
23	Підвищення інтенсивності ходу рудою	т/м³*д об	3,033	3,135	0,000	0	0
	Усього за факторами					3,60	-0,3
	Інші фактори:					-8,66	230,1
24	Теплові втрати, МВт		14,82	12,72			
	Питомі теплові втрати, МДж/т		465,94	369,06	96,88	-6,68	
	Інші фактори з урахуванням теплових втрат:					-1,97	

РОЗДІЛ 4. МЕТОД І МОДЕЛЬ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ, РОЗПАЛУ ФУТЕРІВКИ І УТВОРЕННЯ ГАРНІСАЖУ В МЕТАЛЛОПРИЙМАЧІ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ

4.1 Метод контролю теплової роботи, розпалу футерівки і утворення гарнісажу в металоприймачі доменної печі

Як показав аналіз зупинки багатьох доменних печей на капітальні ремонти, причиною зупинки було руйнування футерівки горна і (або) поду, що стало можливим (крім інших причин) і через відсутність автоматизованого контролю теплового стану і зносу футерівки горна та поду.

Одним із основних моментів безпеки і забезпечення тривалості кампанії доменної печі є автоматизований контроль в режимі реального часу за тепловим станом системи периферійного охолодження та систем охолодження поду, контроль температури кладки металоприймача.

Теплові навантаження та залишкова товщина футерівки металоприймача багато в чому визначають надійну і безпечну роботу доменної печі з високими технічними показниками і тривалістю міжремонтного періоду її роботи (кампанії печі). Теплові навантаження в горні динамічно змінюються в залежності від ходу печі. При цьому істотно змінюється і затверділий шар гарнісажу в горні, тому необхідно безперервно визначати параметри роботи цього шару. Можна вважати, що визначення і регулювання теплового стану горна є ефективним засобом захисту вогнетривів і збільшення тривалості кампанії печі, в тому числі і ефективності технологічних заходів по утворенню гарнісажу.

Тому розробка системи автоматизованого контролю (моделі) теплового стану і залишкової товщини футерівки металоприймача доменної печі є актуальною задачею. В цьому напрямку ІЧМ НАНУ веде постійні розробки. На сьогоднішній

день системи моніторингу теплової роботи і розпалу горна впроваджено на 10 доменних печах [19, 77].

Система автоматизованого контролю (модель) теплового стану і залишкової товщини футерівки горна і поду доменної печі призначена для роботи в складі автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУ ТП) доменної печі.

Модель вигідно відрізняється від існуючих аналогів, так як вона не тільки контролює температуру кладки горна і на їх основі дозволяє розраховувати залишкову товщину футерівки (що роблять аналогічні моделі), але і контролює теплові навантаження на холодильники системи периферійного охолодження, що дозволяє не допустити проривів горна, покращує надійність та достовірність показів системи.

У моделі здійснено підхід, по розроблений в ІЧМ НАНУ методиці визначення теплового стану і зносу футерівки металоприймача на базі комбінування калориметричного і термометричного методів контролю (п. 1.2.2). Це дозволяє більш якісно визначати стан футерівки і утворення гарнісажу в металоприймачі, що дозволяє технологам не тільки контролювати в автоматизованому режимі стан системи охолодження, але й впливати на процеси зносу футерівки та утворення гарнісажу.

4.1.1 Використання теплового навантаження на холодильники системи периферійного охолодження металоприймача доменної печі для визначення залишкової товщини футерівки

Теплове навантаження на холодильники системи периферійного охолодження є інтегральною характеристикою та визначається кількістю теплоти, що уноситься водою при проходженні через змійовик холодильника і визначає теплове навантаження на всю поверхню кладки перед холодильником (4.1):

$$Q=k \cdot F \cdot (t_{\text{вих}}-t_{\text{вх}}), \text{ Вт} \quad (4.1)$$

де F – витрати води на холодильник, $\text{м}^3/\text{год}$; $t_{\text{вх}}$ и $t_{\text{вих}}$ – температура води на вході в холодильник і на виході з нього, K ; k – коефіцієнт теплоємності з урахуванням приведення до СІ, $k=1163 \text{ (Вт}\cdot\text{год)} / (\text{м}^3\cdot\text{K})$.

При сталому стаціонарному процесі теплопередачі, з урахуванням того факту, що товщина стін горна в кілька разів менше внутрішнього радіусу горна і, в основному, тепловіддача через тонку стінку горна до поверхні охолодження практично однорізна – перпендикулярно площині охолодження, то для розрахунку середньої товщини кладки перед холодильником можна використовувати рівняння теплопередачі через плоску стінку, рішення якого дає згідно з формулою (4.2) значення залишкової товщини:

$$\delta = \lambda \left(\frac{S}{Q} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{вх}}) - R_{\text{хол}} \right) \quad (4.2)$$

де δ – середня залишкова товщина кладки перед холодильником, м ; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу кладки перед холодильником, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$; $t_{\text{ст}}$ – температура робочої поверхні кладки, K ; S – площа холодильника, м^2 ; $R_{\text{хол}}$ – термічний опір ділянки «холодильник – неробоча поверхня кладки», $(\text{K}\cdot\text{м}^2)/\text{Вт}$; Q – теплове навантаження на холодильник, розраховане за формулою (4.1), Вт .

4.1.2 Використання температури кладки металоприймача доменної печі для визначення залишкової товщини футерівки

При сталому стаціонарному процесі температура в місці установки гарячого спаю термопар визначає тепловий потік відповідно до закону Фур'є за формулою (4.3):

$$q = \frac{t_{\text{Т}} - t_{\text{вх}}}{R_{\text{хол}} + R_{\text{Т}}} \quad (4.3)$$

де q – тепловий потік, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $t_{\text{Т}}$ – температура кладки в місці гарячого спаю термопар, K ; $R_{\text{Т}}$ – термічний опір ділянки «неробоча поверхня кладки – гарячий спай термопар», $(\text{K}\cdot\text{м}^2)/\text{Вт}$.

Для розрахунку локальної товщини кладки в місці установки гарячого спаю термопар можна використовувати рівняння теплопередачі через плоску стінку, рішення якого дає згідно з формулою (4.4) значення залишкової товщини:

$$\delta = \frac{\lambda \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{т}})}{q} + \delta_{\text{т}} \quad (4.4)$$

де δ – залишкова товщина кладки в місці установки гарячого спаю термопар, м; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу кладки, Вт/(м·К); $t_{\text{ст}}$ – температура робочої поверхні кладки, К; $\delta_{\text{т}}$ – глибина установки гарячого спаю термопар в кладку, м; q – тепловий потік у місці установки гарячого спаю термопар, що визначається за формулою (4.3), Вт/м².

Реалізація запропонованих формул для розрахунку залишкової товщини футерівки (4.2) і (4.4) відбувається наступним чином. Розрахунок залишкової товщини відбувається тільки за тепловим навантаженням, значення якого на момент розрахунку є максимальною для даного холодильника або термопар (причому контроль за максимальними навантаженнями необхідно проводити з початку кампанії доменної печі).

4.1.3 Визначення товщини гарнісажу по периферії металлоприймача

Зменшення теплових навантажень означає, що можливо у цьому місці утворився гарнісаж. Розрахунок його товщини проводиться з використанням питомого теплового навантаження, яке визначається за формулами (4.1) або (4.3). Товщина гарнісажу буде:

$$\delta_{\text{г}} = \frac{\lambda_{\text{г}} \cdot (t_{\text{г}} - t_{\text{ф}})}{q} \quad (4.5)$$

де $\delta_{\text{г}}$ – товщина гарнісажу, м; $\lambda_{\text{г}}$ – коефіцієнт теплопровідності гарнісажу, Вт/(м·К); $t_{\text{г}}$ – температура плавлення гарнісажу, К; $t_{\text{ф}}$ – температура футерівки, яка визначається за формулою (4.6), К; q –

тепловий потік в місці установки гарячого спаю термопари, що визначається за формулою (4.1) або (4.3), Вт/м².

$$t_{\phi} = t_T + q \cdot R_T \quad (4.6)$$

де q – тепловий потік, Вт/м²; t_T – температура кладки в місці гарячого спаю термопари, К; R_T – термічний опір ділянки «неробоча поверхня кладки – гарячий спай термопари», (К·м²)/Вт.

Формули (4.1)-(4.6) наведено для випадку футерівки горна та поду, виконаних з одного виду вогнетривкового матеріалу. Якщо футерівка виконана з двох або більше матеріалів, то в формулах під термічним опором футерівки (R_T) треба розуміти суму термічних опорів всіх матеріалів, що становлять футерівку.

При цьому зміниться і схема розрахунку залишкової товщини футерівки, тому що необхідно контролювати які її шари збереглися, а які ні. Тому при розрахунку залишкової товщини багат шарової футерівки, необхідно порівнювати термічний опір кладки, яка залишилася з термічними опорами її шарів за проектом.

4.1.4 Визначення товщини футерівки і утворюваного гарнісажу центрального стакану поду

Основним моментом у реалізації способу визначення залишкової товщини центрального стакану поду є визначення в автоматизованому режимі теплового потоку до системи охолодження поду.

Якщо охолодження низу печі – водяне, то для визначення теплового потоку необхідна установка датчиків виміру температури (на вході і на виході) і витрат води по секціям охолодження поду, а також температури низу поду (за показниками штатних термопар вище труб систем охолодження поду). Тоді визначення теплового потоку можна здійснювати за формулами (4.7-4.9):

$$q_{Q\text{ по}} = \frac{\alpha \cdot k \cdot F_{\text{по } i} \cdot (t_{\text{вих } i} - t_{\text{вх } i})}{S_{\text{по}}} \quad (4.7)$$

де $F_{\text{по } i}$ – витрати води на секцію охолодження поду, м³/год; $t_{\text{вх } i}$ і $t_{\text{вих } i}$ – температура води на вході і виході на секцію охолодження поду, К; $S_{\text{по}}$ – площа систем охолодження поду, м²; k – коефіцієнт теплоємності з урахуванням приведення до СІ, $k=1163$ (Вт·год)/(м³·К); α – коефіцієнт нерівномірності розподілу теплового потоку по площі охолодження поду.

За показниками термопар систем охолодження поду тепловий потік буде (4.8):

$$q_{\text{Т по}} = \frac{t_{\text{Т по}} - t_{\text{ВХ по}}}{R_{\text{Т по}}} \quad (4.8)$$

де $t_{\text{Т по}}$ – температура кладки в місці гарячого спаю термопар, К; $t_{\text{ВХ по}}$ – середня температура води в системі охолодження поду, К; $R_{\text{Т по}}$ – термічний опір ділянки «гарячий спай термопар охолодження поду – труби систем охолодження поду», (К·м²)/Вт.

Тепловий потік на центр систем охолодження поду буде тоді (4.9):

$$q_{\text{по}} = \frac{q_{\text{Т по}} - q_{\text{Q по}}}{2} \quad (4.9)$$

Якщо охолодження низу печі – повітряне, то для визначення теплового потоку необхідна, крім штатних термопар і виміру температури повітря на підвідних і відвідних воздуховодах, установка термопар в кладці нижнього поду.

Тоді тепловий потік на центр охолодження систем поду буде визначатися аналогічно формулі (4.9), де замість $q_{\text{Q по}}$ використовується $q_{\text{Т0 по}}$, який визначається за формулою (4.10):

$$q_{\text{Т0 по}} = \frac{t_{\text{Т0 по}} - t_{\text{Т}}}{R_{\text{Т0 по}}} \quad (4.10)$$

де $t_{\text{Т по}}$ – показання термопар, встановлених в нижньому поді, К; $R_{\text{Т0 по}}$ – термічний опір ділянки «гарячий спай термопар охолодження поду – гарячий спай термопар нижнього поду», (К·м²)/Вт.

Оскільки відношення товщини поду до внутрішнього діаметру горна для різних об'ємів доменних печей знаходиться в межах $0,5 \div 0,3$, то при розрахунку залишкової товщини футерівки центрального стакану поду можна користуватися одновимірним рівнянням теплопровідності через плоску багатошарову стінку.

Розрахунок товщини залишкової футерівки центрального стакану поду визначається по формулі (4.4), а товщина утвореного гарнісажу – за формулою (4.6).

4.2 Модель контролю теплової роботи периферійної зони і розпалу футерівки печі (САК «Горн»)

Описаний метод контролю теплової роботи і розпалу футерівки металоприймача (п. 4.1) покладено в основу системи автоматизованого контролю теплової роботи та розпалу футерівки горна та поду – математичної моделі «Горн», яка встановлена більш, ніж на 10 доменних печах.

На сьогоднішній день ІЧМ НАНУ займає провідні позиції в Україні щодо реалізації та впровадження на доменних печах систем автоматизованого контролю теплової роботи і розпалу футерівки горна та поду.

Основні функції САК «Горн»:

1. Відображення трендів зміни температури футерівки по рівням встановлення термопар.

2. Розрахунок і відображення трендів локальних питомих теплових навантажень на футерівку шахти в місцях установки термопар.

3. Відображення горизонтальних і вертикальних профілів розпалу футерівки та утворення гарнісажу по периметру горна та поду печі по рівням установки термопар і холодильним плитам периферійного охолодження горну та поду.

4. Відображення розгортки профілю горна та поду і теплових навантажень у кольоровій шкалі.

5. Своєчасне визначення та запобігання розпалу футерівки та утворення настилів, розладів у тепловій роботі печей.

6. Забезпечення інженерно-технічного персоналу інформацією, що дозволяє своєчасно стежити за станом футерівки доменної печі, товщиною утвореного гарнісажу і питомих теплових навантажень, а також впливати на них.

САК «Горн» дає можливість в автоматизованому режимі контролювати динаміку зміни теплових навантажень і температур футерівки в точках контролю та виводити дану інформацію на екран для технологів доменної печі (рис. 4.1-4.2).

Товщина футерівки та гарнісажу виводиться на відеокадри вертикальних та горизонтальних перерізів в залежності від розташування точок контролю та на картограму периферії при виборі дати (рис. 4.3-4.4).

САК «Горн» дозволяє переглянути в колірній шкалі розподіл теплових навантажень на поверхню горна та поду, а також залишкову товщину футерівки (товщину кладки та товщину гарнісажу) по рядах холодильників горна та поду, за рівнями встановлення термопар (рис. 4.5-4.6).

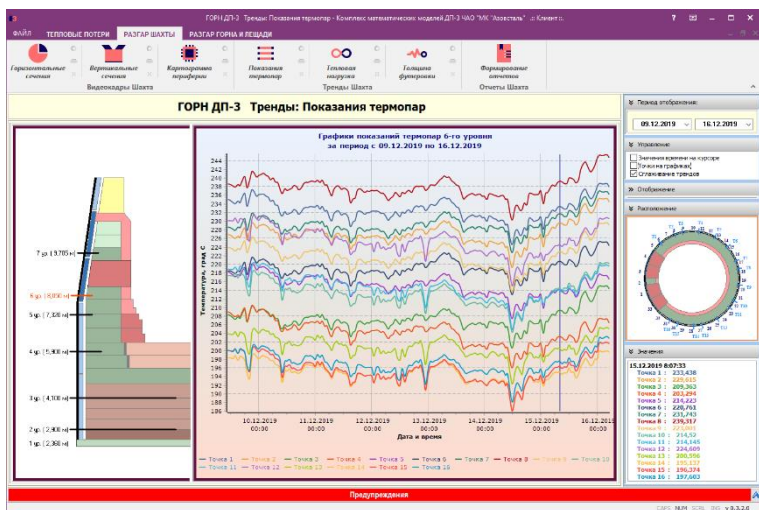


Рисунок 4.1 – Приклад відеокадру трендів температури футерівки на кожному горизонті контролю

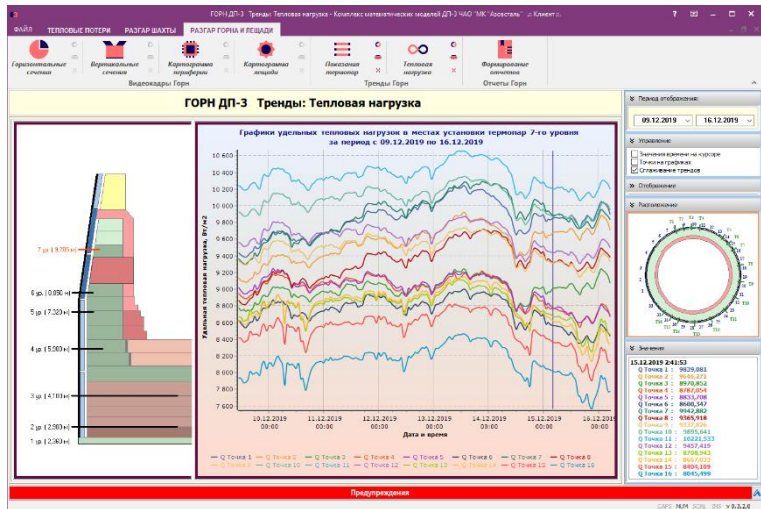


Рисунок 4.2 – Приклад відеокадру трендів теплових навантажень на кожному горизонті контролю

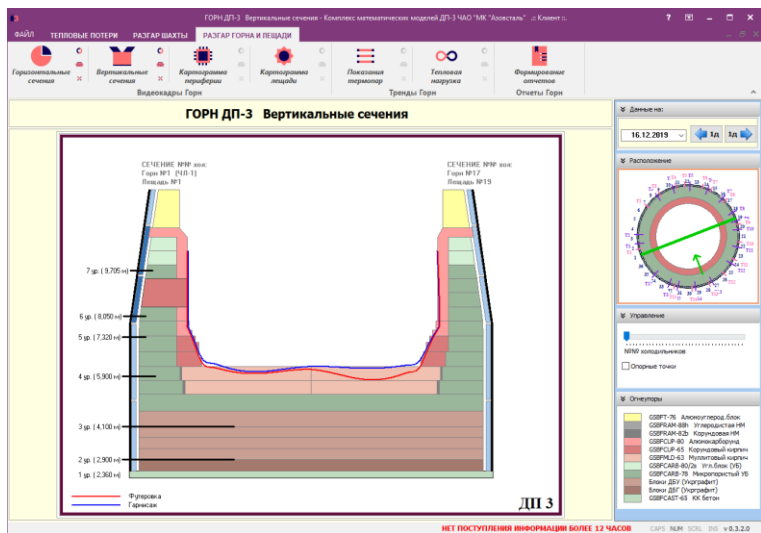


Рисунок 4.3 – Приклад відеокадру вертикального перерізу профілю розпапу футерівки горна та поду

Розділ 4. Метод і модель контролю теплової роботи, розпалу футерівки і утворення гарнісажу в металлоприймачі доменної печі

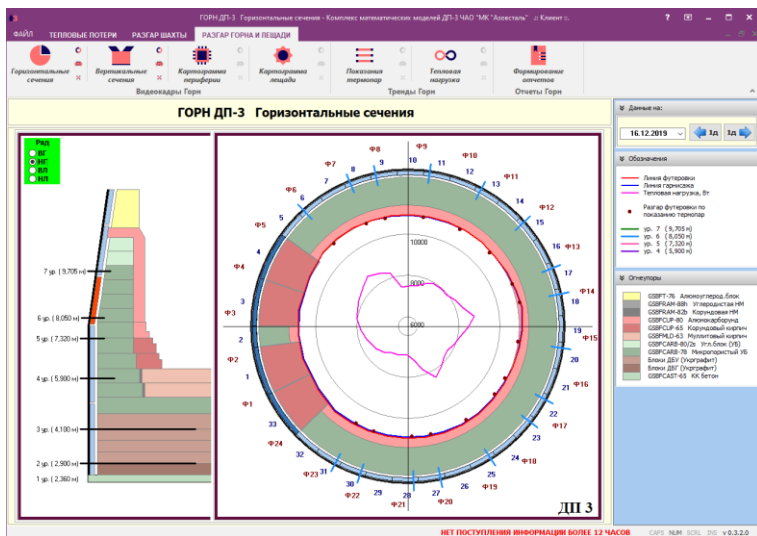


Рисунок 4.4 – Приклад відеокадру горизонтального перерізу профілю розпалу футерівки горна

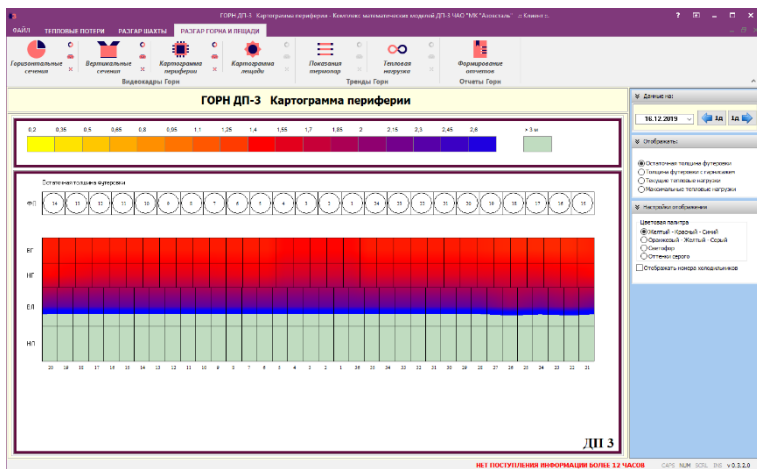


Рисунок 4.5 – Приклад відеокадру картограми периферії горна

Розділ 4. Метод і модель контролю теплової роботи, розпапу футерівки і утворення гарнісажу в металлоприймачі доменної печі

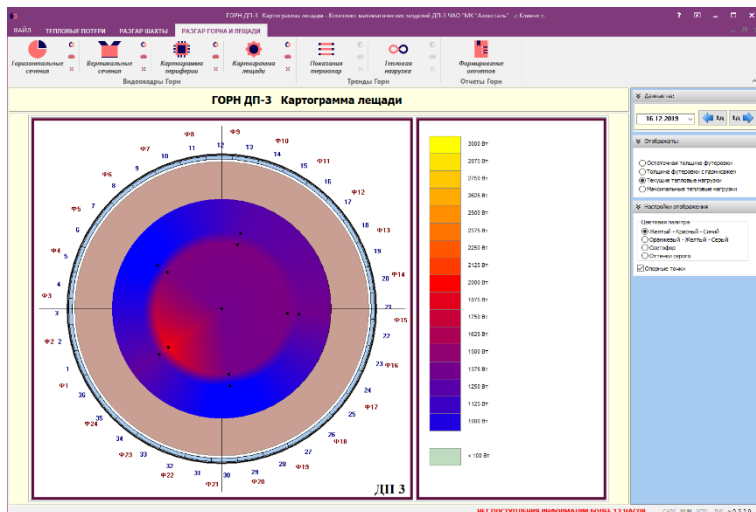


Рисунок 4.6 – Приклад відеокадру картограми периферії поду

На рисунках 4.7-4.8 наведено приклад звіту про залишкову товщину футерівку, гарнісажу та сумарну їх товщину (профіль) за добу.

ОТЧЕТ						
Тепловое состояние металлоприемника ДП-3 по состоянию на 15 декабря 2019 г.						
№№ холодильников	Текущая тепловая нагрузка, Вт/м ²	Максимальная тепловая нагрузка, Вт/м ²	Проектная толщина футеровки, м	Остаточная толщина футеровки, м	Толщина гарнісажу, м	Суммарная толщина, м
Нижний горн						
1	7 643	8 185	1,640	1,610	0,038	1,649
2	7 853	8 363	1,640	1,601	0,033	1,633
3	8 064	8 540	1,640	1,591	0,027	1,617
4	8 274	8 718	1,640	1,581	0,021	1,602
5	8 485	8 895	1,540	1,475	0,014	1,489
6	8 695	9 073	1,540	1,466	0,008	1,475
7	8 609	8 942	1,540	1,486	0,007	1,493
8	8 522	8 810	1,540	1,505	0,006	1,512
9	7 568	8 034	1,540	1,540	0,031	1,571
10	7 419	8 045	1,540	1,540	0,037	1,576

Рисунок 4.7 – Приклад відеокадру картограми периферії поду

ОТЧЕТ	
Тепловое состояние низа ДП-3 по состоянию на 15 декабря 2019 г.	
Параметр контроля	Значение
Средняя температура термопар 1-го уровня, град	62,35
Средняя температура термопар 2-го уровня, град	101,67
Средняя температура термопар 3-го уровня, град	300,05
Расход воды на подлещадное охлаждение, м3/час	85,70
Тепловая нагрузка на центр лещади ($R = 2.8$ м), Вт	37628
Глубина разгара, м	0,225
Глубина зумпфа, м	2,975
Остаточная толщина муллитового кирпича (GSBFMLD-63), м	0,775
Остаточная толщина лещади, м	3,525
Толщина гарнисажа, м	0,370

Рисунок 4.8 – Приклад відеокадру картограми периферії поду

Залишкова товщина футерівки формується за даними останнього розрахунку обраної дати, проведеного за середньогодинними параметрами, товщина гарнісажу наводиться за середньою за 24 години величиною, сумарна товщина футерівки і гарнісажу (профіль) виходить в результаті підсумовування вищеписаних значень. У таблиці також вказано середньодобове значення теплових навантажень та її максимальне значення за весь період накопичення даних.

У період з 2014 по 2020 рр. 3 печі доменного цеху ПАТ «Запоріжсталь» та 1 піч ПрАТ «МК «Азовсталь» за технологічним завданням ІЧМ НАНУ було оснащено системами автоматизованого контролю розпалу футерівки горна та поду (САК «Горн»). Це дозволило обґрунтовано оцінювати вплив технічних, конструкційних та технологічних рішень на стан футерівки і тривалість кампанії цих доменних печей.

4.3 Аналіз теплової роботи металоприймача доменних печей різних конструкцій за інформацією з САК «Горн»

Виконано аналіз теплової роботи 5 доменних печей України з різною конструкцією металоприймача за інформацією з САК «Горн»:

1) ДП №8 ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» об'ємом 2700 м³ – керамічний стакан Saint-Gobain, система охолодження – технічна вода;

2) ДП №3 ПрАТ «МК «Азовсталь» об'ємом 1800 м³ – керамічний стакан Gongyi Anzheng, система охолодження – хімічно очищена вода;

3) ДП №3 ПАТ «Запоріжсталь» об'ємом 1513 м³ – керамічний стакан Gongyi Anzheng, система охолодження – технічна вода;

4) ДП №4 ПАТ «Запоріжсталь» об'ємом 1513 м³ – без керамічного стакана, система охолодження – технічна вода;

5) ДП №2 ПАТ «Запоріжсталь» об'ємом 1513 м³ – без керамічного стакана, система охолодження – технічна вода.

Так як теплові втрати є інтегральним параметром, що дозволяє якісно і кількісно оцінювати теплову роботу контрольованих зон і печі в цілому, то спочатку виконано співставлення теплових втрат металоприймача в системі охолодження розглянутих доменних печей (рис. 4.9).

Встановлено, що більші теплові втрати ~1,4-1,8 МВт спостерігалися на ДП №8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ДП №2 і ДП №4 ПАТ «Запоріжсталь», менші – ~0,9-1,3 МВт – на ДП №3 «Запоріжсталь» і ДП №3 ПрАТ «МК «Азовсталь».

Однак звичайне співставлення теплових втрат не дозволяє оцінити вплив конструкції печі на теплову роботу горна та поду через різний об'єм доменних печей і, як наслідок, різного обсягу виробленого чавуну. Тому виконана оцінка питомої величини теплових втрат металоприймача на одиницю об'єму доменної печі (рис. 4.10).

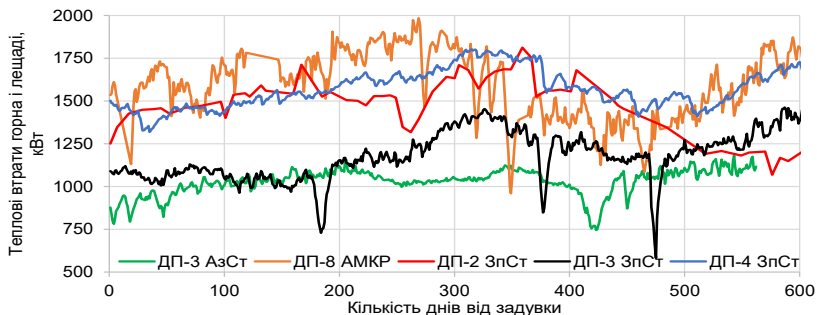


Рисунок 4.9 – Динаміка теплових втрат горна та поду доменних печей України

На рисунку: ДП-3 АзСт – ДП №3 ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ», ДП-8 АМКР – ДП №8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ДП-2, ДП-3, ДП-4 ЗпСт – ДП №2, 3, 4 ПАТ «Запоріжсталь»

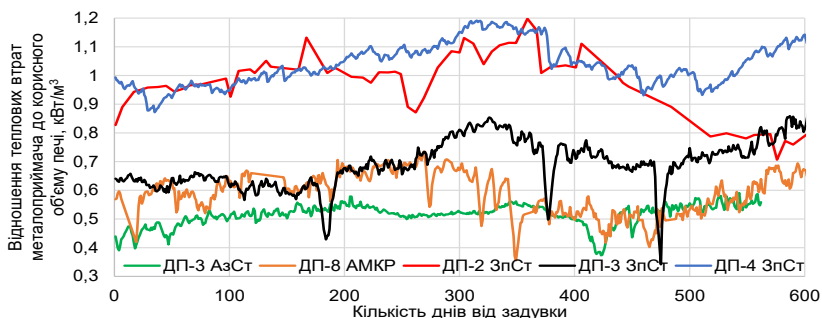


Рисунок 4.10 – Динаміка питомих теплових втрат горна і поду на одиницю об'єму доменної печі

На рисунку: ДП-3 АзСт – ДП №3 ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ», ДП-8 АМКР – ДП №8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ДП-2, ДП-3, ДП-4 ЗпСт – ДП №2, 3, 4 ПАТ «Запоріжсталь»

Величина питомих теплових втрат на одиницю об'єму печі на доменних печах з керамічним стаканом ($\sim 0,4-0,7$ кВт/м³) істотно менше, ніж на доменних печах без нього ($\sim 0,9-1,1$ кВт/м³). Така відмінність між питомими тепловими втратами еквівалентна меншій витраті коксу на компенсацію теплових втрат горна і поду на $0,5-1,1$ кг/т на доменних печах з керамічним стаканом.

Найменші теплові втрати горна та поду (як питомі, так і абсолютні) спостерігаються на ДП №3 ПрАТ «МК «Азовсталь», що ймовірно пов'язано із застосуванням хімічно очищеної води в системі охолодження доменної печі та її великими витратами (на ~25-30%) в порівнянні з витратами технічної води на інших доменних печах.

Таким чином, встановлено, що узагальнюючим параметром для порівняння теплової роботи металоприймача на доменних печах є питомі теплові втрати на одиницю корисного об'єму печі.

Мінімальні, максимальні та середні теплові втрати горна та поду зведено в таблицю 4.1.

Таблиця 4.5 – Мінімальні, максимальні та середні теплові навантаження теплових втрат горна і поду доменних печей України

Доменна піч	Теплові втрати, кВт			Питомі теплові втрати на одиницю корисного об'єму печі, кВт/м ³		
	min	середнє	max	min	середнє	max
ДП №3 «МК «Азовсталь»	746	1030	1181	0,373	0,515	0,591
ДП №8 «АМКР»	961	1605	1984	0,356	0,594	0,735
ДП №3 «Запоріжсталь»	583	1248	1488	0,342	0,732	0,872
ДП №2 «Запоріжсталь»	862	1381	1813	0,570	0,912	1,198
ДП №4 «Запоріжсталь»	1319	1573	1803	0,872	1,040	1,192

* сірою заливкою виділено доменні печі з «керамічним стаканом»

Збільшення/зменшення теплових втрат горна і поду (теплових навантажень на систему охолодження) свідчать про зменшення/збільшення товщини гарнісажу, величину якого дозволяє визначити САК «Горн» (рис. 4.11).

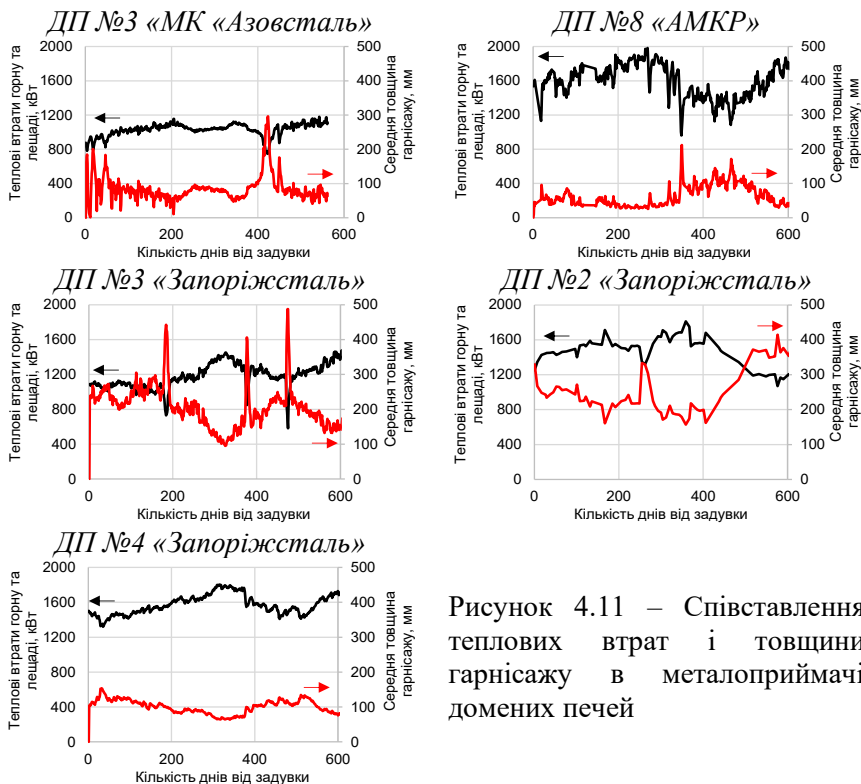


Рисунок 4.11 – Співставлення теплових втрат і товщини гарнісажу в металлоприймачі доменних печей

Співставлення теплових втрат по зонам металлоприймача показало практично однаковий розподіл на різних доменних печах. На ДП №8 «АрселорМіттал Кривий Ріг» спостерігається велика частка теплових втрат в нижньому горні (40%) в порівнянні з іншими печами, що може бути пов'язано з конструкцією металлоприймача. Також великі теплові втрати систем охолодження поду і нижнього поду на ДП №3 «Азовсталь», ДП №2 і ДП №3 «Запоріжсталь» можуть свідчити як про особливості конструкції печі, так і про розпал футерівки внизу печей (рис. 4.12).

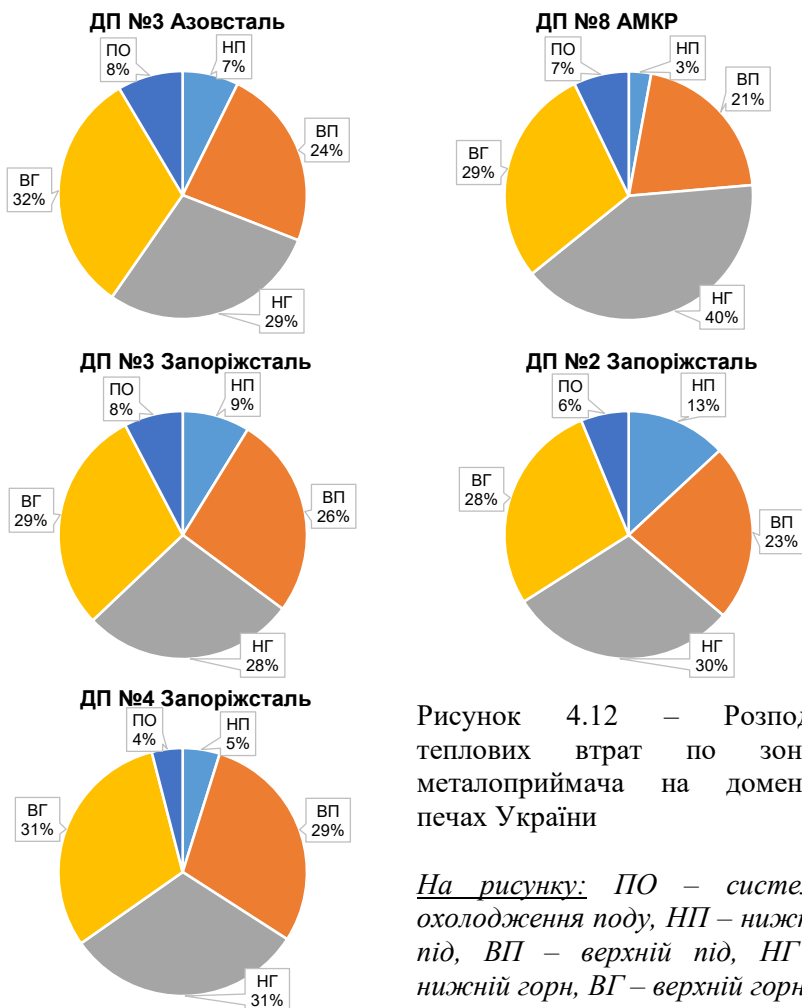


Рисунок 4.12 – Розподіл теплових втрат по зонам металлоприймача на домених печах України

На рисунку: ПО – системи охолодження поду, НП – нижній під, ВП – верхній під, НГ – нижній горн, ВГ – верхній горн

ВИСНОВКИ

Сучасна технологія доменної плавки є складною багатофакторною системою, спрямованою на підвищення економічності, надійності та продуктивності доменних печей. Ключовою умовою стабільної та безпечної роботи агрегатів є забезпечення експлуатаційної надійності системи огороження доменної печі, що зумовлює актуальність розвитку методів контролю та діагностики її технічного стану.

Розробка та впровадження у доменному виробництві методів і математичних моделей кількісної оцінки ресурсу та енергоефективності роботи доменних печей дозволили сформувати формалізований інструментарій для комплексного аналізу існуючих і перспективних режимів, технічних рішень і технологій на основі взаємопов'язаної оцінки фактичних і прогнозних параметрів процесу плавки.

У роботі проаналізовано сучасні напрями проєктування футерівки та систем охолодження доменних печей, виконано критичний аналіз існуючих методів контролю і діагностики теплової роботи та стану футерівки, визначено їх переваги й обмеження. На цій основі обґрунтовано доцільність зміни конструкції шахти, розпару та заплечиків доменної печі, зокрема:

- оптимальний кут нахилу заплечиків на рівні $75-76^\circ$ при їх висоті не менше $\sim 3,0$ м;

- реалізацію розпару із встановленням вертикального мідного холодильника, футерованого карбідокремнієвим вогнетривом, висотою не менше 2,5 м;

- забезпечення співвідношення діаметра розпару до діаметра горна на рівні 1,2–1,25 для стабілізації газодинамічної роботи печі;

- відмову від використання L-подібних холодильних плит у шахті та застосування вертикальних мідних холодильників у нижній частині шахти, з подальшим використанням чавунних холодильних плит у верхніх зонах.

Встановлено, що сучасна система охолодження доменної печі повинна базуватися на трьох замкнених контурах охолодження хімічно очищеною водою, з функціональним розподілом зон охолодження горна, поду, заплечиків, розпару, шахти та футерного приладу.

Показано, що підвищення експлуатаційної надійності горна та подовження кампанії доменних печей у світовій практиці досягається шляхом удосконалення конструкцій горна і поду, застосування нових поколінь вогнетривких матеріалів, оптимізації систем охолодження металоприймача та використання сучасних автоматизованих систем управління технологічними процесами з підсистемами контролю теплового стану футерівки.

Обґрунтовано ефективність застосування комбінованої системи охолодження горна та поду, що поєднує водяне охолодження із закладенням графітових блоків. Реалізація такого підходу на доменних печах ПАТ «Запоріжсталь» та ПрАТ «МК «Азовсталь» забезпечила інтенсивне охолодження поду, запобігання його прогару та підвищення ресурсу роботи агрегатів.

Розроблено метод безперервного контролю теплової роботи шахти, залишкової товщини футерівки та формування гарнісажу, що дозволило кількісно оцінити закономірності зносу футерівки по висоті печі. На його основі створено та впроваджено в складі АСУ ТП математичну модель автоматизованого контролю теплової роботи та розпалу шахти доменної печі (САК «Шахта»), яка забезпечує:

- безперервний контроль теплових навантажень і стану огородження;
- оцінку товщини футерівки та гарнісажу в реальному часі;
- підвищення ефективності оперативного управління тепловим режимом печі;

- розробку науково обґрунтованих рекомендацій щодо зниження питомих витрат коксу та попередження розладів теплогазодинамічного режиму.

Результати експлуатації САК «Шахта» підтвердили доцільність використання мідних охолоджувальних елементів і високотеплопровідної карбідокремнієвої футерівки в зоні заплечиків і нижній частині шахти, а також чавунних холодильних плит із вмонтованим ШПД у верхній частині шахти. Застосування комбінованих систем охолодження дозволило збільшити ресурс роботи шахти та зменшити питомі витрати коксу на 8–26 кг/т чавуну після капітальних і відновлювальних ремонтів.

Вперше розроблено метод безперервного визначення витрат коксу на компенсацію теплових втрат у системі охолодження доменних печей. Встановлено, що збільшення теплових втрат на 1 МВт призводить до зростання витрат коксу в середньому на 1,2–2,5 кг/т чавуну, а питомі теплові втрати є узагальнюючим параметром для оцінки теплової роботи доменних печей і доменних цехів у цілому.

На основі цього методу створено та впроваджено математичну модель автоматизованого контролю теплових втрат і витрат коксу на їх компенсацію (САК «Теплові втрати»), яка використовується для нормування витрат коксу, обґрунтування ремонтних рішень, оцінки ефективності технологічних режимів та виявлення порушень у роботі печей.

Показано, що автоматизований контроль теплового стану металоприймача в режимі реального часу є одним з ключових факторів безпеки та довговічності доменних печей. Запропонований в ІЧМ НАН України метод контролю покладено в основу системи САК «Горн», яка впроваджена більш, ніж на десяти доменних печах і підтвердила свою ефективність у промислових умовах.

Методи і моделі контролю та діагностики стану огороження периферійної зони доменної печі, розглянуті в

монографії, створюють науково обґрунтовану основу для подальших досліджень тепло- та масообміну, а також можуть бути ефективно використані при проектуванні та реконструкції доменних печей, управлінні тепловими режимами, технічній експертизі стану футерівки та вдосконаленні систем охолодження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Доменное производство «Криворожстали» / В. И. Большаков, А. В. Бородулин, Н. А. Гладков [и др.]. Кривой Рог : Мира, 2004. 376 с.
2. Тепловая работа и перспективные конструкции шахты и металлоприемника доменной печи при применении пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. В. Бородулин, А. Л. Чайка [и др.]. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 3. С. 106–110.
3. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива на доменных печах Украины / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь [и др.]. *Металл и литье Украины*. 2013. № 10. С. 5–10.
4. Влияние технологии применения пылеугольного топлива на показатели тепловой работы доменной печи, полезным объемом 3000 м³ / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь [и др.]. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2014. Вып. 29. С. 31–41. URL: https://jrn.isi.gov.ua/wp-content/uploads/2022/04/sb2014_29.pdf (дата звернення: 05.02.2026).
5. Влияние режима работы доменной печи № 4 ПАО «Запорожсталь» с применением пылеугольного топлива на разгар футеровки и тепловую работу периферийной зоны / А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, А. А. Сохацкий [и др.]. *Экология и промышленность*. 2015. № 4. С. 53–61.
6. Современный доменный процесс. Введение / М. Геердес, Р. Ченьо, И. Курунов [и др.]. М. : Металлургиздат, 2016. 280 с.
7. Доменное производство на рубеже XXI века / Н. А. Савчук, И. Ф. Курунов. *Новости черной металлургии за рубежом*. 2000. Ч. 2, прил. 5. С. 38.
8. Домна в энергетическом измерении / А. В. Бородулин, А. Д. Горбунов, В. И. Романенко, С. П. Сущев. Днепродзержинск : ДГДУ, 2006. 542 с.
9. Освоение работы доменной печи, полезным объемом 3000 м³, с применением пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь [и др.]. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 4. С. 36–40.

10. Перспективы использования теплоэнергетических параметров доменной плавки в составе АСУ ТП доменной печи / А. Л. Чайка, Д. В. Пинчук, С. В. Кетлер [и др.]. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2011. Вып. 24. С. 77–88.
11. Системная надежность доменного производства с использованием пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь [и др.]. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 7. С. 22–30.
12. Влияние футеровки и системы охлаждения шахты на расход кокса и ресурс доменных печей ПАО «Запорожсталь» при применении пылеугольного топлива / С. В. Гоман, В. И. Набока, А. П. Фоменко [и др.]. *Бюл. Черная металлургия*. 2017. № 1. С. 25–35.
13. Исследования тепло-газодинамической работы в «сухой» зоне доменной печи и применение их результатов / В. И. Большаков, А. А. Сохацкий, А. Л. Чайка, А. Г. Шевелев. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. № 2. С. 15–19.
14. Системный подход к тепловым потерям доменных печей / А. В. Бородулин, А. Л. Чайка, А. А. Сохацкий [и др.]. *Бакунинские чтения: Индустриальная модернизация Урала в XVIII–XXI вв. : XII Всерос. науч. конф.*, Екатеринбург, 4–5 дек. 2014 г. : материалы : в 2 т. Екатеринбург : УМЦ-УПИ, 2014. Т. 1. С. 613–617.
15. Чайка А. Л. Контроль состояния ограждения доменных печей с использованием термограмм. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 4. С. 109–111.
16. Новые методы контроля технического состояния ограждения доменных печей без останова технологического процесса / В. И. Большаков, С. П. Суцев, А. Л. Чайка [и др.]. *Бюл. Черная металлургия*. 2006. № 6. С. 27–38.
17. Выявление рациональных режимов загрузки железорудных материалов в колошниковое пространство печи при повышенной доле окатышей в шихте / С. К. Сibaгатуллин, А. С. Харченко, М. М. Кашапов [и др.]. *Теория и технология металлургического производства*. 2017. № 3 (22). С. 4–9.
18. Системная надежность доменного производства, опыт и перспективы освоения технологии доменной плавки с использованием пылеугольного топлива на Украине /

- В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь [и др.]. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2014. Вып. 28. С. 16–31.
19. Совершенствование конструкции шахты и металлоприемника доменных печей при использовании пылеугольного топлива / А. Л. Чайка, А. А. Сохацкий, Г. В. Панчоха [и др.]. *Экология и промышленность*. 2014. № 2. С. 28–35.
20. Тепловая работа доменной печи, полезным объемом 3000 м³, при переходе на технологию применения пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь [и др.]. *VI Междунар. конгресс по агло-коксо-доменному производству*, Ялта, 20–24 мая 2013 г. 2013. С. 261–270.
21. Перспективы развития средств автоматизированного контроля для обеспечения надежности и экономичности доменной плавки на основании информации о тепловой работе шахты / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, А. А. Сохацкий [и др.]. *IV межотрасл. науч.-практ. конф. «Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды»*, Харьков, 25–26 март. 2015 г. 2015. С. 81–85.
22. О целесообразности автоматизированного контроля тепловой работы и разгара футеровки доменной печи при применении пылеугольного топлива / А. Л. Чайка, К. С. Цюпа, А. А. Сохацкий [и др.]. *XXIII Всеукр. науч.-практ. конф.*, Київ, 21 квіт. 2015 р. 2015. С. 26–35.
23. Контроль суммарной величины тепловых потерь с охлаждающей водой на печах доменного цеха и их практическое приложение / В. И. Большаков, А. В. Бородулин, В. С. Листопадов [и др.]. *Междунар. науч.-практ. конф. «Творческое наследие В. Е. Грум-Гржимайло»*, Екатеринбург, 26–28 март. 2014 г. 2014. С. 74–80.
24. Результаты работы системы автоматизированного контроля теплового состояния и разгара футеровки шахты доменной печи при вдувании пылеугольного топлива / А. Л. Чайка, К. С. Цюпа, А. А. Сохацкий [и др.]. *XI науч.-практ. конф. «ЛИТБЕ. Металлургия. 2015»*, Запорожье, 26–28 мая 2015 г. Запорожье : ЗТПП, 2015. С. 431–433.
25. Пат. 104228 Україна, МПК С 21 В 7/21. Спосіб контролю ходу доменної печі / В. І. Большаков, О. В. Бородулін, О. Л. Чайка,

- О. І. Швачка ; № а201209096 ; заявл. 24.07.2012 ; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 8. 8 с.
26. К вопросу выбора огнеупорных материалов, опираясь на системы диагностики состояния футеровки горна и шахты доменной печи / А. В. Бородулин, Г. В. Панчоха, Е. И. Шумельчик [и др.]. *Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности* : Междунар. науч.-техн. конф., Харьков, 26–27 апр. 2011 г. : тез. докл. Харьков, 2011. С. 12–13.
27. Металлургия чугуна : учебник / Е. Ф. Вегман, Б. Н. Жеребин, А. Н. Похвиснев [и др.] ; под ред. Ю. С. Юсфина. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Академкнига, 2004. 774 с. ISBN 5-94628-120-8.
28. Анализ и влияние увеличения расхода ПУТ на разгар футеровки, изменение тепловых потерь и расход кокса / А. Л. Чайка, А. П. Фоменко, В. И. Набока [и др.]. *Сталь*. 2018. № 8. С. 7–9.
29. Миттал Й. Прогресс в области огнеупорной футеровки горнов доменных печей. *Сталь*. 2005. № 11. С. 20–22.
30. Новая концепция футеровки горна и лещади доменной печи комбината Зальцгиттер Флашталль / Ю. Петке, Т. Штисович, П. Силвен. *Сталь*. 2005. № 7. С. 27–31.
31. Стойкость доменных печей: современный уровень, развитие и мероприятия по продлению кампании / В. Ковальски, Х. Б. Люнген, К. П. Штриккер. *Черные металлы*. 1999. Сент. С. 26–35.
32. Удлинение кампании доменной печи – факторы, влияющие на стойкость футеровки горна / Э. Вильмс, Й. Янг, Г. Б. Люнген [и др.]. *Черные металлы*. 1993. № 6. С. 35–48.
33. Modernization and Reline of Hoogovens No. 7 Blast Furnace / N. Noort, I. Ruoff, K. Schmidt [et al.]. *Iron and Steel Engineer*. 1994. Vol. 71, No. 10. P. 29–40.
34. Новые концепции в конструкции футеровки и систем охлаждения доменных печей. *Новости черной металлургии за рубежом*. 1997. № 1. С. 19–26.
35. Blast Furnace Hearth Design and Operation for Long Campaign Life / H. Stewart, B. Titterington, E. T. James. *Proceedings 3rd European Ironmaking Congress, Belgium*, 1996. P. 248–256.
36. Футеровка горна доменной печи и концепция охлаждения / Р. Хебель, Ф. Хилле. *Черные металлы*. 2008. Июль. С. 39–45.

37. Эксплуатация доменных печей с горнами различной конструкции на заводе компании Salzgitter Flachstahl / Ю. Петке, Т. Миркович, Ф. Хилле [и др.]. *Черные металлы*. 2012. № 9. С. 46–53.
38. Эволюция дизайна горна доменной печи / R. McNally, M. Serradeill, F. Roulet.
39. Применение медных холодильников в горне доменной печи и их влияние на конструкцию огнеупорной футеровки / Й. Янц, Д. Рингель, Д. Люкке [и др.]. *Черные металлы*. 2012. Ноябрь.
40. Повышение надежности конструкции горна и лещади доменных печей за рубежом / Н. И. Савелов, Р. М. Жак. М. : Черметинформация, 1993. Вып. 2–3. 30 с.
41. Лавров В. В. Разработка и испытание систем диагностики состояния огнеупорной кладки и контроля теплового режима фурменной зоны доменной печи : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 1996. 23 с.
42. Замена футеровки на доменной печи № 1 на заводе Оита фирмы «Ниппон Стил». *Новости черной металлургии за рубежом*. 1997. № 3. С. 35–37.
43. Мероприятия по повышению кампании доменных печей фирмы «Sollac» до 15 лет / A. Dufour [et al.]. *Новости черной металлургии за рубежом*. 1995. № 3. С. 29–32.
44. Особенности реконструкции горна и шахты доменной печи № 4 на заводе Порт-Талбот / Y. L. Evans. *Новости черной металлургии за рубежом*. 1995. № 3. С. 27–29.
45. Кожух В. Я. Контроль потерь тепла в доменной печи. *Сталь*. 1965. № 4. С. 298–301.
46. Современные методы контроля остаточной толщины футеровки металлоприемника доменной печи / Д. А. Пинчук, Г. В. Панчоха, В. В. Канаев, Н. М. Можаренко. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Дніпропетровськ : ІЧМ НАН України, 2005. Вып. 11. С. 247–253.
47. Диагностика распределения газового потока в нижней части доменной печи путем измерения тепловых потерь с охлаждающей водой в районе I-й ступени теплообмена / В. Н. Титов, И. С. Яриков, С. С. Ляпин [и др.]. *Материалы межзаводской школы по обмену*

- опытом специалистов доменного производства*. М. : Черметинформация, 2003. С. 19–21.
48. Comparing the accuracy of acousto ultrasonic-echo (NDT), finite element analysis (FEA), and drilling when obtaining a blast furnace refractory lining wear profile / A. Sadri, P. Gebiski. *Proc. AISTech*, St Louis, MO, USA, 2009. P. 272–287.
49. Методы контроля разгара огнеупорной футеровки в промышленных печах / Д. А. Харламов, О. П. Коберник, А. А. Ансимов. *Фундаментальные исследования*. 2013. № 6. С. 877–879.
50. Повышение конкурентоспособности современного производства чугуна путем увеличения сроков службы футеровки шахт доменных печей / П. Г. Васильев, Д. В. Ризун. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. № 5. С. 4–7.
51. К вопросу об определении температуры газов около стен доменной печи / П. Г. Васильев, Д. В. Ризун. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1995. № 9. С. 71–72.
52. Анализ работы металлоприемника с целью увеличения продолжительности кампании доменной печи и безопасной ее эксплуатации. *Новости черной металлургии за рубежом*. 2003. № 4. С. 32–36.
53. Ультразвуковой контроль износа футеровки шахты доменной печи / П. Г. Васильев, В. Е. Левченко, Н. Е. Алпаев, А. В. Шульга. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1992. № 3. С. 3–5.
54. Новые средства диагностики работы горна доменных печей / В. Г. Макиенко, Ю. В. Серов, Б. И. Ашпин [и др.]. *Металлург*. 1995. № 10. С. 27.
55. Кудинов Г. А. Охлаждение современных доменных печей. М. : Металлургия, 1988. 256 с.
56. Диагностирование состояния футеровки металлоприемника доменной печи по тепловым нагрузкам / Е. Е. Гаврилов, А. Г. Ульянов, В. В. Канаев [и др.]. *Сталь*. 1987. № 1. С. 13–15.
57. Integration of lining and cooling system diagnostics methods into the expert system to reduce hot metal production cost and increase blast furnace productivity [Электронный ресурс] / Y. Gordon, A. Sadri, N. Izumskiy [et al.]. *AISTech*, Pennsylvania Convention Center,

- Philadelphia, 2018. URL: <http://digital.library.aist.org/pages/PR-374-186.htm>
58. Опыт и перспективы комплексного применения систем автоматизированного контроля разгара футеровки, тепловых потерь и теплоэнергетических параметров на доменных печах / А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, А. А. Сохацкий [и др.]. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 3. С. 2–9.
59. Покровский Ю. М. Очерки по истории металлургии. М. ; Л. : ОНТИ, 1936. 118 с.
60. Орешкин Г. Г. Вопросы рационализации работы доменных печей. Харьков : Metallurgizdat, 1960.
61. Китаев Б. И. Управление доменным процессом. Свердловск : УПИ, 1984. 94 с.
62. Черные металлы. 1992. № 11. С. 19–24.
63. Домна в энергетическом измерении / А. В. Бородулин, А. Д. Горбунов, В. И. Романенко, Г. И. Орел. Кривой Рог : Мир, 2004. 412 с.
64. Математическое моделирование и анализ процессов теплообмена и газодинамики в верхней зоне доменной печи с целью обеспечения надежной работы ограждения / А. А. Сохацкий, И. А. Лукьяненко, Г. Т. Цыганков [и др.]. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2007. Вып. 14. С. 50–59.
65. Тепловая работа периферийной зоны доменной печи и ее влияние на показатели доменной плавки / А. А. Сохацкий, А. Л. Чайка, А. Г. Шевелев. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2010. Вып. 22. С. 51–60.
66. Новые технические решения в охлаждении шахт доменных печей / Ю. С. Зайцев, О. В. Филипов. Харьков, 1992. С. 67–68.
67. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. Киев : Техника, 1975. 168 с.
68. Охлаждение доменных печей / С. М. Андоньев, О. В. Филипов, Г. А. Кудинов. М. : Металлургия, 1972. 367 с.
69. Местецкий Р. А. Технологические основы изготовления высококачественных доменных холодильников. Днепропетровск : АО «Днепропетросталь», 2000. 283 с.

70. Исследование состояния футеровки шахты доменной печи с использованием информации о тепловой работе периферийной зоны / К. С. Цюпа, А. Л. Чайка, А. А. Сохацкий [и др.]. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2012. Вып. 25. С. 82–91.
71. Influence of blast furnace technology and design features on heat losses in the cooling system and coke consumption for compensation of them / O. Chaika, B. Kornilov, M. Alter [et al.]. *9th European Coke & Ironmaking Congress*, Bardolino, Italy, 16–18 Oct. 2024. 2024. URL: <https://www.aimnet.it/public/Eventi/16807888778622.pdf>
72. Пат. на корисну модель 159375 U Україна, МПК C21B5/00, C21B7/00. Спосіб контролю ходу доменної печі / О. Л. Чайка, Б. В. Корнілов, В. В. Лебідь, А. О. Москалина ; № u 202401470 ; заявл. 20.03.2024 ; опубл. 21.05.2025, Бюл. № 21/2025.
73. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов / И. Д. Семикин, С. И. Аверин, И. И. Радченко. М. : Металлургия, 1965. 391 с.
74. Тепловые потери в системе охлаждения и расход кокса на их компенсацию на доменных печах различного объема / А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, К. С. Цюпа [и др.]. *Металлург*. 2019. № 3. С. 14–16.
75. Heat Losses in the Cooling System and Consumption of Coke to Compensate for Them in Blast Furnaces of Various Volumes / A. L. Chaika, V. V. Lebed', K. S. Tsyupa [et al.]. *Metallurgist*. 2019. Vol. 63, No. 3–4. P. 223–227.
76. Influence of Pulverized-Coal Consumption on Lining Damage, Heat Losses, and Coke Consumption in Blast Furnaces / A. L. Chaika, A. P. Fomenko, V. I. Naboka [et al.]. *Steel in Translation*. 2018. No. 48. P. 513–516.
77. Система оперативного промышленного контроля состояния износа футеровки металлоприемника ДП № 5 «Северсталь» / Г. В. Панчоха, В. В. Канаев [и др.]. *I Междунар. науч.-техн. конф. «Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства»*, Череповец, 1998 г. Череповец : ЧГУ, 1998. С. 18–20.

ЗМІСТ

Вступ	3
Розділ 1. Аналіз напрямів проєктування футерівки і системи охолодження та методів контролю і діагностики теплової роботи стану футерівки доменної печі.....	6
1.1 Напрями проєктування футерівки та системи охолодження доменних печей	6
1.1.1 Конструкція шахти, розпару та заплечиків доменної печі.....	7
1.1.2 Напрямки в конструюванні металоприймачів.....	10
1.1.3 Системи охолодження металоприймача	17
1.2 Аналіз існуючих методів контролю і діагностики теплової роботи та стану футерівки доменної печі.....	23
1.2.1 Аналіз існуючих способів моніторингу за станом футерівки шахти.....	23
1.2.2 Аналіз існуючих способів моніторингу за станом футерівки металоприймача	30
1.2.3 Аналіз існуючих способів моніторингу теплових втрат.....	32
Розділ 2. Метод і модель контролю теплової роботи периферійної зони і розпалу футерівки шахти	36
2.1 Метод контролю теплової роботи периферійної зони і розпалу футерівки печі	36
2.2 Аналітичне дослідження теплової роботи периферійної зони шахти і стану футерівки із використанням запропонованого методу	48
2.3 Модель контролю теплової роботи периферійної зони і розпалу футерівки печі (САК «Шахта»)	52
2.4 Використання інформації САК «Шахта» в доменному виробництві.....	57

2.4.1 Вплив витрат ПВП на розпал футерівки, теплові втрати та витрат коксу на їх компенсацію	58
2.4.2 Порівняльний аналіз теплової роботи і розпалу футерівки шахти ДП №3 з ДП №2 і ДП №4 ПАТ «Запоріжсталь»	62
Розділ 3. Метод і модель контролю теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію	69
3.1 Метод контролю теплових втрат в системі охолодження та витрати коксу на їх компенсацію	69
3.2 Реалізація системи автоматизованого контролю теплових втрат (САК «Теплові втрати») на доменних печах України	73
3.3 Використання інформації САК «Теплові втрати» в доменному виробництві	78
3.3.1 Дослідження теплових втрат в системі охолодження та витрати коксу на їх компенсацію на доменних печах різного об'єму	78
3.3.2 Дослідження теплових втрат і витрати коксу на їх компенсацію до і після проведення відновлювальних ремонтів шахти доменних печей ПАТ «Запоріжсталь»	81
3.3.3 Дослідження впливу технологічного режиму роботи ДП №2 ПАТ «МК «Азовсталь» на величину теплових втрат і витрати коксу на їх компенсацію	86
3.4 Розробка норм теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію	91
3.4.1 Взаємозв'язок теплових втрат та витрати коксу на їх компенсацію	92
3.4.2 Методика для використання при аналізі змін питомої витрати коксу в залежності від величини теплових втрат при пофакторному аналізі доменної плавки	94

Розділ 4. Метод і модель контролю теплової роботи, розпалу футерівки і утворення гарнісажу в металоприймачі доменної печі.....	97
4.1 Метод контролю теплової роботи, розпалу футерівки і утворення гарнісажу в металоприймачі доменної печі	97
4.1.1 Використання теплового навантаження на холодильники системи периферійного охолодження металоприймача доменної печі для визначення залишкової товщини футерівки	98
4.1.2 Використання температури кладки металоприймача доменної печі для визначення залишкової товщини футерівки.....	99
4.1.3 Визначення товщини гарнісажу по периферії металоприймача	100
4.1.4 Визначення товщини футерівки і утворюваного гарнісажу центрального стакану поду	101
4.2 Модель контролю теплової роботи периферійної зони і розпалу футерівки печі (САК «Горн»).....	103
4.3 Аналіз теплової роботи металоприймача доменних печей різних конструкцій за інформацією з САК «Горн»	109
Висновки.....	114
Список використаних джерел.....	118
Зміст	126



ЧАЙКА

Олексій Леонідович

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

В.о. завідувача відділу металургії чавуну Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, лауреат Премії Президента України 2005 року.

Автор понад 200 наукових праць, в тому числі 18 – в базі Scopus, 11 патентів.

Науковий фокус: розвиток і реалізація нового наукового напрямку в області доменного виробництва – системної надійності при виробництві чавуну. Основною задачею цього напрямку для доменного виробництва є пошук формалізованими методами і на

основі дослідних плавок, компромісних рішень, які забезпечують, з одної сторони, необхідний об'єм виплавки чавуну заданої якості, з другої сторони, мінімальну витрату енергетичних ресурсів і, з третьої сторони, забезпечення технічної надійності доменної печі та агрегатів, що її обслуговують, мінімального шкідливого впливу виробництва на оточуюче середовище.



КОРНІЛОВ

Богдан Володимирович

Кандидат технічних наук

В.о. завідувача лабораторії теплотехніки та енергозберігаючих технологій відділу металургії чавуну Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Автор понад 70 наукових праць, в тому числі – 1 патенту, 8 – в наукометричній базі Scopus.

Науковий фокус: дослідження теплової та газодинамічної роботи доменних печей, технології раціонального використання ПВП та інших паливних добавок, розвиток систем діагностики та автоматизованого контролю теплової роботи доменної печі та її огороження, зокрема діагностування на

ранніх стадіях розладів в роботі печі.



ШУМЕЛЬЧИК Євген Ігорович

Кандидат технічних, старший дослідник

Старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, лауреат Премії Президента України для молодих вчених 2018 р.

Автор понад 80 наукових робіт, у т.ч. 4 патенти України, 2 монографії, 33 публікацій у бібліографічній та реферативній базі даних «Scopus».

Науковий фокус: Цифрова трансформація та ІТ-рішення в металургії, від математичного моделювання процесів до розробки і впровадження спеціалізованого програмного

забезпечення контролю та управління доменною плавкою.



МЕРКУЛОВ Олексій Євгенович

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Заступник директора з наукової роботи Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України та старший науковий співробітник лабораторії теплотехніки та енергозберігаючих технологій. Отримував гранти НАН України, Українського науково-технологічного центру (США), Australian Academy of Science, учасник Fulbright Visiting Scholar Program 2025/2026 (США).

Автор 120 наукових публікацій, в тому

числі 2 монографій та 5 патентів у галузі чорної металургії та газифікації палива. Науковий фокус: системний аналіз металургії заліза та сталі, удосконалення використання палива в металургійних процесах, розробка нових енергозберігаючих металургійних технологій для виробництва металів та сплавів. Брав участь у підготовці пропозицій для Національної ради з відновлення України від наслідків війни щодо розвитку гірничо-металургійного комплексу з використанням сучасних технологій.



НАБОКА

Володимир Іванович

Кандидат технічних наук

Директор з технології та якості ПАТ «Запоріжсталь»

Автор 85 наукових праць, в тому числі 45 патентів. Співавтор не менше 50 раціоналізаторських пропозицій на ПАТ «Запоріжсталь», направлених на енерго- та ресурсозберігаючої роботи доменних печей та обслуговуючих її агрегатів.

З 1979 по 2013 рік пройшов шлях від горнового доменної печі до начальника доменного цеху, заступника головного інженера комбінату з аглодоменного виробництва та головного спеціаліста з металургійного виробництва. З 2013 до 2022

року очолював технічне управління ПАТ «Запоріжсталь», де показав себе кваліфікованим та ініціативним спеціалістом та керівником.

З 2022 року по теперішній час займає посаду Директора з технології та якості ПАТ «Запоріжсталь», де йому довелося зіткнутися з викликами забезпечення ефективної роботи металургійного комбінату в умовах порушення логістичних шляхів поставок енергоресурсів, їх дефіциту, викликаних війною в Україні.



МОСКАЛИНА

Андрій Олександрович

Кандидат технічних наук

Старший науковий співробітник лабораторії теплотехніки та енергозберігаючих технологій відділу металургії чавуну Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Автор понад 50 наукових праць, в тому числі – 1 патенту, 1 авторського свідоцтва, 4 – в наукометричній базі Scopus.

Науковий фокус: дослідження теплової роботи, теплоенергетичних та ексергетичних показників доменної плавки із застосуванням ПВП, водню та інших паливних добавок для вибору раціональних параметрів доменної плавки, розвитку методу розрахунку повного

енергетичного балансу доменної печі

Наукове видання

**ЧАЙКА О.Л., КОРНІЛОВ Б.В., ШУМЕЛЬЧИК Є.І.,
МЕРКУЛОВ О.Є., НАБОКА В.І., МОСКАЛИНА А.О.**

**МЕТОДИ І МОДЕЛІ КОНТРОЛЮ Й ДІАГНОСТИКИ СТАНУ
ОГОРОДЖЕННЯ ПЕРИФЕРІЙНОЇ ЗОНИ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ**

Монографія

Відповідальний за випуск: Зелінський П. А., Чайка О. Л.

Технічний редактор: Коломоєць В.Я.

Коректор: Чайка О. Л.

Дизайн та верстка: Чайка О. Л.

Підписано до друку: 04.03.2026 Формат: 60х84 1/16

Папір офсетний. Друк цифровий.

Умов.друк.арк. 7,53 Облік.-вид.арк. 8,54

Наклад 100 прим. Замовлення № 421

Видання та друк ТОВ «ВІЗІОН»

49050, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1

Свідоцтво про держреєстрацію № 04052442 Ю0021076

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

Серія ДК № 8176 від 16.09.2024 р.