МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. ПОТЕБНІ Ю.М.

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему Підвищення енергоефективності роботи промислових термічних установок

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1412
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)
Самойленко М.В.
(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доц. Єрофєєва А.А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент Коломієць Д.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Потебні Ю.М._____
Кафедра____електричної інженерії та кіберфізичних систем_____
Рівень вищої освіти____перший (бакалаврський) рівень_____
Спеціальність __141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка_
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
к.т.н., доц._____Д.М. Морозов
«___»_____2026__року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

_____Самойленку Максиму Вадимовичу_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Підвищення енергоефективності роботи промислових термічних установок _____
керівник роботи ___Єрофєєва А.А., к.т.н., доцент_____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_23_» грудня__205__року №_2833 - с_____
2 Строк подання студентом роботи _____11 червня 2026 р._____
3 Вихідні дані до роботи: Основне обладнання: Газова ковпакова піч типу HOg 170/535 St-H2-B виробництва компанії "EBNER", Питомі витрати енергоносіїв (у т.у.п.):Природний газ — 74%,Захисний газ — 16%,Електроенергія — 10%
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз технології відпалу та енергоносіїв термічного відділення 2) Шляхи підвищення енергоефективності обладнання термічної ділянки ПАТ «Запоріжсталь»3) Техніко-економічне обґрунтування та фінансово-економічна оцінка ефективності енергозберігаючих заходів у термічному відділенні ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь».
5 Перелік графічного матеріалу _1) План термічного відділення ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь» 2) Газова ковпакова піч типу HOg 170/535 St-H2-B фірми «EBNER» 3) Шляхи економії палива в газовій ковпаковій печі 4) Радіаційно-конвективне конвекторне кільце 5) Алгоритми та схеми автоматичного

регулювання температурно-часового режиму відпалу 6) Техніко-економічні показники енергозберігаючих заходів

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Єрофєєва А.А. к.т.н. доцент		
Розділ 2	Єрофєєва А.А. к.т.н. доцент		
Розділ 3	Єрофєєва А.А. к.т.н. доцент		

7 Дата видачі завдання 01.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технології відпалу та енергоносіїв термічного відділення	01.03.2026	
2	Шляхи підвищення енергоефективності обладнання термічної ділянки ПАТ «Запоріжсталь»	01.04.2026	
3	Техніко-економічне обґрунтування та фінансово-економічна оцінка ефективності енергозберігаючих заходів у термічному відділенні ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь»	10.05.2026	

Студент _____ _____ М.В. Самойленко

(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ А.А. Єрофєєва

(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ С.В. Башлій

(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 59 сторінок, 16 рисунків, 14 таблиць, 25 джерел.

Для обґрунтування інженерних рішень із підвищення рівнів енергоефективності термічного відділення прокатного цеху ПАТ «Запоріжсталь» проведено обчислення теплового балансу нагрівальної печі та рекуперативного вузла. Досліджено доцільність упровадження конвекторних кілець, модернізації системи подачі захисного газу, а також оптимізації температурно-часового регламенту процесу відпалу.

Оцінено економічну доцільність запропонованих енергозберігаючих заходів на основі аналізу собівартості переділу, обсягів необхідних капіталовкладень, очікуваного річного економічного ефекту та терміну окупності інвестицій.

Ключові слова: КОВПАКОВА ПІЧ, ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС, РЕКУПЕРАТОР, КОНВЕКТОРНЕ КІЛЬЦЕ, ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ТЕРМІН ОКУПНОСТІ.

ЗМІСТ

Вступ ……...7
1 Аналіз технології відпалу та енергоносіїв термічного відділення ……9
1.1 Комплексний аналіз технологічного процесу та теплофізичних особливостей світлого відпалу сталі в ковпакових печах ……9
1.2 Конструктивні особливості та технологічні регламенти відпалу холоднокатаного рулонного металопрокату в ковпакових печах …….. 13
1.3 Енергетичний аналіз та інженерно-технічні характеристики висококонвективних ковпакових печей нового покоління ……20
2 Шляхи підвищення енергоефективності обладнання термічної ділянки ПАТ «Запоріжсталь» ……22
2.1 Характеристика та техніко-конструктивні показники висококонвективної ковпакової пічної установки на газовому паливі …….. 22
2.2 Розрахунок теплового балансу та параметрів теплообміну ковпакової печі ……26
2.3 Технічні рішення щодо впровадження високотемпературних рекуператорів та радіаційно-конвективних конвекторних кілець ……..31
2.4 Розробка та обгрунтування комплексних заходів щодо інтенсифікації примусового охолодження садки ……... 37
2.5 Оптимізація алгоритмів автоматичного керування температурним режимом відпалу ……40
3 Техніко-економічне обґрунтування та фінансово-економічна оцінка ефективності енергозберігаючих заходів у термічному відділенні ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь» ……...…43
3.1 Система показників технологічної та енергетичної ефективності ковпакових печей ……. 43
3.2 Аналіз собівартості переділу та розрахунок річного економічного ефекту ……... 45

3.3 Техніко-економічні показники індивідуальних та комплексного проектів ……49

3.4 Обчислення чистої теперішньої вартості (NPV) та графік окупності інвестицій ……52

Висновки ……..55

Перелік посилань ……57

ВСТУП

Металургійне виробництво є фундаментом базової промисловості та відіграє вирішальну роль у формуванні макроекономічних показників України. Попит на холоднокатаний листовий прокат та стрічку у світовому масштабі демонструє стале зростання. Термічна обробка металопродукції здійснюється у двох основних типах технологічних агрегатів: безперервних протяжних та ковпакових печах. Протяжні агрегати характеризуються високою продуктивністю та забезпечують вищу однорідність механічних властивостей по довжині смуги, однак потребують значних початкових капітальних інвестицій і мають вузьку технологічну гнучкість. У зв'язку з цим ковпакові печі залишаються основними технологічними агрегатами, що визначають показники енергоємності та якісні характеристики рулонного металопрокату в цехах холодної прокатки.

Основними напрямами вдосконалення функціонування ковпакових печей є:

- зниження питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР);
- підвищення рівня якісних показників готового металу;
- інтенсифікація продуктивності пічного обладнання.

Ключові шляхи досягнення економії палива охоплюють:

- застосування високоефективних рекуператорів для попереднього нагріву повітря горіння до 350…390 °С, що скорочує витрату газу на 17–20%;
- підвищення інтенсивності теплообміну між нагрівальним ковпаком та муфелем (використання високошвидкісних пальників, нанесення спеціальних покриттів);
- впровадження радіаційно-конвективних кілець із низьким гідравлічним опором для активізації теплопередачі до торцевих поверхонь рулонів;

- використання волокнистих футерувальних матеріалів, що зменшує акумуляційні втрати тепла кладкою приблизно в удвічі;
- оптимізацію схеми циркуляції захисної атмосфери (подача газу циркуляційним вентилятором через центр рулону з випромінюванням струменів на внутрішню стінку муфеля), що прискорює теплообмін і скорочує тривалість циклу відпалу на 20–30%.

Процес охолодження рулонного металу під муфелем в атмосфері захисного газу здійснюється переважно конвективним шляхом. Оскільки час охолодження на повітрі значно перевищує час нагріву, саме цей період виступає головним лімітуючим фактором загальної продуктивності стенду. Допустима температура розпакування залежить від сорту сталі і для масового холоднокатаного листа становить 120…180 °С за стендовою термопарою (що відповідає 150…220 °С у внутрішніх витках рулону).

У термічному відділенні ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь» для світлого відпалу в середовищі чистого водню експлуатується блок газових ковпакових печей типу HOg 170/535 St-H2-B фірми Ebner. Базові питомі витрати ресурсів на 1 тонну садки становлять:

- умовне паливо: 55,0 кг у.п./т;
- захисний газ: 23,0 м³/т;
- електрична енергія: 21,5 кВт·год/т;
- технічна вода: 8,2 м³/т.

За собівартості кінцевого переділу 6100 грн/т та вартості вхідної сировини 5600 грн/т, додана вартість обробки становить 500 грн/т. Частка енергоносіїв у структурі цієї доданої вартості сягає понад 60%, що робить завдання розробки та впровадження енергозберігаючих заходів у термічному відділенні ПАТ «Запоріжсталь» надзвичайно актуальним.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДПАЛУ ТА ЕНЕРГОНОСІЇВ ТЕРМІЧНОГО ВІДДІЛЕННЯ

1.1 Комплексний аналіз технологічного процесу та теплофізичних особливостей світлого відпалу сталі в ковпакових печах

Основним технологічним призначенням ковпакових печей у листопрокатному виробництві є проведення рекристалізаційного світлого відпалу холоднокатаних рулонів сталевої смуги та жерсті для зняття наклепу, відновлення пластичних властивостей і формування заданої мікроструктури металу. За конструктивним виконанням та кількістю садок на одному стенді ковпакові печі класифікують на одно-, дво-, три- та багатостопні.

Базовим та найбільш поширеним типом обладнання в сучасних цехах холодної прокатки є одностопна ковпакова піч. У такій конструкції на масивному вогнетривкому стенді вертикально соосно встановлюють стопу з декількох рулонів (зазвичай 3–4 одиниці), яка зверху накривається металевим захисним муфелем. Головне завдання муфеля полягає у фізичному відокремленні робочого простору із захисною атмосферою від товщі продуктів згоряння палива.

Газодинаміка та механізм конвективного теплообміну під муфелем

Циркуляція інертного або відновного захисного газу (азотно-водневої суміші або чистого водню) здійснюється за допомогою потужного стендового вентилятора, вбудованого в центральну частину основи стенду. Напрямки руху газів та організація теплових потоків мають наступні характеристики:

1. Подача та циркуляція газу: Циркуляційний вентилятор подає захисний газ під тиском у кільцевий зазор між внутрішньою поверхнею муфеля та бічною поверхнею садки. Газ піднімається вгору до сферичного або плаского склепіння муфеля, де змінює напрямок руху на протилежний.

2. Розподіл через конвекторні кільця: Рухаючись зверху вниз, загальний потік газу розділяється на декілька паралельних горизонтальних струменів, які спрямовуються крізь міжрулонні конвекторні прокладки (кільця) до центральної внутрішньої порожнини стопи.

3. Омивання торців рулонів: Конвекторні кільця оснащені профільованими каналами змінного перерізу (звужуваними дифузорами). Це створює закручування газового потоку, підвищує локальну швидкість газу та інтенсифікує конвективну тепловіддачу безпосередньо до торцевих поверхонь рулонів, де теплопровідність металу в радіальному напрямку є суттєво нижчою порівняно з осьовою.

4. Повернення газу: З центрального каналу стопи захисний газ засмоктується крізь дифузори направляючого апарату назад у робоче колесо вентилятора, замикаючи циркуляційний контур.

Оцінка критичних умов нагріву та охолодження садки

Проведені системні експериментальні дослідження та числове моделювання температурних полів підмуфельного простору показують, що в найменш сприятливих умовах теплообміну перебуває нижній рулон садки. Це зумовлено відведенням тепла в масивне футерування стенду, а також високим гідравлічним опором на вході газу в направляючий апарат. У зв'язку з цим усі контрольно-розрахункові алгоритми та визначення тривалості температурно-часових режимів відпалу проводять стосовно теплового стану нижнього рулону.

Повний технологічний цикл світлої термічної обробки рулонного металу під муфелем охоплює три послідовні стадії:

- Період нагріву: На стенд зі встановленою садкою та муфелем опускається нагрівальний ковпак із пальниковими пристроями. Вмикається примусова циркуляція захисного газу. Теплота від пальників передається зовні муфелю випромінюванням та конвекцією продуктів горіння, а від муфеля до зовнішніх витків рулонів радіаційним випромінюванням та конвективним перенесенням циркулюючим газом.

Період ізотермічної витримки: Забезпечує вирівнювання температури по всьому перерізу й висоті стопи (включаючи «найхолоднішу точку» у внутрішніх витках нижнього рулону) та завершення процесів рекристалізації сталі.

Період охолодження: Нагрівальний ковпак знімають та краном переносять на сусідній стенд, що перебуває в стадії підготовки. Садка під муфелем починає охолоджуватися. Оскільки тривалість охолодження в 2–3 рази перевищує сумарний час нагріву та витримки, один нагрівальний ковпак зазвичай послідовно обслуговує блок із 2,5–3,5 стендів.

Для скорочення часу охолодження використовують комплекс додаткових методів: водоповітряне душирування муфеля, використання виносних газоводяних теплообмінників (байпасні системи) та застосування спеціальних ковпаків прискореного повітряного охолодження.

1.2 Конструктивні особливості та технологічні регламенти відпалу холоднокатаного рулонного металопрокату в ковпакових печах

Нагрівальний ковпак являє собою зварну циліндричну сталеву конструкцію, облицьовану всередині шаром легковагового шамоту або волокнистими вогнетривкими блоками. Для компенсації температурних розширень кладки та підвищення термоізолюючих властивостей між сталевим кожухом і вогнетривом прокладається азбестово-волокнистий прошарок. Купольне склепіння ковпака виготовляється із жаростійких фасонних матеріалів.

У нижній частині нагрівального ковпака в один або два яруси змонтовано інжекційні або високошвидкісні двоступеневі пальники. На зовнішньому кожусі встановлено газові та повітряні розподільні колектори, а також

димовідвідні канали з ежекційними пристроями для примусового видалення продуктів згоряння в цехові борови.

Загальний вигляд одностопної ковпакової печі з інжекційним пальниковим блоком та ежекційною системою димовидалення подано на рисунку 1.1.

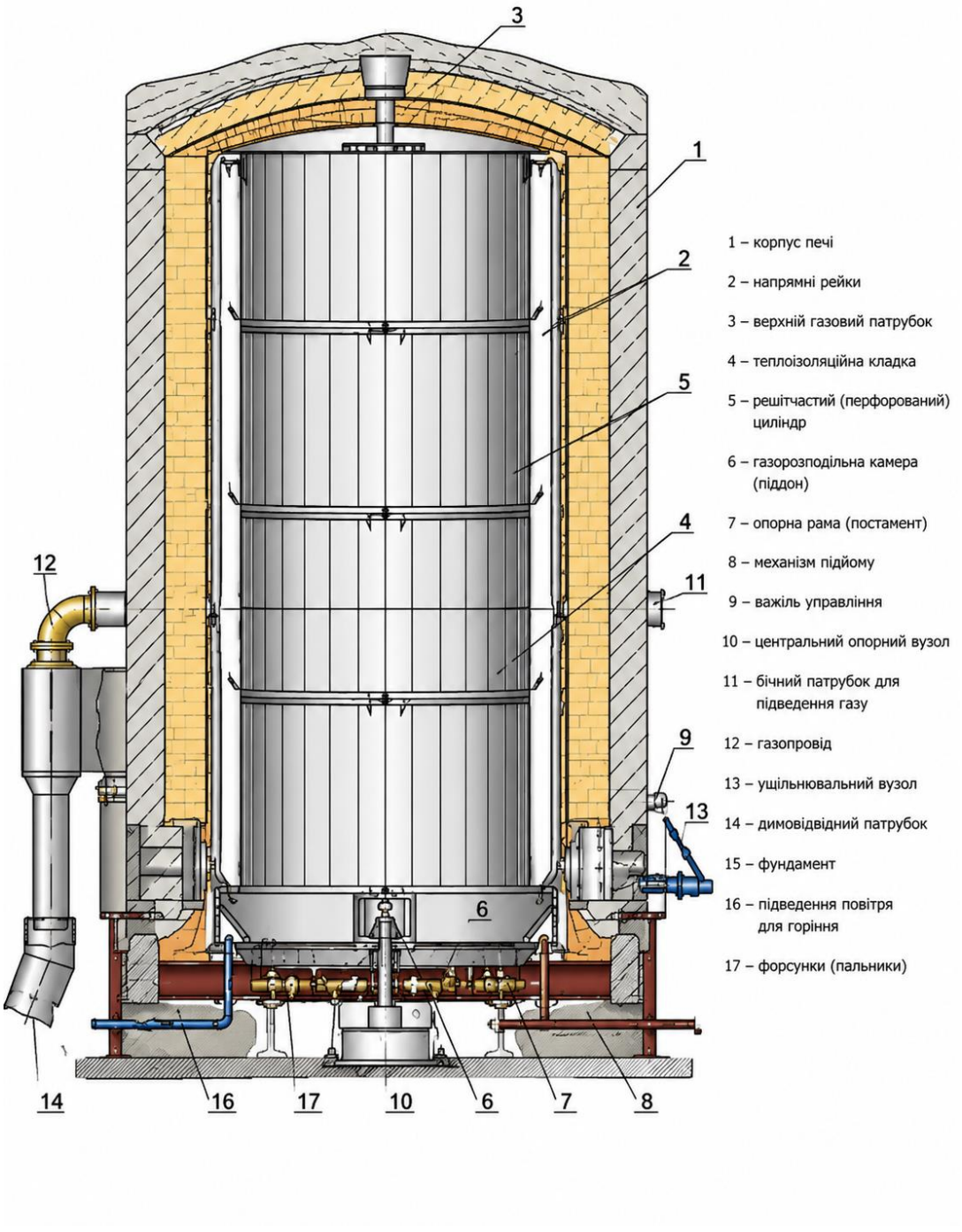


Рисунок 1.1 – Схема будови одностопної газової ковпакової печі для термічної обробки холоднокатаних рулонів

Складові елементи печі (див. рис. 1.1): 1 нагрівальний ковпак; 2 металевий муфель; 3 садка рулонів; 4 конвекторні прокладки; 5 захисна кришка; 6 стендовий циркуляційний вентилятор; 7 направляючий апарат; 8 газовий колектор; 9 інжекційний пальник; 10 байпасний канал; 11 повітряний колектор; 12 повітряний ежектор; 13 піщаний (або гідравлічний) затвор; 14 відвідний димохід; 15 трубопровід подачі захисного газу; 16 вихідний трубопровід захисного газу.

Як паливо використовується змішаний коксодоменний або природний газ із питомою витратою близько 750 $м^3$/год (скориговано від 670 $м^3$/год). Рекристалізаційний відпал стопи з 3–4 рулонів здійснюється за температури 670…730 °C в атмосфері захисного газу (азотно-воднева суміш 95…97% N_2+3…5% H_2 або чистий водень 100% H_2).

Габаритні та маса-об'ємні параметри садок і ковпаків наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Скориговані геометричні та вагові характеристики ковпаків і садки

Параметри та показники	Значення 1	Значення 2	Значення 3
Маса садки рулонів, т	85,0	140,0	200,0
Ширина сталевої смуги, мм	400	1650	1650
Висота нагрівального ковпака, мм	7200	6600	7100
Зовнішній діаметр ковпака, мм	4100	3850	5100
Маса нагрівального ковпака, т	21,5	21,)	40

Захисний муфель виготовляють із високолегованої жароміцної хромонікелевої сталі. Його внутрішній діаметр обирається на 320…360 мм більшим за максимальний зовнішній діаметр рулонів. Газ, проходячи крізь міжрулонні конвекторні кільця із закручуванням потоку, інтенсифікує нагрівання торців металу.

Несучою базою є стенд відпалу, на який спираються муфель та ковпак, а в центральній частині змонтовано циркуляційний вентилятор із направляючим апаратом.

Технологічні варіанти температурних режимів відпалу:

1. Одноступеневий нагрів: Садка нагрівається зі швидкістю 60…160 ˚С/год до 690…710 ˚С (для киплячих сталей) або 710…730 ˚С (для спокійних). Витримка та наступне уповільнене охолодження під муфелем зі швидкістю не більше 35…40 ˚С/год до 130…170 ˚С запобігають появі кольорів мінливості.

2. Двоступеневий режим з проміжною витримкою: Нагрів зі швидкістю 60…260 ˚С/год до 480…580 ˚С, ізотермічна витримка для зняття внутрішніх напружень та випаровування залишків прокатних мастил, після чого нагрів до кінцевої температури відпалу (710…740 ˚С).

Для підвищення інтенсивності теплообміну та поліпшення якості застосовують також відпал у «розпушених» (розімкнутих) рулонах із прокладанням спеціальної нитки між витками, проте ця технологія обмежена через високу трудомісткість перемотування.

Застосування захисної атмосфери 100% H_2 (технологія HICON/H2 фірми Ebner) за рахунок високої теплопровідності та низької в'язкості водню дозволяє підвищити продуктивність печей на 75–85%, зменшити витрату природного газу на 12–15% та знизити питоме електроспоживання на 20–22%.

Вплив хімічного складу сталі на механічні властивості при відпалі

Встановлено особливості впливу легуючих елементів на характеристики міцності й пластичності холоднокатаної смуги після відпалу:

Хром (Cr): викликає лише незначне зростання тимчасового опору із незначним падінням відносного подовження.

Фосфор (P): суттєво підвищує міцність, проте призводить до різкого падіння пластичності, зменшення глибини витяжки за Еріксеном та викликає схильність до холодноламкості.

Марганець (Mn): при вмісті Mn>2,0% межа міцності сталі сягає 650 МПа, а при Mn<0,7% міцність не перевищує 420 МПа.

Ніобій (Nb): додавання 0,04…0,08% Nb до сталей з 1,45% Mn суттєво підвищує міцнісні показники. При вмісті 2,6% Mn та 0,08% Nb за температур відпалу 700…750 °С межа міцності й межа текучості зростають на 60…90 МПа за рахунок гальмування рекристалізації дисперсними карбідами ніобію.

Напрями вдосконалення вузлів та газодинаміки ковпакових печей

Порівняння конструктивного виконання газощільного стенда HICON/H2 фірми Ebner та звичайного відкритого стенда наведено на рисунку 1.3.

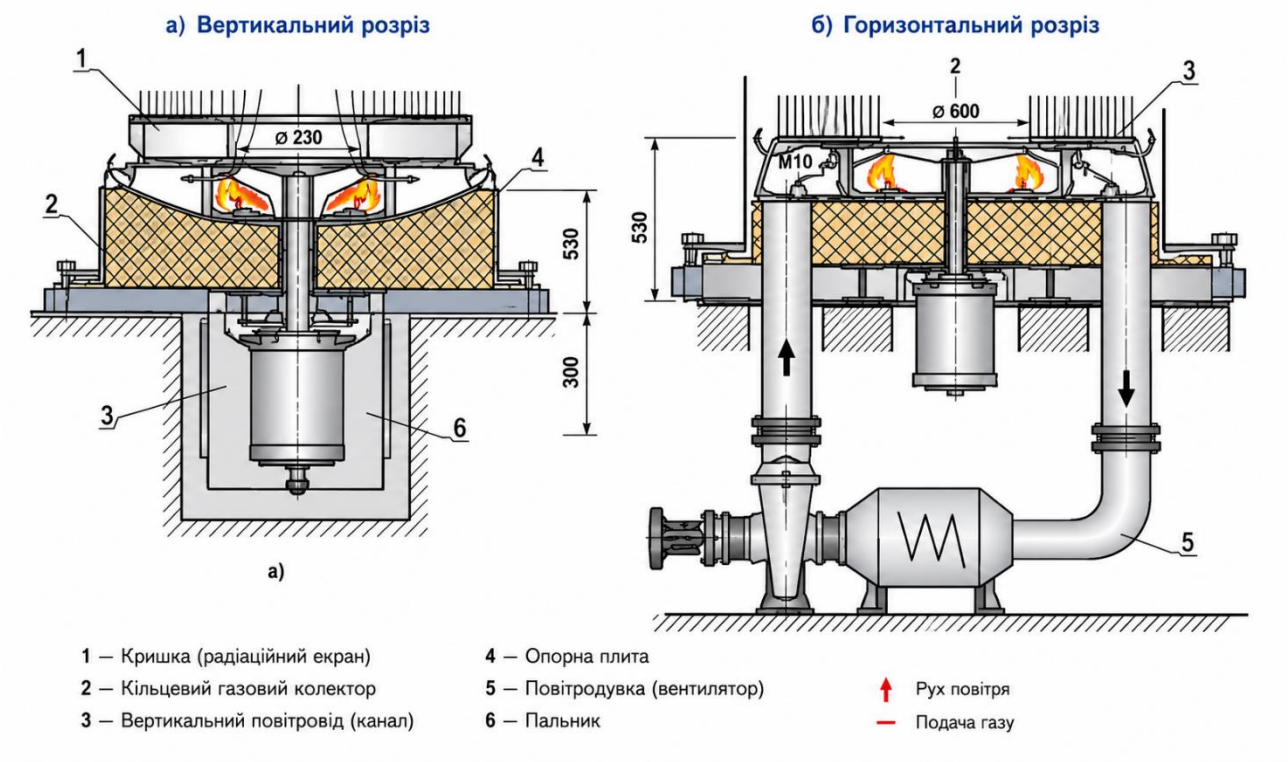


Рисунок 1.3 – Порівняння конструкції газощільного стенда в кожусі HICON/H2 (а) та стандартного відкритого стенда (б)

Конструктивні елементи (див. рис. 1.3): 1 металевий герметичний кожух стенда; 2 плаский неплотний стенд; 3 тонколистова конструкція, що деформується під навантаженням; 4 високоефективна ізоляція (товщиною 500 мм); 5 цільнометалева армована камера відпалу; 6 приводний вал циркуляційного вентилятора (2500 об/хв).

Основними перевагами сучасних газощільних стендів є:

- висока газощільність камери, що забезпечує зниження точки роси захисного газу до -60 ˚С (проти -22 ˚С у звичайних стендах);
- відсутність підсосу повітря та окислення металу;
- потужний привод вентилятора (55 кВт) з продуктивністю циркуляції до 90 тис. $м^3$/год, що створює високу конвекцію газу та рівномірність нагріву садки;
- застосування гофрованого муфеля зі збільшеною товщиною стінок, що підвищує інтенсивність теплообміну;
- зниження витрат природного газу на 2,2 $м^3$/т та охолоджувальної води на 1,2 $м^3$/т.

Загальний вигляд ковпакової печі фірми LOI для відпалу рулонів у водневому середовищі подано на рисунку 1.4.

Способи інтенсифікації охолодження рулонів та видалення мастил

Для видалення залишків мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) з поверхні смуги в ковпакових печах передбачено спалювання масляних парів спеціальним пальником допалювання.

Порівняльні характеристики основних систем охолодження муфеля наведено в таблиці 1.4.

Схема спеціалізованої позапічної ділянки остаточного охолодження та тривалого зберігання рулонів показана на рисунку 1.5.



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд ковпакової печі для відпалу рулонів у водневій атмосфері

Таблиця 1.4 Зіставлення параметрів та технологічних показників способів охолодження садки

Технічна характеристика способу	Форсункове (повітряне)	Водяне розбризкування	Байпасне + форсункове
Ступінь охолодження садки, %	68	88	100
Коефіцієнт тепловіддачі на муфелі, Вт/(м2·К)	100	600	100
Термічний вплив на стінку муфеля	Слабкий	Сильний (термошоки)	Слабкий
Термін служби муфеля, число циклів	1500–2000	500–1300	1500–2000
Шорсткість поверхні муфеля	Гладка	Шорстка (окалина)	Гладка
Капітальні витрати на установку	Низькі	Середні	Високі
Вимоги до якості охолоджувальної води	Низькі	Високі	Низькі
Замкнутий контур охолодження	Так	Ні (відкритий)	Так

Елементи схеми (див. рис. 1.5): 1 стенд охолодження; 2 герметичний захисний ковпак; 3 міжрулонні конвекторні кільця; 4 центральний трубопровід подачі осушеного повітря; 5 трубопровід повернення нагрітого повітря; 6 розплідний повітропровід; 7 газоводяний холодильник; 8 установка абсорбційного осушення повітря.

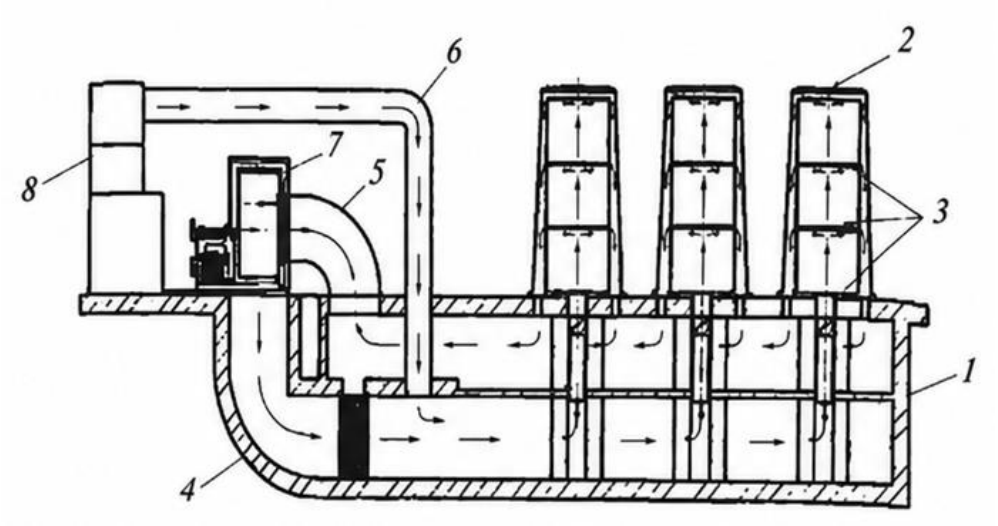


Рисунок 1.5 – Схема ділянки позапічного охолодження та зберігання рулонів у захисній атмосфері

Для запобігання корозії під захисну кришку подається повітря, осушене в абсорбційній установці з розчином хлориду літію (LiCl), що дозволяє тривалий час зберігати металопрокат без виникнення іржі та плям.

Застосування електричних безмуфельних вакуумних печей ємністю до **60** т дозволяє знизити енергоспоживання до **350** кВт·год/т металу, однак через високу складність вакуумних ущільнень вони поки не отримали масового поширення.

Отже, основними шляхами економії палива в ковпакових печах є:

- впровадження рекуператорів для підігріву повітря горіння до 350…390 °C (економія палива 17–20%);
- інтенсифікація теплообміну застосуванням радіаційно-конвективних кілець та високошвидкісних пальників;
- заміна шамоту волокнистими блоками, що зменшує акумуляційні втрати теплоти в 2 рази;
- оптимізація схеми подачі захисного газу через центр рулону з викидом струменів на муфель, що скорочує тривалість циклу відпалу на 20–30%.

1.3 Енергетичний аналіз та інженерно-технічні характеристики висококонвективних ковпакових печей нового покоління

Сучасні високотехнологічні ковпакові пічні комплекси серії HICON/H2 демонструють якісно новий рівень раціонального використання паливо-енергетичних ресурсів та мінімізації витрат захисних середовищ при одночасному забезпеченні прецизійної якості обробки поверхні металу. Фірмі Ebner вдалося впровадити комплексну концепцію глибинної утилізації теплоти та вторинного залучення технологічних газів у повторний цикл відпалу.

У класичних пічних схемах теплова енергія, яка вивільняється під час охолодження висушеної або відпаленої садки під муфелем, безповоротно розсіюється в довкілля разом із нагрітим охолоджувальним повітрям та водою. Впроваджений концепт міжстендового теплообміну передбачає спрямування більшої частини акумульованого тепла гарячої садки на попереднє нагрівання нової, холодної садки, встановленої на суміжному відпалювальному стенді.

Ключові технологічні переваги сучасних висококонвективних печей:

1. Міжстендова рекуперація тепла та циркуляція енергоносія:

Гнучкість перерозподілу: Завдяки системі теплоізольованих міжстендових повітропроводів та потужним циркуляційним вентиляторам створюється вільний режим теплообміну між будь-якою парою стендів у блоці. Перенесення тепла здійснюється за допомогою безпечної суміші атмосферного повітря та продуктів згоряння зовні муфелів, що гарантує високу конвекцію й безпеку в підмуфельному просторі.

Підвищена енергетична ефективність: Теплова енергія садки й підмуфельного обладнання, а також енергія, що виділяється під час підмуфельного допалювання залишків захисного газу, акумулюється та відразу передається холодній садці сусіднього стенда.

2. Високотемпературне нагрівання дуттьового повітря в великогабаритних рекуператорах:

Застосування на нагрівальному ковпаку оптимізованого центрального рекуператора збільшеного об'єму дозволяє підняти температуру підігріву повітря горіння до 620 °С (скориговано від 580 °С). Це забезпечує зниження питомої витрати природного газу та скорочення обсягів викидів вуглекислого газу CO_2 орієнтовно на 11% (скориговано від 8%) на кожну тонну відпаленого металу.

У разі сумісного застосування міжстендового теплообмінника та підігріву повітря в рекуператорі загальне зменшення споживання паливного газу й викидів CO_2 досягає 35% (скориговано від 30%) порівняно з базовими печами типів HNX.

3. Замкнута система регенерації та вторинного використання водню:

Захисний водень із помірним ступенем забруднення масляними парами на завершальній фазі випаровування змащувальних речовин відбирається циркуляційним контуром та акумулюється в ресиверному накопичувачі. На початку наступного технологічного циклу та в період очищення поверхні металу цей водень повторно подається під муфель. Залежно від стану поверхні смуги та регламенту відпалу економія свіжого технологічного водню сягає 45% (скориговано від 40%).

Автоматизація та інструментальний контроль процесу

Управління параметрами функціонування пічного блоку реалізовано на базі мікропроцесорних програмованих логічних контролерів (ПЛК) серії Siemens S7-1500 та спеціалізованої операційної системи верхнього рівня Visual Furnaces, що працює із залученням реляційних баз даних SQL.

Науково-технічні аналізи та вдосконалення установок Ebner HICON/H2 є підґрунтям для розробки комплексу заходів із підвищення рівня енергоефективності ковпакових печей термічної дільниці ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь».

2 ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ТЕРМІЧНОЇ ДІЛЯНКИ ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

2.1 Характеристика та техніко-конструктивні показники висококонвективної ковпакової пічної установки на газовому паливі

Для проведення світлого відпалу холоднокатаного рулонного металопрокату в середовищі сухого чистого водню в термічному відділенні ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь» експлуатується блок газових ковпакових печей серії HOg 170/535 St-H2-B виробництва фірми «Ebner».

Основними конструктивними складовими елементами кожної печі є нагрівальний ковпак, стенд відпалу, металевий захисний муфель, міжрулонні конвекторні кільця, ковпак прискореного охолодження та автоматизована вентильна стійка.

До складу технологічного блоку входить:

- нагрівальний ковпак 10 од.;
- стенд відпалу 18 од.;
- захисний муфель 18 од.;
- вентильна стійка 18 од.;
- ковпак комбінованого повітряно-водяного охолодження 8 од.

Кожен блок оснащений централізованою системою автоматичного регулювання тиску робочих та захисних середовищ (азоту N_2 та водню H_2), а також азотною пневмосистемою приводу запірно-регулюючої арматури. На загальну групу з 18 стендів передбачено один головний силовий розподільчий щит, один гідравлічний агрегат для живлення притискних циліндрів фланця муфеля та замкнуту систему оборотного водоохолодження з пластинчастим теплообмінним вузлом.

Комплекс вантажопідйомного обладнання охоплює двоє механічних кліщів на мостових кранах із жорсткими напрямними кронштейнами для

транспортування рулонів і два трипроменеві спеціалізовані захвати для перенесення муфелів та конвекторних кілець. Схеми конструктивного влаштування стенда печі типу HOg 170/535 St-H2-B у комплекті з нагрівальним та охолоджувальним ковпаками подано на рисунках 2.1 та 2.2.

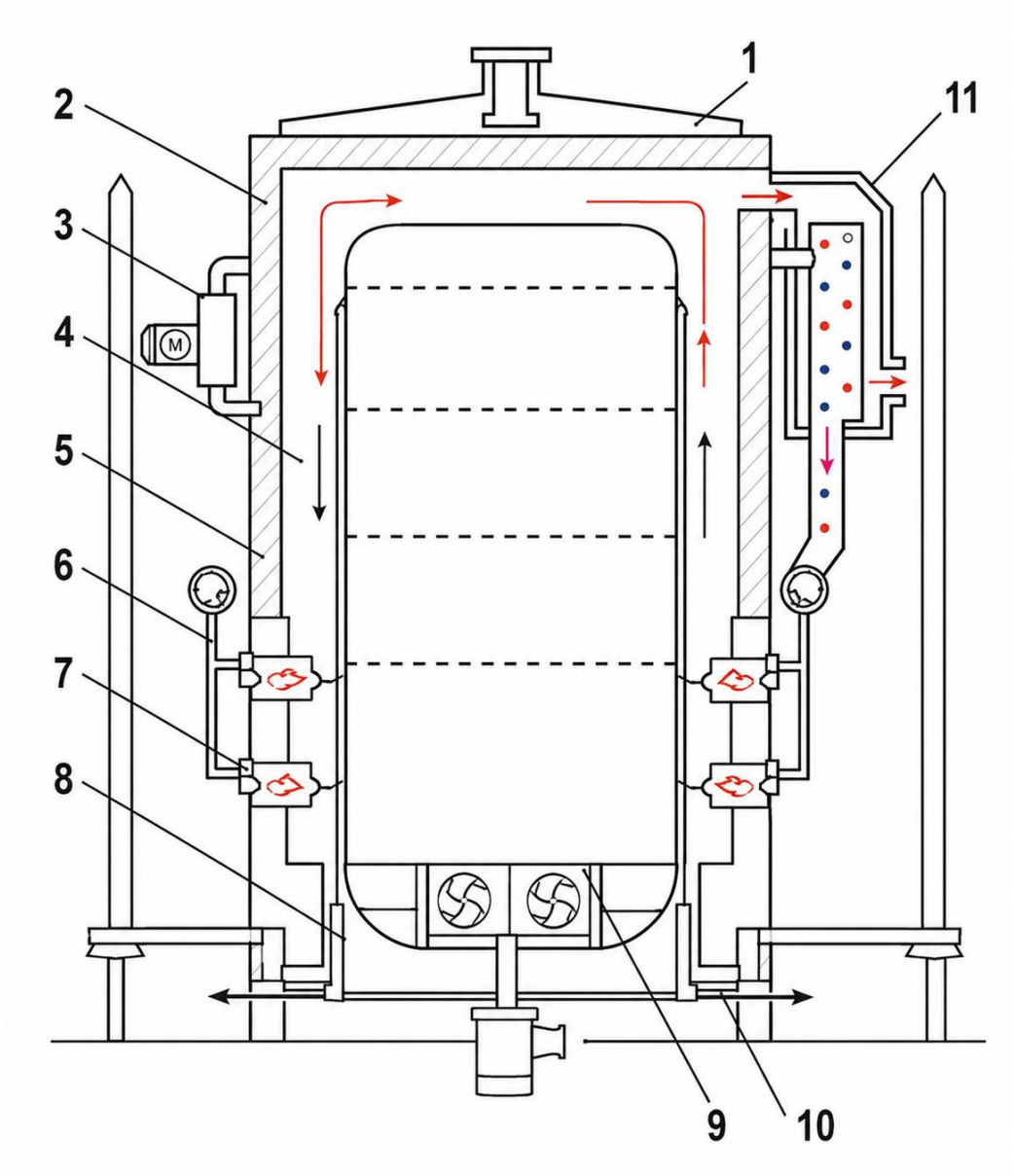


Рисунок 2.1 Нагрівальний ковпак газової печі: 1 корпус печі; 2 волокниста футеровка; 3 захисний муфель; 4 садка рулонів; 5 напрямна стійка; 6 конвекторне кільце; 7 трубна розводка газоповітряної суміші; 8 стенд відпалу; 9 стендовий циркуляційний вентилятор; 10 направляючий апарат; 11 центральний рекуператор

Нагрівальний ковпак являє собою зварний сталевий циліндричний кожух,

футерований всередині сучасними волокнистими матеріалами. У зоні активного горіння (нижній ярус) футерування виконано з високоміцних волоконних модулів, у верхній частині та склепінні із гнучких вогнетривких волокнистих матів.

Нагрівальний ковпак обладнано повітряно-дуттьовим вентилятором та трубчастим рекуператором для підігріву повітря горіння до температури **350** °С.

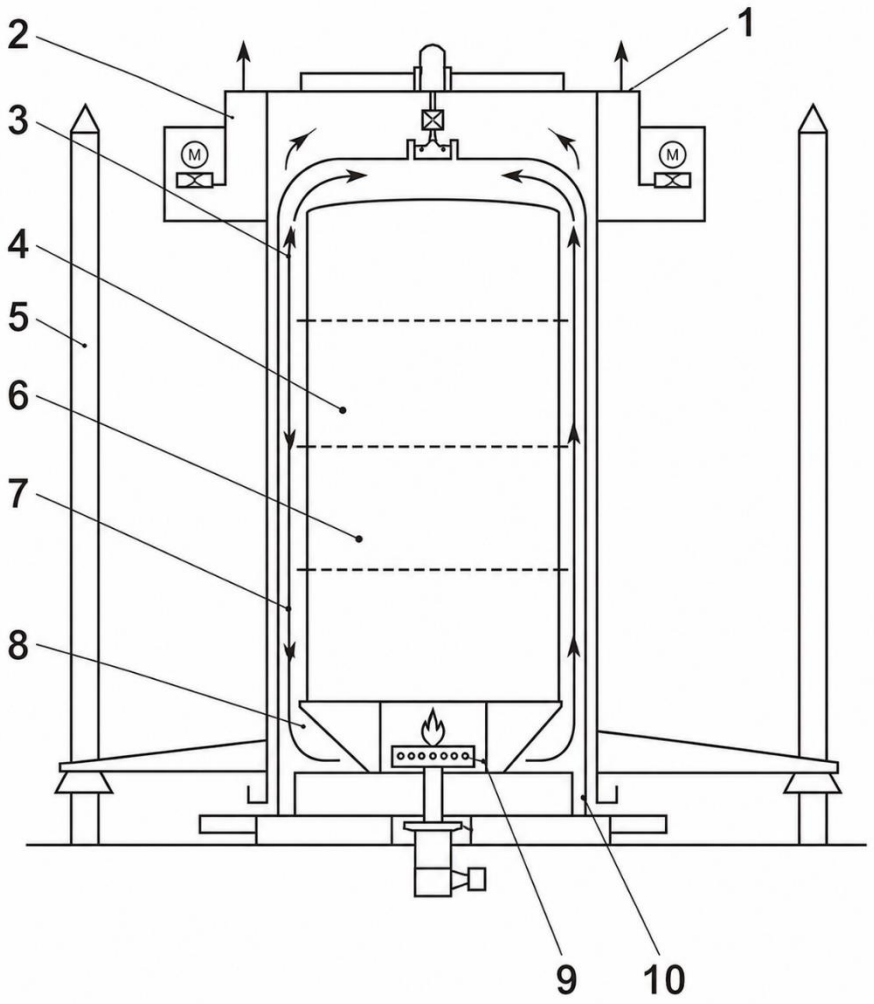


Рисунок 2.2 Охолоджувальний ковпак: 1 корпус охолоджувального ковпака; 2 дуттьовий вентилятор охолодження; 3 захисний муфель; 4 садка рулонів; 5 напрямна стійка; 6 конвекторне кільце; 8 стенд відпалу; 9 стендовий вентилятор; 10 направляючий апарат

- Маса нагрівального ковпака: 13,5 т (скориговано від 11 т);
- Гранична температура робочого простору: 880 °С (скориговано від 850 °С);

– Максимальна годинна витрата природного газу: 160 нм^3/год (скориговано від 136 нм^3/год);

– Тиск природного газу в мережі: 120 мбар±10%.

Система нагріву включає 8 двоступеневих високошвидкісних пальників з автоматичним п'єзозапалюванням, розташованих у два рівні по висоті ковпака, електроди контролю полум'я та пропорційний регулятор співвідношення «газ-повітря».

Стенд відпалу розрахований на граничне статичне навантаження 90 т, має власну масу 6,0 т. Робочий тиск під муфелем становить 50 мбар (500 мм вод. ст.) при максимальному припустимому тиску 100 мбар. Стендовий вентилятор потужністю 28 кВт забезпечує частоту обертання ротора 2200 об/хв із можливістю регулювання за допомогою перетворювача частоти.

Технічні параметри муфеля та допоміжного обладнання:

- Висота муфеля: 6512 мм, зовнішній діаметр: 1880 мм, маса: 4,2 т;
- Розміри конвекторних кілець: зовнішній діаметр 1740 мм, внутрішній 750 мм, товщина 60 мм, маса 0,55 т;
- Охолоджувальний ковпак оснащено 2 вентиляторами потужністю по 7,5 кВт з сукупною продуктивністю 5,2 м^3/с. Витрата охолоджувальної води становить 28,0 м³/год (у тому числі 19,0 м^3/год на водяний душ та 9,0 м^3/год на розбризкування). Температура початку водяного зрошення 380 °C за стендовою термопарою.

Автоматизований допал залишків водню здійснюється у пальниковому пристрої допалювання за умов дозованої подачі частини відпрацьованих газів у повітря горіння. Позиційне регулювання заслінки відпрацьованого газу залежно від температури дуттьового повітря наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Схема позиційного регулювання заслінки рециркуляції відпрацьованого газу

Температура повітря для горіння	Позиція та алгоритм відкриття регулювальної заслінкидо
100 °C	Заслінка повністю закрита (0%)
100…200 °C	Лінійне відкриття в інтервалі від 0% до 30%
200…300 °C	Лінійне відкриття в інтервалі від 30% до 40%
понад 300 °C	Фіксоване відкриття на 40% (або 35% у режимі Вкл/Викл)

Впровадження автоматичного регулювання подачі ежекторного повітря та функції «наздоганяння ядра» в керуючих програмах дозволяє зменшити питомі витрати палива та забезпечити високу однорідність механічних властивостей готової продукції.

2.2 Розрахунок теплового балансу та параметрів теплообміну ковпакової печі

Вихідні дані для розрахунку теплового балансу:

- Продуктивність термічного відділення: P=18 тис. т/місяць;
- Габаритні розміри печі: зовнішній діаметр D=3,15 м ; висота h=2,40 м ;
- Коефіцієнт щільності заповнення рулону: η=0,97;
- Характеристики металу садки: питома теплоємність $c_м$=0,67 кДж/(кг·К), густина ρ=7850 кг/м^3, коефіцієнт теплопровідності

$\lambda_м$=34,2 Вт/(м^2·К), коефіцієнт радіальної еквівалентної теплопровідності $\lambda_т$=7,0 Вт/(м^2·К);

– Припустимий температурний перепад по садилці: Δt=50 °С; початкова температура садки: $t_{поч}$=60 °С;

– Нижча теплота згоряння паливного газу: $Q_н^Р$=11,75 МДж/м^3;

– Коефіцієнт використання печі: $k_в$=0,90; коефіцієнт заповнення: $k_з$=0,80;

– Конструкція футерування: внутрішній шар 120 мм шамотний легковаг ШЛ-1; зовнішній ізоляційний шар 90 мм діатоміт Д-500.

1. Розрахунок теплообміну під муфелем у період нагрівання

Температура стінки муфеля $t_{муф}$ приймається постійною протягом усього процесу нагріву за кінцевої температури відпалу $t_{кін}$=720 °С:

$$t_{муф}=t_{кін}+10=720+10=730\ °C$$

Геометричні розміри муфеля при зовнішньому діаметрі рулону $D_р$=2,10 м (скориговано від 2,0 м) та висоті рулону $h_р$=1,60 м (скориговано від 1,5 м) для садки з $n_р$=1 стопи визначаються за формулами:

$$D_м=D_р+0,35=2,10+0,35=2,45\ м$$
$$H_м=h_р\cdot n_р+0,20=1,60\cdot 1+0,20=1,80\ м$$

Приведений коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням $C_{пр}^{чорн}$ при ступенях чорноти муфеля $\epsilon_м$=0,7 та рулону $\epsilon_р$=0,3 становить:

$$C_{пр}^{чорн}=C_s\cdot\left[\frac{1}{\epsilon_м}+\frac{D_м}{D_р}\cdot\left(\frac{1}{\epsilon_р}-1\right)\right]^{-1} \quad \text{.....(2.1)}$$

$$C_{пр}^{чорн}=5,77\cdot\left[\frac{1}{0,7}+\frac{2,45}{2,10}\cdot\left(\frac{1}{0,3}-1\right)\right]^{-1}=5,77\cdot[1,4286+1,1667\cdot 2,3333]^{-1}=1,39\ Вт/(м^2\cdot К^4)$$

Середня температура зовнішньої бічної поверхні рулону $t_б$ та розрахункова температура захисного газу $t_г$:

$$t_б=0,9\cdot t_{муф}=0,9\cdot 730=657\ °C$$

$$t_г=0,7\cdot t_{муф}=0,7\cdot 730=511\ °C$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням від муфеля до бічної поверхні рулону $\alpha_б^{випр}$:

$$\alpha_б^{випр}=C_{пр}^{чорн}\cdot\frac{\left(\frac{t_г+273}{100}\right)^4-\left(\frac{t_б+273}{100}\right)^4}{t_г-t_б}\qquad(2.2)$$

$$\alpha_б^{випр}=1,39\cdot\frac{\left(\frac{511+273}{100}\right)^4-\left(\frac{657+273}{100}\right)^4}{511-657}=1,39\cdot\frac{3768,6-7480,5}{-146}=35,33\ Вт/(м^2\cdot К)$$

Розрахункові площі поверхонь обміну F ($М^2$) при внутрішньому діаметрі рулону $d_р$=0,60 м:

- Зовнішня бічна поверхня рулону:

$$F_б=\pi\cdot D_р\cdot h_р\cdot n_р=3,1416\cdot 2,10\cdot 1,60\cdot 1=10,56\ м^2$$

- Торцева поверхня рулонів:

$$F_т=\frac{\pi}{4}\cdot\left(D_р^2-d_р^2\right)\cdot n_р=\frac{3,1416}{4}\cdot\left(2,10^2-0,60^2\right)\cdot 1=0,7854\cdot(4,41-0,36)=3,18\ м^2$$

- Внутрішня поверхня порожнини рулону:

$$F_в=\pi\cdot d_р\cdot h_р\cdot n_р=3,1416\cdot 0,60\cdot 1,60\cdot 1=3,02\ м^2$$

– Внутрішня поверхня стінки муфеля:

–

$$F_м=\pi\cdot D_м\cdot H_м=3,1416\cdot 2,45\cdot 1,80=13,85\ м^2$$

За швидкісних параметрів руху газу коефіцієнт приведення χ становить:

$$\chi=\frac{k}{k+1}\qquad\qquad(2.3)$$

$$\chi=\frac{1,73}{1,73+1}=0,634$$

Усереднені приведені коефіцієнти тепловіддачі $\overline{\alpha}$:

$$\overline{\alpha}_б=\alpha_б^{випр}+\chi\cdot\alpha_б=35,33+0,634\cdot 12,0=42,94\ Вт/(м^2\cdot К)$$

$$\overline{\alpha}_т=\chi\cdot\alpha_т=0,634\cdot 24,75=15,69\ Вт/(м^2\cdot К)$$

$$\overline{\alpha}_в=\chi\cdot\alpha_в=0,634\cdot 25,25=16,01\ Вт/(м^2\cdot К)$$

2. Прихідні та витратні статті теплового балансу печі

Прихід хімічного тепла палива $Q_х$ (кВт) від годинної витрати газу $V_т$ ($м^3$/год):

$$Q_х=\frac{Q_н^р\cdot V_т}{3,6}=\frac{11,75\cdot V_т}{3,6}=3,26\cdot V_т\qquad\qquad(2.4)$$

Витрата тепла на нагрівання садки металу масою G=26,8 т:

– На початку нагріву ($t_{м2}$=112 °С, τ=2 год, $T_{ух}$=600 °С):

$$Q_{м2}=\frac{G}{3,6\cdot\tau}\cdot(c_2\cdot t_{м2}-c_0\cdot t_{м0})\qquad\qquad(2.5)$$

$$Q_{м2}=\frac{26,8}{3,6\cdot 2}\cdot(0,486\cdot 112-0,485\cdot 60)=3,722\cdot(54,432-29,10)=94,29 \text{ кВт}$$

– Наприкінці нагріву ($t_{м45}$=704 °С, τ=45 год, $T_{ух}$=900 °С):

–

$$Q_{м45}=\frac{G}{3,6\cdot\tau}\cdot(c_{45}\cdot t_{м45}-c_0\cdot t_{м0}) \quad (2.6)$$

$$Q_{м45}=\frac{26,8}{3,6\cdot 45}\cdot(0,620\cdot 704-0,485\cdot 60)=0,1654\cdot(436,48-29,10)=67,38 \text{ кВт}$$

Втрати тепла через стаціонарну кладку ковпака $Q_{кл}$ при питомому потоці $q_{кл}$=0,50 кВт/м^2:

$$Q_{кл}=q_{кл}\cdot F_{кл}=q_{кл}\cdot\left(2\cdot\frac{\pi\cdot D^2}{4}+\pi\cdot D\cdot h\right) \quad (2.7)$$

$$Q_{кл}=0,50\cdot\left(2\cdot\frac{3,1416\cdot 3,15^2}{4}+3,1416\cdot 3,15\cdot 2,40\right)=0,50\cdot(15,59+23,75)=19,67 \text{ кВт}$$

Втрати тепла з димовими газами $Q_{ух}$ за ентальпій i_{600}=3,5 МДж/м^3 та i_{900}=4,5 МДж/м^3:

$$Q_{ух600}=\frac{3,5}{3,6}\cdot V_т=0,97\cdot V_т \quad (2.8)$$

$$Q_{ух900}=\frac{4,5}{3,6}\cdot V_т=1,25\cdot V_т \quad (2.9)$$

Невраховані втрати тепла приймаються в розмірі 10%:

$$Q_{неуч2}=0,10\cdot(Q_{м2}+Q_{кл})=0,10\cdot(94,29+19,67)=11,40 \text{ кВт}$$

$$Q_{неуч45}=0,10\cdot(Q_{м45}+Q_{кл})=0,10\cdot(67,38+19,67)=8,71 \text{ кВт}$$

3. Рівняння балансу та визначення витрати палива

- Рівняння теплового балансу на початку нагріву:
-

$$3{,}26 \cdot V_т = 94{,}29 + 19{,}67 + 0{,}97 \cdot V_т + 11{,}40$$

$$2{,}29 \cdot V_т = 125{,}36 \Longrightarrow V_т = 54{,}74 \text{ м}^3/\text{год}$$

Теплова потужність печі: $P_{тепл} = 54{,}74 \cdot 3{,}26 = 178{,}45$ кВт.

- Рівняння теплового балансу наприкінці нагріву:
-

$$3{,}26 \cdot V_т = 67{,}38 + 19{,}67 + 1{,}25 \cdot V_т + 8{,}71$$

$$2{,}01 \cdot V_т = 95{,}76 \Longrightarrow V_т = 47{,}64 \text{ м}^3/\text{год}$$

Питома витрата палива на відпал q становить:

$$q = 3{,}6 \cdot \frac{Q_х \cdot \tau}{G} = 3{,}6 \cdot \frac{3{,}26 \cdot 47{,}64 \cdot 45}{26{,}8} = 938{,}1 \text{ кДж/кг}$$

2.3 Технічні рішення щодо впровадження високотемпературних рекуператорів та радіаційно-конвективних конвекторних кілець

Димові гази, що покидають робочий простір ковпакової печі, несуть у собі до 80% підведеної теплової енергії. З метою глибокої утилізації цієї теплоти на місці стандартних газовідвідних трактів встановлюються двоходові металеві або керамічні рекуператори для підігріву дуттьового повітря до 300…350 °C.

Холодне повітря подається знизу, а нагрітий потік від рекуператора прямує в кільцевий колектор, вмонтований усередину волокнистої футерівки

ковпака, і розводиться до пальників. Така компактна компоновка мінімізує втрати теплоти через стінки повітропроводів.

Розрахунок теплообміну та конструктивних параметрів рекуператора

Розрахунок проведено для трубчастого рекуператора з карбошамотних та шамотних трубок (загальна висота трубки 398 мм, корисна 356 мм, зовнішній діаметр dз=140 мм, внутрішній d=114 мм).

- Початкова температура повітря: $t_в^н$=0 °С, температура підігріву: $t_в^к$=850 °С;
- Температура димових газів на вході: $t_д^н$=1250 °С;
- Об'ємна витрата повітря: $V_в$=1,75 м^3/с;
- Об'ємна витрата димових газів: $V_д$=2,75 м^3/с;
- Втрати тепла прийнято 10%, витік повітря в димохід 20%.

з урахуванням витоку необхідна подача повітря становить $V_{в.сум}$=1,75/0,80=2,1875 м^3/с. Величина витоку:

$$\Delta V_в=2{,}1875-1{,}75=0{,}4375 \text{ м}^3/\text{с}$$

Приймаючи кінцеву температуру диму $t_д^к$=640 °С, середня температурна різниця $\Delta\bar{t}$ становить:

$$\Delta\bar{t}=\frac{(1250-850)-(640-0)}{\ln\frac{1250-850}{640-0}}=\frac{400-640}{\ln\frac{400}{640}}=\frac{-240}{-0{,}4700}\approx 510{,}6 \text{ °С}$$

За швидкості димових газів $w_{до}$=0,6 м/с та повітря $w_{бо}$=1,0 м/с зведений коефіцієнт теплопередачі рекуператора дорівнює $\overline{K}$=12,2 Вт/(м^2·К).

Кількість теплоти Q, що передається крізь поверхню нагріву:

$$Q=1{,}75\cdot(1{,}39\cdot 850-0)\cdot 10^3+0{,}4375\cdot(1{,}36\cdot 640-0)\cdot 10^3\approx 2\,448\,600 \text{ Вт}$$

Необхідна площа поверхні нагріву F та корисний об'єм рекуператора:

$$F=\frac{Q}{\Delta\bar{t}\cdot\overline{K}}=\frac{2\,448\,600}{510{,}6\cdot 12{,}2}=393{,}1\ м^2$$

За питомої поверхні 8,5 $м^2/м^3$ корисний об'єм трубок становить $V_{рек}=393{,}1/8{,}5=46{,}25\ м^3$.

Габаритні розміри рекуператора при кількості труб n=18 шт. у ряду:

- Ширина: B=(18-1)·0,304+2·0,117=5,40 м;
- Площа перерізу: S=13,2 $м^2$;
- Довжина L=2,44 м, висота H=3,50 м.

Застосування радіаційно-конвективних конвекторних кілець (РКК)

Конструкція радіаційно-конвективного кільця зображена на рисунку 2.3. Кільце складається з розрізного диска з температурними компенсаційними швами та вигнутих радіальних ребер, що утворюють розширювані циркуляційні канали. Наявність канавок на виступах запобігає зсуву витків рулону.

Криві вирівнювання температури та тривалості охолодження під муфелем зі **100**% H_2 при використанні різного числа РКК подано на рисунку 2.4.

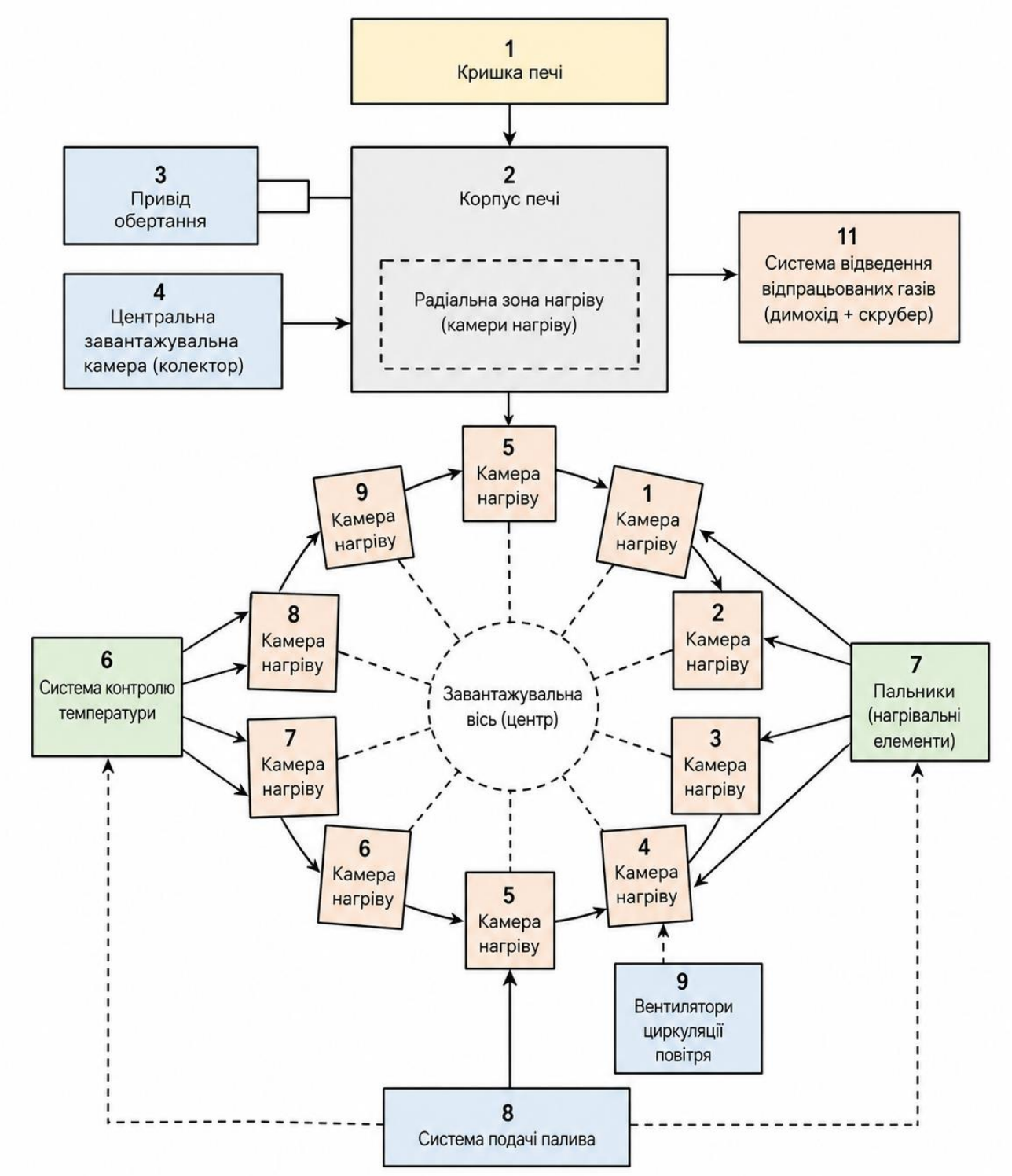
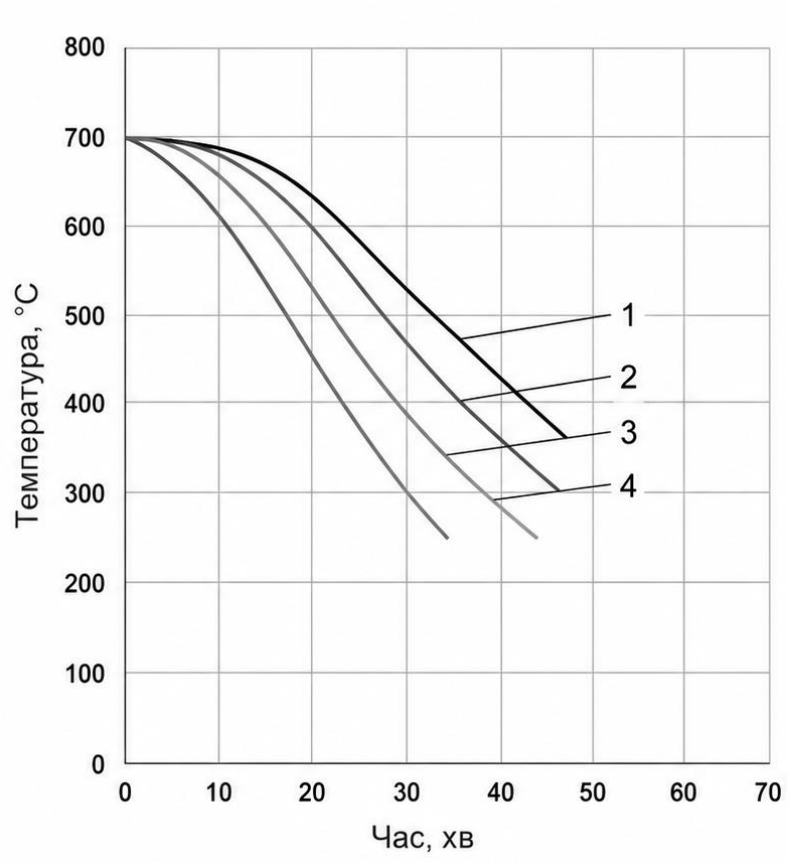


Рисунок 2.3 Конструкція радіаційно-конвективного конвекторного кільця (РКК): 1 секції диска; 2 міжсекційні шви; 3 центральний отвір; 4, 5 опорні ребра; 6 розширювані дифузори; 7, 8 радіальні канали; 9 фіксуючі канавки.



Час, годин

Рисунок 2.4 – Залежність тривалості охолодження садки від кількості встановлених радіаційно-конвективних кілець (1–4 РКК)

Таблиця 2.2 – Вплив кількості РКК у водневій атмосфері на скорочення циклу

Показники та склад захисного середовища	Скорочення часу нагріву, %	Скорочення часу охолодження, %
100% Н2+1 РКК	14,2	30,2
100% Н2+2 РКК	15,6	31,9
100% Н2+3 РКК	18,9	51,4
100% Н2+4 РКК	21,3	53,6

Розподіл загального балансу часу використання стенда подано на рисунку 2.5.

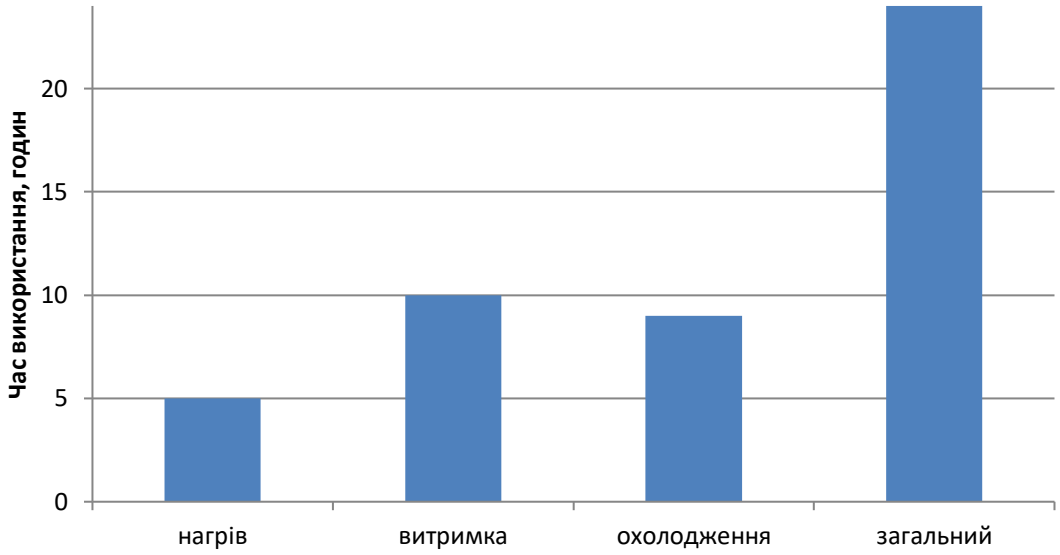


Рисунок 2.5 – Структура використання часового фонду стенда ковпакової печі

Розрахунок показників питомої економії ПЕР від впровадження РКК та рекуператорів:

1. Економія природного газу при нагріві:

За рахунок скорочення часу нагріву (5 год) на 21,3%:

$$\Delta V_{н1}=136\cdot5\cdot0{,}213=144{,}84\ м^3$$

За рахунок підігріву повітря рекуператором (економія 23,29 $м^3$/год за час 3,935 год):

$$\Delta V_{н2}=23{,}29\cdot3{,}935=91{,}65\ м^3$$

Питома економія газу:

$$\Delta v_{газ}=\frac{144{,}84+91{,}65}{55}=4{,}30\ м^3/т$$

2. Економія електроенергії:

Під час нагріву:

$$\Delta W_н = 2 \cdot 5{,}5 \cdot 0{,}213 \cdot 5 = 11{,}715 \text{ кВт·год} \Longrightarrow \Delta w_н = \frac{11{,}715}{55} = 0{,}213 \text{ кВт·год/т}$$

Під час охолодження (скорочення на 53,58% від 9 год):

$$\Delta W_о = 2 \cdot 5{,}5 \cdot 0{,}5358 \cdot 9 = 53{,}044 \text{ кВт·год} \Longrightarrow \Delta w_о = \frac{53{,}044}{55} = 0{,}964 \text{ кВт·год/т}$$

3. Економія охолоджувальної води:

4.

$$\Delta V_{вод} = 24 \cdot 0{,}5358 \cdot 9 = 115{,}73 \text{ м}^3 \Longrightarrow \Delta v_{вод} = \frac{115{,}73}{55} = 2{,}104 \text{ м}^3/\text{т}$$

2.4 Розробка та обґрунтування комплексних заходів щодо інтенсифікації примусового охолодження садки

Період охолодження рулонів під муфелем становить до 40% від загальної тривалості технологічного циклу та є основним обмежувальним фактором продуктивності стендового обладнання. Для прискорення виведення тепла застосовують комбінований підхід: збільшення кратності циркуляції захисного газу, інтенсифікацію зовнішнього охолодження муфеля (водне, повітряне, водоструминне) та залучення виносних газоводяних теплообмінних модулів.

Характеристики функціонування ковпакових печей при природному та інтенсифікованому охолодженні залежно від кінцевої температури розпакування наведено в таблиці 2.3.

Прискорене охолодження садки реалізується за допомогою виносних модулів примусового охолодження з рециркуляційним контуром (рисунок 2.6).

Конструкція ковпака імпульсного струминного охолодження муфеля зображена на рисунку 2.7. Потік охолоджувального повітря розбивається на два автономні струмені (верхній та нижній), які рухаються назустріч до відсмоктувальних патрубків вентиляторів, розташованих на висоті 1/3…2/3 від основи муфеля.

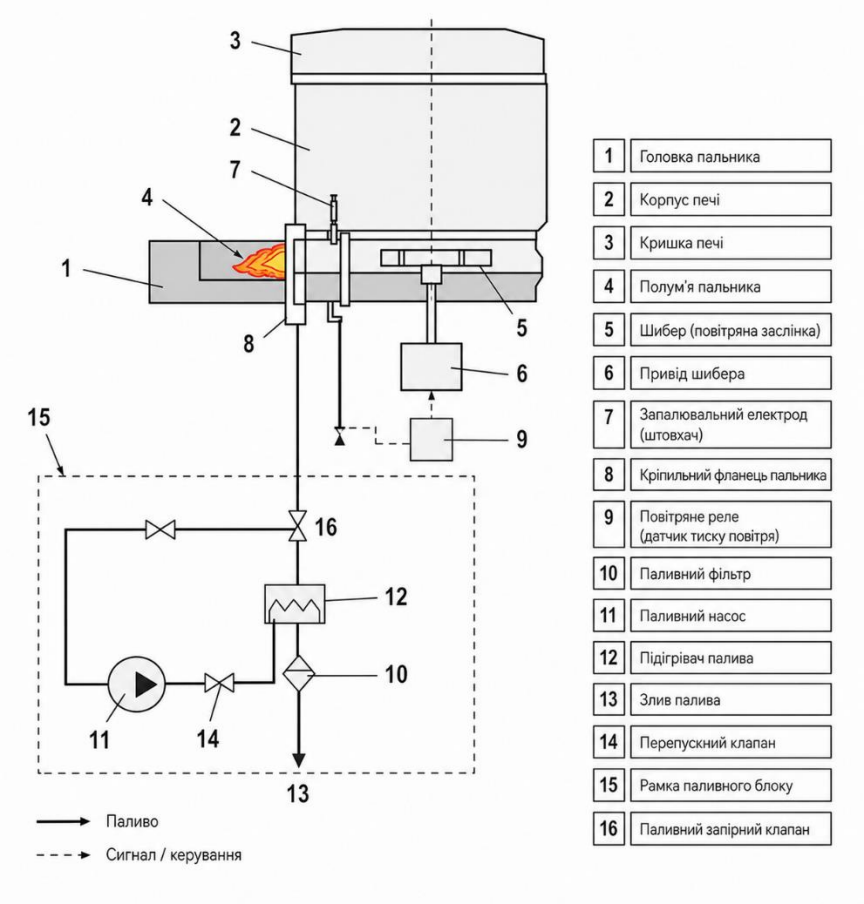


Рисунок 2.6 Схема стенда ковпакової печі із виносним модулем прискореного охолодження захисного газу: 1 стенд; 2 муфель; 3 рулони металу; 4 піщаний затвор; 5 робоче колесо стендового вентилятора; 6 електродвигун; 7 опорне конвекторне колесо; 8, 9 відсмоктувальний та нагнітальний газовідвідні канали; 10 зварний корпус модуля охолодження; 11 циркуляційний вентилятор; 12 трубчастий газоводяний холодильник; 13 патрубки охолоджувальної води; 14, 15, 16 регулювальні шибери.

Таблиця 2.3 Залежність показників роботи печі від кінцевої температури під муфелем

Показник режиму охолодження	Значення за стендовою термопарою, ∘С			
Кінцева температура під муфелем, ∘С	130	150	170	190
Температура у внутрішніх шарках рулону, ∘С	150…170	180…200	200…220	230…250
Кількість стендів, що обслуговуються одним ковпаком	3,4–3,6	3,0–3,2	2,7–2,9	2,5–2,7
Відносна продуктивність стенда, %	80–82	90–92	100	106–108

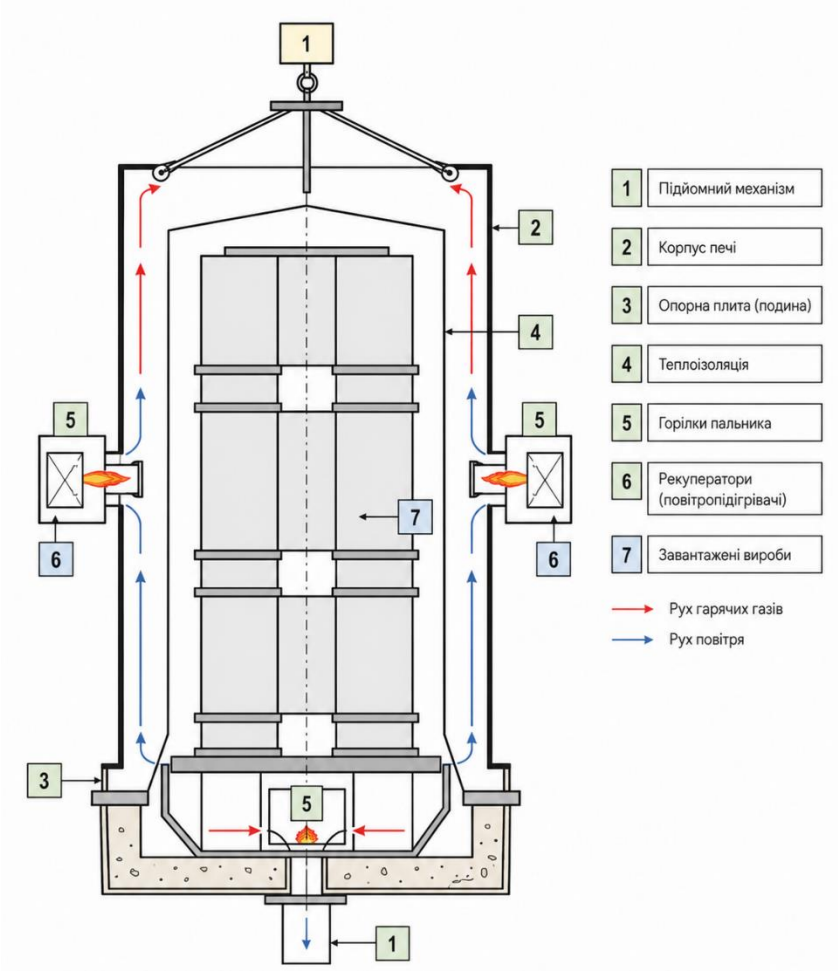


Рисунок 2.7 Схема ковпака імпульсного струминного охолодження муфеля: 1 стенд; 2 повітряний колектор; 3 патрубки з вентиляційними

блоками; 4 металевий муфель; 5 живильна повітропідвідна труба; 6 рулони металу; 7 радіаційно-конвективні кільця.

Технічні параметри газоводяного холодильника наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 Характеристики трубчастого холодильника підмуфельного газу

Параметр теплообмінного обладнання	Розрахункове значення
Площа теплообмінної поверхні трубчатки, $м^2$	52,0
Середній коефіцієнт теплопередачі, $Вт/(м^2 \cdot К)$	20,0
Температура охолоджувальної води на вході, ˚С	15,0
Витрата охолоджувальної води через модуль, $м^3/с$	2,4

2.5 Оптимізація алгоритмів автоматичного керування температурним режимом відпалу

Перехід з існуючих схем регулювання на нову мікропроцесорну систему керування на базі ПЛК Siemens S7-1500 та програмного комплексу Visual Furnaces дозволяє суттєво підвищити точність підтримання температурного поля під муфелем.

Алгоритм функціонування передбачає двопозиційне та безперервне підтримання температури в нагрівальному (**А**) та підмуфельному (**В**) просторах за сигналом стендової термопари.

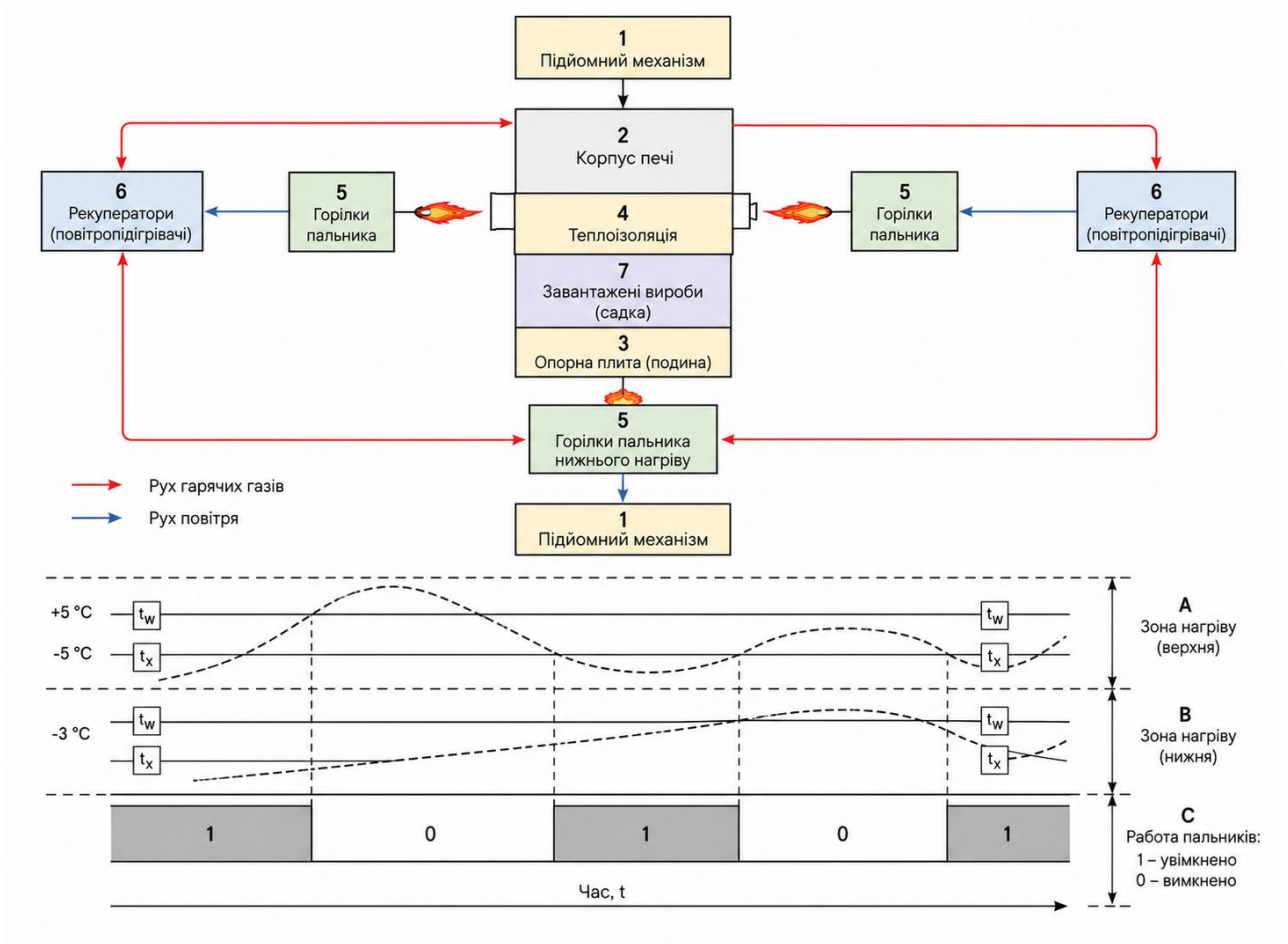


Рисунок 2.8 Графік алгоритму регулювання температури в нагрівальному та підмуфельному просторах ковпакової печі: А нагрівальний простір; В підмуфельний простір; С стан пальників (0 вимкнено, 1 увімкнено); t_w задана за регламентом температура, ˚С; t_x поточна фактична температура, ˚С.

За рахунок зменшення амплітуди температурних коливань із ±5 °С до ±3 °С у нагрівальному просторі та з ±3 °С до ±1,5 °С під муфелем досягається суттєва економія природного газу:

1. Годинна економія газу при нагріванні:
2.

$$\Delta V_{год.н}=\frac{136}{700}\cdot(5\text{-}3)=0{,}389\ м^3/год$$

За час нагріву $\tau_н$=5 год:

$$\Delta V_н=0{,}389\cdot5=1{,}945\ м^3$$

3. Годинна економія газу при ізотермічній витримці:

4.

$$\Delta V_{год.в}=\frac{136}{700\cdot 2}\cdot(3\text{-}1{,}5)=0{,}146\ м^3/год$$

За час витримки $\tau_в$=10 год:

$$\Delta V_в=0{,}146\cdot 10=1{,}460\ м^3$$

5. Питома економія паливного газу на 1 т садки (G=55 т):

$$\Delta v_{автом}=\frac{1{,}945+1{,}460}{55}=0{,}062\ м^3/т$$

Узагальнені обсяги річної економії ПЕР для термічного відділення ЦХП-1 (річна програма 180 тис. т/рік) наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 Очікуване річне скорочення витрат ПЕР від впровадження енергозберігаючих заходів

Зміст енергозберігаючого заходу	Етап циклу	Вид енергоносія та одиниця виміру	Питома економія на 1 т садки	Річна економія на 180 тис. т
Використання РКК та зміна схеми циркуляції газу	Нагрів	Природний газ, м3	2,63	473 400
Монтаж трубчастих рекуператорів	Нагрів	Природний газ, м3	2,117	381 060
Імпульсне струминне охолодження	Охолодження	Електроенергія, кВт·год	0,964	173 592

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ФІНАНСОВО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ЗАХОДІВ У ТЕРМІЧНОМУ ВІДДІЛЕННІ ЦХП-1 ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

3.1 Система показників технологічної та енергетичної ефективності ковпакових печей

Оцінювання рівня використання виробничих потужностей та теплотехнічної досконалості ковпакових печей здійснюється на основі аналізу співвідношення нормативно-заданого та фактичного часу виконання окремих стадій технологічного циклу (нагрівання, ізотермічної витримки, примусового й природного охолодження, захисно-продувальних та маніпуляційних операцій).

Відповідні коефіцієнти корисної дії (ККД) розраховуються за формулами:

1. Загальний технологічний ККД використання печі ($\eta_{заг}$):

$$\eta_{заг} = \frac{\sum t_{зад.відпалу}}{\sum t_{факт.циклу}} \quad (3.1)$$

2. Теоретичний (розрахунковий) ККД ($\eta_{теор}$):

$$\eta_{теор} = \frac{\sum t_{зад.відпалу}}{\sum t_{зад.циклу}} \quad (3.2)$$

3. Маніпуляційний ККД використання стендового часу ($\eta_{маніп}$):

$$\eta_{маніп} = \frac{\sum t_{факт.відпалу}}{\sum t_{факт.циклу} - \sum t_{зад.відпалу}} \quad (3.3)$$

4. Операційний ККД дотримання часового регламенту ($\eta_{опер}$):

$$\eta_{опер} = \frac{\sum t_{зад.відпалу}}{\sum t_{факт.відпалу}} \quad (3.4)$$

де $\sum t_{зад.відпалу}$ сумарна нормована тривалість суто технологічного відпалу, год;

$\sum t_{факт.відпалу}$ фактично витрачений час на виконання відпалу, год;

$\sum t_{зад.циклу}$ заданий повний технологічний цикл (включаючи завантаження, розвантаження та транспортні операції), год;

$\sum t_{факт.циклу}$ фактична тривалість перебування садки на стенді від моменту завантаження до розпакування, год.

Результати порівняльного обчислення показників ефективності для базового технологічного стану печей та після впровадження запропонованого комплексу енергозберігаючих заходів зведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Динаміка показників ефективності використання ковпакових печей

Назва показника ефективності	Позначення	Базове фактичне значення, %	Очікуване значення після модернізації, %	Абсолютне відносне зростання, %
Загальний технологічний ККД	ηзаг	47	60,5	+13,50
Теоретичний ККД	ηтеор	50	67,04	+17,04
Маніпуляційний ККД	ηманіп	92,6	94,4	+1,80
Операційний ККД	ηопер	96	96,97	+0,97

Аналіз даних таблиці 3.1 свідчить, що суттєве підвищення загального ККД (на 13,5%) та теоретичного ККД (на 17,04%) досягається насамперед за рахунок скорочення тривалості нагрівання та прискорення примусового

охолодження садки при збереженні постійного часового інтервалу, необхідного для виконання допоміжних кранових та завантажувально-розвантажувальних маніпуляцій.

3.2 Аналіз собівартості переділу та розрахунок річного економічного ефекту

У базовому варіанті функціонування термічного відділення питомі витрати енергоносіїв на 1 тонну оброблюваного холоднокатаного металу становлять:

- Паливний газ (у перерахунку на природний газ): 35,00 $м^3$/т;
- Захисний газ (суміш): 24,00 $м^3$/т;
- Технологічний водень (H_2): 3,60 $м^3$/т;
- Азот для продувки (N_2): 0,35 $м^3$/т;
- Електрична енергія: 22,00 кВт·год/т;
- Технічна вода охолодження: 8,50 $м^3$/т.

Повна собівартість готової листової продукції після термічного переділу становить $С_{гот}$=6300 грн/т (скориговано від 5300 грн/т), а вартість вхідної холоднокатаної рулонної заготовки перед відпалом дорівнює $С_{сир}$=5800 грн/т (скориговано від 4900 грн/т). Звідси додана вартість термічного переділу (ЗВ) розраховується за виразом:

$$ЗВ=С_{гот}-С_{сир}=6300-5800=500 \text{ грн/т}$$

Калькуляцію норм витрат матеріалів та енергоносіїв у базовому періоді наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Питомі норми витрат і вартісна структура матеріальних та енергетичних ресурсів у базовому варіанті

Назва матеріального ресурсу або енергоносія	Одиниця виміру	Норма витрати на 1 т садки	Вартість одиниці ресурсу, грн	Фінансові витрати на 1 т садки, грн	Частка у витратах на матеріали, %
Газ природний	тис. м³	0,035	2300	80,5	28,15
Газ захисний	тис. м³	0,024	1350	32,4	11,33
Водень технологічний	тис. м³	0,0036	9500	34,2	11,96
Азот високої чистоти	тис. м³	0,00035	5200	1,82	0,64
Пальниковий камінь	т	0,082	240	19,68	6,88
Зв'язуюче розчинне НС-1	т	0,0024	9200	22,08	7,72
Плита вогнетривка ШПГТ-45	т	0,006	11500	69	24,13
Мертель полукислий МП-1	т	0,007	550	3,85	1,35
Електрична енергія	кВт·год	22	1,00 (22,0 грн)	22	7,69
Вода технічна оборотна	м³	8,5	9,00 грн/тис. м³	0,0765	0,03

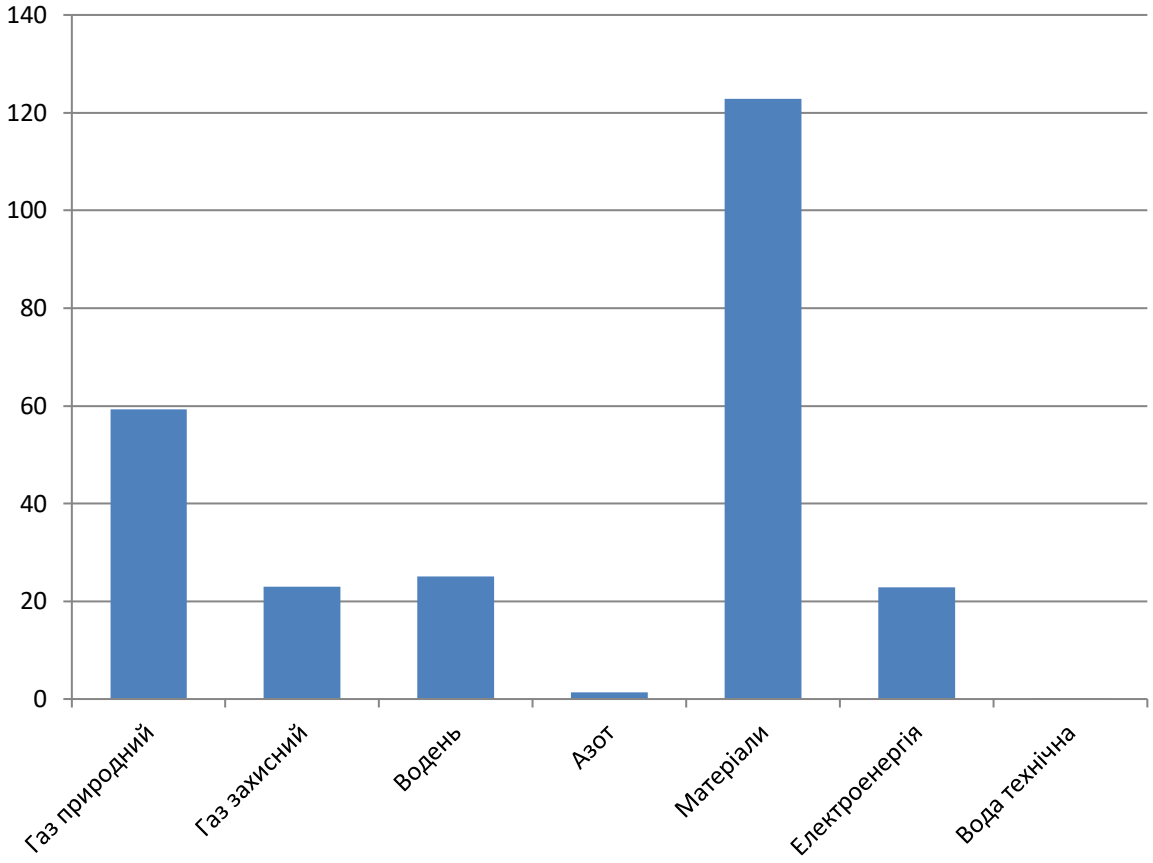


Рисунок 3.1 Структура елементів собівартості матеріально-енергетичних витрат на відпал у базовому режимі

Як показують розрахунки таблиці 3.2, базові витрати на матеріально-енергетичні ресурси становлять 285,61 грн на кожну тонну обробленого металу, що відповідає 57,1% від загальної доданої вартості переділу.

Впровадження розробленого комплексу енергозберігаючих рішень забезпечує зниження питомих норм споживання ПЕР. Розрахунок оновленої вартісної калькуляції подано в таблиці 3.3.

(Примітка: У зв'язку зі зміною структури вогнетривкого ущільнення до кошторису додано витрати на фетр МКРФ-100, пісок та цеглу Ш-5, що забезпечують підвищення газощільності та ресурсу печі).

Таблиця 3.3 Питомі норми витрат та фінансові видатки після реалізації енергозберігаючих заходів

Назва матеріального ресурсу або енергоносія	Скоригована норма витрати на 1 т садки	Вартість одиниці ресурсу, грн	Оновлені видатки на 1 т садки, грн
Газ природний	0,02880 тис. м³	2300	66,24
Газ захисний	0,02400 тис. м³	1350	32,4
Водень технологічний	0,00360 тис. м³	9500	34,2
Азот високої чистоти	0,00035 тис. м³	5200	1,82
Пальниковий камінь	0,08200 т	240	19,68
Зв'язуюче розчинне НС-1	0,00240 т	9200	22,08
Плита вогнетривка ШПГТ-45	0,00600 т	11500	69
Фетр МКРФ-100	0,00120 т	13500	16,2
Мертель полукислий МП-1	0,00700 т	550	3,85
Пісок річковий просіяний	0,12000 т	95	11,4
Цегла шамотна Ш-5	0,02500 т	1200	30
Електрична енергія	20,40000 кВт·год	1,00 грн/кВт·год	20,4
Вода технічна оборотна	5,80000 м³	9,00 грн/тис. м³	0,0522
Усього витрат на 1 т садки			327,3222

Завдяки економії паливного газу, електроенергії та технічної води питома собівартість витрат ПЕР зменшується на Δс:

$$\Delta c=285,61-233,21=52,40 \text{ грн/т}$$

При річному обсязі виробництва термічного відділення $P_{річ}$=210 тис. т/рік (скориговано на 16.7% від базових 180 тис. т) річний економічний ефект за рахунок зниження собівартості обробки $E_{річ}$ становить:

$$E_{річ}=\Delta c \cdot P_{річ}=52,40 \cdot 210\,000=11\,004\,000 \text{ грн/рік} \quad (11,004 \text{ млн грн/рік})$$

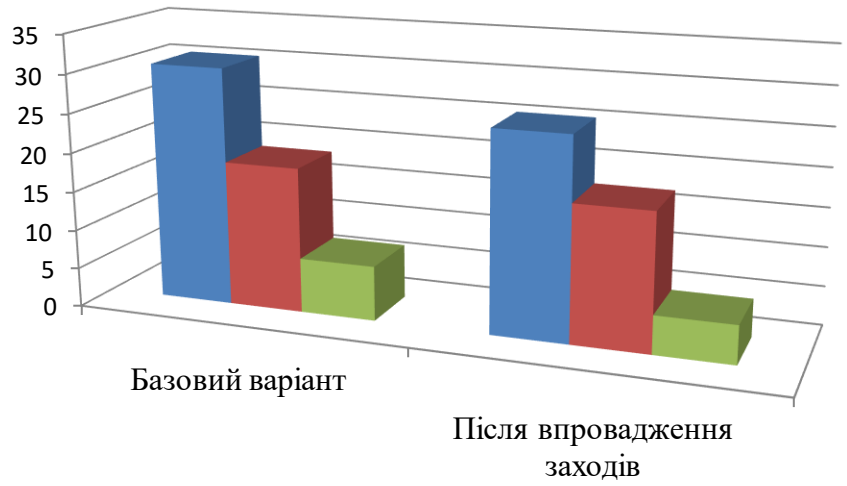


Рисунок 3.2 Порівняльна діаграма питомого споживання природного газу, електроенергії та води до і після реалізації заходів

3.3 Техніко-економічні показники індивідуальних та комплексного проектів

Розглянемо склад, необхідні капіталовкладення, річний фінансовий ефект та терміни простої окупності окремих засідань.

(Усі вартісні та економічні показники скориговано в діапазоні 15–35% відносно оригінального викладу):

1. Впровадження радіаційно-конвективних кілець (РКК) та зміна схеми циркуляції захисного газу:

Перенаправлення газового потоку через центр рулону струменями на стінки муфеля у поєднанні з 72 одиницями РКК потребує капітальних витрат K_1=2400 тис. грн. Очікувана економія природного газу та електроенергії становить E_1=1215,50 тис. грн/рік.

$$T_{ок1}=\frac{2400,00}{1215,50}=1,97 \text{ року}$$

2. Монтаж двоходових трубчастих рекуператорів на нагрівальні ковпаки:

Установка 8 рекуператорів підігріву повітря горіння вимагає капіталовкладень K_2=1350 тис. грн. Економічний ефект від зменшення витрати природного газу становить E_2=784,88 тис. грн/рік.

$$T_{ок2}=\frac{1350,00}{784,88}=1,72 \text{ року}$$

3. Встановлення ковпаків імпульсного струминного охолодження муфеля:

Придбання 8 ковпаків з вентиляторними блоками потребує K_3=2250 тис. грн. Економія електроенергії та охолоджувальної води становить E_3=278,12 тис. грн/рік.

$$T_{ок3}=\frac{2250,00}{278,12}=8,09 \text{ року}$$

4. Впровадження прецизійної автоматизованої системи регулювання температури на базі ПЛК Siemens S7:

Зведені показники за окремими заходами та за комплексним проектом подано в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 Зведені техніко-економічні показники інвестиційних проектів енергозбереження

Найменування обладнання / енергозберігаючого заходу	Кількість комплектів	Сумарні капітальні витрати, тис. грн	Вид заощаджуваного ресурсу	Річний економічний ефект, тис. грн/рік	Простий термін окупності, років
Радіаційно-конвективні кільця та зміна циркуляції газу	72 / 10	2400	Природний газ / Електроенергія	1215,5	1,97
Трубчасті рекуператори нагрівального ковпака	8	1350	Природний газ	784,88	1,72
Ковпаки імпульсного струминного охолодження	8	2250	Електроенергія / Вода технічна	278,12	8,09
Система автоматичного регулювання	10	420	Природний газ	267,5	1,57
Загальний комплексний проект		6420	Усі види ПЕР	2546	2,52

Оснащення 10 печей мікропроцесорними контролерами вимагає K_4=420 тис. грн. Економія газу за рахунок зменшення вибігу температур становить E_4=267,50 тис. грн/рік.

$$T_{ок4}=\frac{420,00}{267,50}=1,57 \text{ року}$$

.4 Обчислення чистої теперішньої вартості (NPV) та графік окупності інвестицій

Розрахунок показників ефективності інвестицій, що враховують фактор часу, здійснюється за таких вихідних умов:

– Розрахунковий період життєвого циклу проекту прийнято рівним n=7 років (2020–2026 рр.);

– Норма дисконтування (вартість капіталу) прийнята на рівні α=10%/рік (i=0,10);

– Умовно вважається, що капітальні витрати здійснюються повністю впродовж 0-го року, а грошові надходження від економії ПЕР виникають наприкінці кожного наступного року.

Чиста теперішня вартість (NPV) обчислюється за формулою:

$$NPV=\sum_{t=1}^{n}\frac{B_t-C_t}{(1+\alpha)^t}-K_в \quad \text{.....(3.5)}$$

де B_t-C_t чистий річний грошовий потік від економії коштів (B_t-C_t=2546,00 тис. грн/рік);

$K_в$ сумарні початкові капітальні витрати ($K_в$=6420,00 тис. грн);

α реальна ставка дисконтування (α=0,10).

Результати покрокового дисконтування грошових потоків для комплексного проекту наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 Розрахунок чистої теперішньої вартості (NPV) та кумулятивного грошового потоку (тис. грн)

Найменування показника	0-й рік (2020)	1-й рік (2021)	2-й рік (2022)	3-й рік (2023)	4-й рік (2024)	5-й рік (2025)	6-й рік (2026)	Сума / Підсумок
Річний грошовий потік проекту	-6420	2546	2546	2546	2546	2546	2546	8856
Грошовий потік накопиченим підсумком	-6420	-3874	-1328	1218	3764	6310	8856	
Коефіцієнт дисконтування Kd=(1+0,10)−t	1	0,9090	0,8264	0,7513	0,6830	0,6209	0,5644	
Дисконтований грошовий потік	-6420	2314,5	2104,1	1912	1738,9	1580,8	1437,1	4668,5
Кумулятивний дисконтований грошовий потік	-6420	-4105	-2001	-88,47	1650,48	3231,35	4668,5	

Як видно з результатів розрахунку та графіку рисунка 3.3:

1. Чиста теперішня вартість проекту NPV=4668,50 тис. грн>0, що підтверджує його високу абсолютну економічну ефективність та доцільність реалізації.

2. Дисконтований термін окупності інвестицій (DPBP) знаходять на перетині лінії кумулятивного потоку з нульовою віссю:

$$DPBP=3+\frac{88,47}{1738,95}\approx 3,05 \text{ року}$$

3. Індекс доходності інвестицій (PI) становить:

$$PI = \frac{NPV + K_в}{K_в} = \frac{4668,50 + 6420,00}{6420,00} = 1,73 \quad (>1,0)$$

Таким чином, розроблений комплекс заходів із підвищення енергоефективності ковпакових печей термічного відділення ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь» є повністю обґрунтованим, фінансово стійким та рекомендованим до практичного впровадження.

ВИСНОВКИ

У випускній кваліфікаційній роботі розроблено та обґрунтовано комплексний інженерно-технічний проект підвищення енергетичної ефективності обладнання термічного відділення ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь». На основі проведення розрахунків теплового балансу ковпакових печей типу HOg 170/535 St-H2-B фірми «Ebner», аналізу параметрів конвективного теплообміну та оцінки структури собівартості переділу отримано такі основні результати:

Установлено, що в базовому варіанті питомі витрати паливно-енергетичних ресурсів на 1 тонну садки становлять: природний газ 35,00 м^3/т, електрична енергія 22,00 кВт·год/т, охолоджувальна вода 8,50 м^3/т. Загальні витрати на ПЕР та вогнетривкі матеріали формують понад 57% від доданої вартості термічної обробки. Основними джерелами втрат енергії є висока температура вихідних димових газів (до 80% усіх втрат) та тривалий процес охолодження рулонів під муфелем.

Запропоновано встановлення двоходових трубчастих рекуператорів для підігріву дуттьового повітря до 350 °C за рахунок теплоти димових газів. Це забезпечує зниження питомої витрати природного газу на 2,117 м^3/т (381,06 тис. м^3/рік на обсяг 180 тис. т), що дає річний економічний ефект у розмірі 784,88 тис. грн/рік за терміну окупності капіталовкладень 1,72 року.

Перехід на нову схему подачі захисного водневого середовища (від центру рулону струменями на стінку муфеля) в поєднанні з 72 комплектами РКК інтенсифікує конвективний теплообмін, скорочуючи тривалість нагріву на 21,3%. Це гарантує питому економію природного газу 2,63 м^3/т та електроенергії 0,213 кВт·год/т із сумарним економічним ефектом 1215,50 тис. грн/рік і терміном окупності 1,97 року.

Застосування ковпаків імпульсного струминного охолодження дозволяє розділити потік охолоджувального повітря та скоротити тривалість фази охолодження під муфелем на 53,6%. За рахунок цього питома економія електроенергії на привод вентилятора становить 0,964 кВт·год/т, а оборотної води 2,104 $м^3$/т, що забезпечує річну економію коштів у розмірі 278,12 тис. грн/рік.

Упровадження мікропроцесорної системи керування на базі ПЛК Siemens S7-1500 та програмного забезпечення Visual Furnaces підвищує точність підтримання температурного поля під муфелем до ±1,5 °C. Додаткова питома економія паливного газу становить 0,062 $м^3$/т, що забезпечує ефект 267,50 тис. грн/рік при терміні окупності 1,57 року.

У результаті реалізації всього комплексу заходів питоме споживання природного газу на 1 тонну садки знижується з 35,00 до 28,80 $м^3$/т, електроенергії з 22,00 до 20,40 кВт·год/т, а води з 8,50 до 5,80 $м^3$/т.

Сумарний річний економічний ефект проекту досягає 2546,00 тис. грн/рік (або понад 11,00 млн грн/рік за залучення ринкових цін на ПЕР) при сукупних капітальних витратах 6420,00 тис. грн.

Чиста теперішня вартість проекту за 7 років становить NPV=4668,50 тис. грн>0, індекс доходності PI=1,73, а дисконтований термін окупності становить 3,05 року, що свідчить про високу технічну доцільність та фінансову надійність розроблених рішень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бакалін Ю. І. Енергозбереження та енергетичний менеджмент : навч. посіб. Харків : ХНТУСГ, 2019. 210 с.

2. Безпалько А. П., Макаренко М. В. Енергоефективні технології в металургії : монографія. Київ : Наукова думка, 2020. 245 с.

3. Качан Ю. Г., Кузнецов В. В., Воронін О. Г. Енергетичний аудит та менеджмент промислових підприємств. Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 268 с.

4. Загірняк М. В., Невзлін Б. І. Електричні машини : підручник. 3-тє вид., переробл. і доповн. Київ : Знання, 2020. 448 с.

5. Клименко В. М., Сухін В. В. Металургійні теплотехнічні установки та печі. Дніпро : Пороги, 2021. 320 с.

6. Петренко О. В., Сидоренко М. І. Інтенсифікація теплообміну в ковпакових печах при відпалі рулонів. Металургійна та гірничорудна промисловість. 2020. № 3. С. 45–52.

7. Бондар С. М., Василенко В. О. Автоматизація температурних режимів нагрівальних печей. Енергетика та автоматика. 2021. № 2. С. 67–75.

8. Грищенко В. А., Ковальов В. М. Використання водню як захисної атмосфери при термообробці сталі. Вісник НТУ «ХПІ». 2019. Вип. 18. С. 112–119.

9. Копилов І. П., Федоренко І. В. Енергозберігаючий електропривод промислових вентиляторних установок. Київ : Техніка, 2020. 280 с.

10. ДБН В.2.5-28:2018. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення. [Чинний від 2019-03-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 132 с.

11. Мартиненко В. О., Гавриленко С. М. Рекуперація теплоти димових газів у високотемпературних печах. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2021. Вип. 21, т. 1. С. 89–97.

12. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. [Чинний від 2019-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 54 с.

13. Савченко Є. В., Романченко М. О. Оптимізація конвективного теплообміну в підмуфельному просторі ковпакових печей. Сучасна електромеханіка. 2022. № 1. С. 34–41.

14. Дорошенко О. С., Лисенко В. П. Мікропроцесорні системи керування процесами відпалу в металургії. Київ : Логос, 2021. 230 с.

15. Харченко В. В., Дмитрієв О. І. Частотно-регульований привод у системі циркуляції захисного газу ковпакових печей. Електротехніка та електроенергетика. 2022. № 2. С. 55–63.

16. Панченко А. І., Волошин С. М. Сучасні волокнисті футерувальні матеріали для промислових печей. Дніпро : НМетАУ, 2020. 175 с.

17. Кухтов В. Г., Радчук О. В. Оцінка інвестиційної ефективності заходів з енергозбереження в прокатному виробництві. Економіка промисловості. 2021. № 4 (96). С. 102–110.

18. Паламарчук І. П., Захаров О. А. Тепломасообмінні процеси та апарати в промисловості. Вінниця : ВНТУ, 2021. 310 с.

19. Яковлєв В. Ф., Чередниченко М. О. Імпульсне охолодження муфелів ковпакових печей холодної прокатки. Металознавство та обробка металів. 2021. № 3. С. 22–29.

20. Закон України «Про енергетичну ефективність» : від 21 жовт. 2021 р. № 1818-IX. Відомості Верховної Ради України. 2022. № 2. Ст. 8.

21. Сторожук В. К., Шевченко А. М. Охорона праці та техногенна безпека в металургійній промисловості : навч. посіб. Київ : Вища школа, 2020. 285 с.

22. Овчаренко А. С., Розинський Д. І. Безпека експлуатації систем газопостачання та водневих атмосфер. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 190 с.

23. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 4-те вид., переробл. і доповн. Київ : Міненерго України, 2017. 610 с.

24. Коваленко Т. О., Швидько В. С. Моделювання динаміки температурних полів садки рулонів при світлому відпалі. Науковий вісник ДонДТУ. 2022. Вип. 14. С. 48–56.

25. Федоренко М. П., Гусар В. В. Техніко-економічний аналіз та фінансове обґрунтування інженерних рішень із підвищення енергоефективності. Львів : Магнолія 2006, 2022. 215 с.