

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ МЕТАЛУРГІЇ

кафедра автоматизованого управління технологічними процесами
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота / проект

Маїстр

(рівень вищої освіти)

тему Удосконалення системи управління процесом
шпінтрової обробки матеріалів в термітних печах в
умовах металургійного виробництва

Виконав: студент 2 курсу, групи АКІІІ-18-1-из
спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-
інтегрована технологія
освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-
інтегрована технологія
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

Лихоман Р.В.
(підпис та прізвище)

Керівник доцент К.Т.Н. О.М. Баріщенко
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент директор І.В. Курілець І.А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запорізький національний університет.
(повне найменування закладу вищої освіти)

Тет Металургії
а Автоматизованого управління технологічними процесами
вищої освіти Другий (магістерський) рівень
(другий (магістерський) рівень)
Кількість 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва)
Спеціалізація _____
(шифр і назва)
Об'єктно-професійна програма 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

“ ” 20 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Лихоман Романа Володимировича
(прізвище, ім'я, по батькові)

а кваліфікаційної роботи магістра Удосконалення системи управ-
ління процесом теплової обробки матеріалів в термічних
печах в умовах металургійного виробництва
виконавця кваліфікаційної роботи магістра Баріщенко Олена Миколаївна К.Т.Н. Доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

визначені наказом закладу вищої освіти від “10” вересня 2019 року № 1541-с
з дня подання здобувачем кваліфікаційної роботи магістра 26 грудня 2019 р.

Відомі дані кваліфікаційної роботи магістра Аналіз системи управління
процесом теплової обробки матеріалів в термічних печах,
система документування, дані отримані під час проходження
практики на ТПОЗ „ЗМЗ”

Перелік питань, які потрібно розрахунково-пояснювальною запискою (перелік питань, які потрібно
вирішити) 1. Дослідження САР, проблеми, методів вирішення для
логічної камерної печі. 2. Розробка фізико-математичної мо-
делі процесу дослідження. 3. Дослідження існуючих методів удоскона-
лення процесу теплової обробки матеріалів в термічних печах. 4. Розробка
методів для рішення проблемних питань.

Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Система документування роботи викладача на 15 сторінках

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв	
Розділ 1	Баріщенко О.М. доцент к.т.н.		26.10.19
Розділ 2	Баріщенко О.М. доцент к.т.н.		26.10.19
Розділ 3	Баріщенко О.М. доцент к.т.н.		26.10.19
Розділ 4	Баріщенко О.М. доцент к.т.н.		26.10.19
Розділ 5	Баріщенко О.М. доцент к.т.н.		26.10.19
Розділ 6	Баріщенко О.М. доцент к.т.н.		26.10.19
Розділ 7	Баріщенко О.М. доцент к.т.н.		26.10.19
Нормоконтроль Двечникова Т.А., доцент			

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи магістра	При
1	Аналіз проблеми нерівномірності прогріву металу у термітній камерній печі	10.09.19 - 20.09.19	Викон
2	Розробка фізичної та математичної моделі камерної печі	20.09.19 - 07.10.19	Викон
3	Аналіз температурного поля робочого простору з використанням нових способів опалення	07.10.19 - 21.10.19	Викон
4	Розробка системи управління опаленням	21.10.19 - 04.11.19	Викон
5	Розробка візуалізації технологічного процесу	04.11.19 - 11.11.19	Викон
6	Економічна ефективність нововведень	12.11.19 - 20.11.19	Викон
7	Охорона праці і технічна безпека	22.11.19 - 15.12.19	Викон
	Підведення заключних висновків	15.12.19 - 26.12.19	Викон

Здобувач вищої освіти

(підпис)

 Лихомач Р.В.
 (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи магістра

(підпис)

 Баріщенко О.М.
 (прізвище та ініціали)

ВСТУП

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

Металургійний комплекс відіграє важливу роль в господарстві нашої країни. Це пов'язано з тим, що він визначає її економічний потенціал і обумовлює розвиток інших галузей господарства, передусім машинобудування і металообробки.

У металургії зосереджена велика частина промислово-виробничих одиниць основних фондів. Вона впливає також на розвиток територіальної структури країни – утворення промислових районів, вузлів і центрів.

Але у зв'язку зі зростанням ринкової вартості палива для промислових підприємств України, та підвищенням ринкових вимог до якості продукції, перед підприємствами стає питання як бути конкурентоспроможними та працювати не в збиток собі. Виходячи з цього підприємства починають вдосконалювати методи та пристрої термічної обробки металу, намагаючись зберегти баланс між якістю та витратами.

Одним із актуальних та більш дешевих способів зменшення витрат це застосування вдосконаленого способу опалення – імпульсно – реверсивного. Даний спосіб дозволяє мінімізувати кількість змін в конструкції печі, підвищити якість термообробки металу та значно скоротити час необхідний для виконання даного технологічного завдання.

Вищезгаданий спосіб опалення потребує теоретичного розрахунку параметрів печі, розрахунку тривалості імпульсів і оптимальної кратності рециркуляції продуктів згоряння.

МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета і задача дослідження: підвищення якості термообробки металу в термічних печах шляхом застосування удосконалених методів опалення.

Об'єкт дослідження: тепломасообмінні процеси в термічній печі.

Предмет дослідження: камерна термічна піч з нерухомим черенем.

Відповідно до поставленої мети досліджень сформульовані наступні задачі:

- провести аналіз сучасного стану термічної обробки в печах даного типу, а також напрямів енергозбереження;
- переробити конструкцію печі для впровадження імпульсно – реверсивного методу опалення;
- створити математичну модель для запропонованого методу опалення;
- обрати теоретичні методи розрахунку для тривалості імпульсів та пауз;
- розробити систему керування для реалізації імпульсно – реверсивного принципу опалення;
- розрахувати оптимальну кратність рециркуляції продуктів згоряння.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методи математичного моделювання для дослідження залежності розподілення температури в робочому просторі печі: розрахунок методу кінцевих різниць, теплового балансу камерної печі, розрахунок параметрів імпульсного методу опалення.

НАУКОВА НОВИЗНА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

1. На основі математичної моделі виведено залежності імпульсів, пауз в подачі енергоносія в період витримки металу від теплового потоку на металеву заготовку, параметра робочої теплової потужності, а також потужності на розігрів печі (холостий хід);
2. Проведено дослідження оптимальної кратності рециркуляції продуктів згоряння, встановлено ефективність рециркуляції відносно імпульсного методу опалення.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

Практичні значення отриманих результатів роботи полягають в тому, що чисельні дослідження на основі комплексної методики розрахунку імпульсно-реверсивного опалення дає можливість:

- 1.отримати тривалість імпульсів та пауз під час витримки в залежності від кратності рециркуляції продуктів згоряння;
- 2.визначитись із значеннями кінцевої тривалості витримки, витрати палива на цикл термообробки при роботі у різних діапазонах параметрів імпульсно – реверсивного опалення.

На основі запропонованого способу опалення камерної печі розроблено систему керування, яка коректно відображає результати та процеси, що відбуваються в робочому просторі печі під час термообробки заготовок.

ОСОБИСТИЙ ВНЕСОК

Теоретичні дослідження виконані автором самостійно. У наукових працях автора, виконаних разом зі співавторами, його особистий внесок полягає: в розробці системи управління роботою подачі паливно-повітряної суміші та повернення продуктів згоряння.

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Матеріали магістерської роботи були повідомлені та обговорені на наукових конференціях ЗНІ

СТРУКТУРА МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Магістерська робота складається з вступу, семи розділів, загальних висновків, літератури із 36 найменувань, 2 додатків і вміщує 90 сторінок основного машинописного тексту, 7 таблиць, 27 рисунків, усього 95 сторінок.

ЗМІСТ

Вступ	4
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ НЕРІВНОМІРНОСТІ ПРОГРІВУ МЕТАЛУ У ТЕРМІЧНІЙ КАМЕРНІЙ ПЕЧІ.....	9
1.1 Аналіз термічної обробки сталі в печах періодичної дії.....	10
1.2 Аналіз методів зниження витрат тепла через футерівку печі.....	12
1.3 Підвищення показника використання палива в робочому просторі печі.....	14
1.4 Методи організації внутрішньої рециркуляції гріючих газів.....	16
2 РОЗРОБКА ФІЗИЧНОЇ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КАМЕРНОЇ ПЕЧІ.....	22
2.1 Реконструкція камерної печі для застосування удосконалених способів опалення.....	22
2.2 Розробка математичної моделі процесу термообробки металу в камерній печі.....	23
2.2.1 Тепловий баланс термічної камерної печі.....	24
2.2.2 Матеріальний баланс термічної камерної печі.....	28
2.2.3 Розрахунок робочої потужності та потужності холостого ходу камерної печі.....	30
2.2.4 Розрахунок теплової потужності, що підводиться на метал у будь який момент витримки.....	30
2.3 Дослідження температурного поля робочого простору печі.....	31
2.4 Розробка рекомендацій щодо удосконалення засобів опалення.....	34
3 АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ З ВИКОРИСТАННЯМ УДОСКОНАЛЕНИХ СПОСОБІВ ОПАЛЕННЯ.....	36
3.1 Визначення температурного поля робочого простору печі при реверсивній подачі палива.....	36
3.2 Постановка задачі моделювання системи управління роботою печі при імпульсному опаленні.....	41
4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВНІ РОЗГЛЯНУТИХ СПОСОБІВ ОПАЛЕННЯ.....	45
4.1 Вибір закону регулювання.....	48

4.2	Налаштування ПІ – регулятора.....	49
4.2.1	Метод Зиглера – Нікольса.....	50
4.2.2	Метод CHR.....	53
4.2.3	Метод ручного підстроювання.....	55
4.3	Забезпечення коректної роботи реле і фільтрація сигналу.....	56
4.4	Первинна обробка сигналу.....	59
5	ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ.....	61
5.1	Встановлення зв'язку між мікроконтролером і SCADA–системо....	62
5.2	Відображення технологічного процесу в режимі реального часу....	63
5.3	Інтерфейс SCADA системи САР температури.....	65
6	РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	68
6.1	Техніко – економічне обґрунтування удосконалених засобів опалення.....	68
6.2	Ефективність та рекомендації що до застосування за результатами проведених розробок.....	72
7	ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	74
7.1	Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника кувального цеху.....	74
7.2	Заходи з поліпшення умов праці.....	79
7.3	Виробнича санітарія.....	81
7.4	Електробезпека.....	83
7.5	Пожежна безпека. Техногенна безпека.....	84
7.6	Засоби індивідуального захисту.....	86
	ВИСНОВКИ.....	87
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	89
	ДОДАТОК А.....	93

1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ НЕРІВНОМІРНОСТІ ПРОГРІВУ МЕТАЛУ У ТЕРМІЧНІЙ КАМЕРНІЙ ПЕЧІ

Сьогодні на підприємствах України які пов'язані галузями металургії та машинобудування широкого поширення набули камерні нагрівальні і термічні

печі, які опалюються природним газом. З точки зору універсальності сортamentів виробів, що нагріваються режимів нагріву, дані агрегати мають і ряд суттєвих недоліків: великі теплові втрати з димовими газами, нерівномірність нагріву садки, високий угар металу при нагріві [1]. Крім того, термічні камерні печі характеризуються суттєвими витратами теплоти на розігрів кладки, що пов'язано з періодичністю роботи, обумовленої заданим графіком нагріву. Обстеження пічного господарства металургійних заводів України показало, що питома витрата палива у вітчизняних печах значно вища у порівнянні з зарубіжними агрегатами, а якість продукції котру вони виготовляють не така конкурентоспроможна в порівнянні із закордонною. Українські підприємства починають страждати із за прагнення утриматися на рику будь якими силами. З іншого боку ціни на енергоносії викликають необхідність пошуку шляхів економії палива, а отже і впровадження прогресивних технологій.

На сьогоднішній день до роботи нагрівальних і термічних камерних печей висувають вимоги, які включають в себе: - забезпечення заданої продуктивності; - забезпечення якісного нагріву, тобто задоволення вимог по структурі й механічними властивостями металу, а також за ступенем окалино утворення і зневуглецювання; - ефективне використання палива, характеристикою якого служить питома витрата енергії на одну тону продукції; - відповідність екологічним нормам по гранично допустимому викиду в атмосферу шкідливих газів: CO, CO₂, NO_x, SO₂, C₂₀H₁₂; - механізація праці при експлуатації і ремонті печі та автоматизація її теплового режиму. На перший план при конструюванні печей висувається вимога ефективного використання палива та інших ресурсів, також рівномірності прогріву металу [2].

До основних способів економії енергії у промислових печах слід віднести:

- зниження витрат теплоти з робочого простору печі через футерівку і вікна в навколишнє середовище, а також на розігрів футерівки до робочої температури;

- підвищення коефіцієнта використання теплоти палива (КВП) в робочому просторі печі [3].

При цьому залишаються не менш актуальні питання вдосконалення управління температурними полями в печах, рухом гріючих газів та оптимізація управління теплової роботи.

Таку практику було випробувано на схожому підприємстві «Маріупольському ремонтно-механічному заводі» в 2013 р. Це крок дозволив підприємству скоротити витрати природного газу на 35% , а рівномірність прогріву металевих заготовок підняти з 75% майже до 93%. Також таку практику ввели на таких підприємствах: металургійний комбінат «Азовсталь», «Макійовському металургійному заводі», «Днепрспецсталь» і т.д.

1.1 Аналіз термічної обробки сталі в печах періодичної дії

Кування застосовується для поліпшення структури інструментальних сталей, а також для додання необхідної форми заготівлях інструменту. Щоб забезпечити високу якість інструменту, слід нагрівати заготовки перед куванням за описаним режимом, тому що кування сталі є відповідальною операцією. При недостатній поковке виникає карбідна ліквіація - місцеве скупчення карбідів у вигляді ділянок не зруйнованої карбідової евтектики.

Попередній нагрів заготовок. Заготовки завантажуються в піч з температурою від 450 – до 500 С і підігриваються до 850 - 870 С і швидкістю 100 С/ч. Витримка при: цієї температурі становить 1/3 часу нагрівання. При установці температури початку кування (від 1180°С – до 1140°С) прагне забезпечити досить низьку температуру кінця кування (від 850°С – до 840°С). Сталь Р6М5 рекомендують кувати нижче лінії, закінчувати ковку слід при температурі на 30 - 50°С. Для легованих сталей початок перетворень Оі - розчину в О±-розчину при охолодження не співпадає, внаслідок гістерезису, з перетворенням для вуглецевої сталі відповідного складу, а завжди буде нижчою.

Деформувати таку сталь в двохфазовому стані було б недоцільно, тому довелося б затягувати до 600°С.

Вимога суворо дотримуватися початкову та кінцеву температуру кування викликано тим, що в процесі кування пластична деформація при ударі повинні чергуватися з поверненням пластичних властивостей металу в проміжку часу між ударами.

У разі здійснення кування при температурі нижче кувального інтервалу, пластичні властивості металу не повертаються, в слідстві у матеріалі виникають пружні деформації, що перевищують межа міцності і призводять до виникнення тріщин,

Кування при температурі вище кувального інтервалу веде або до перегріву матеріалу, супроводжуються значним укрупненням зерна і падінням пластичних властивостей, особливо ударної в'язкості, або до пережогу металу в результаті нагрівання при температурах, близьких до точки початку плавлення, внаслідок чого по межі зерен спостерігається розплавлення основного металу і евтектики, що приводить до втрати зв'язків між зернами.

Для якісної проковки заготовок слід вибирати нагрівальні засоби, забезпечують підтримки рівномірного нагріву до температур початок і кінця кування. Остаточний нагрів після попереднього нагрівання в першій печі, заготовки переносять в другу піч для остаточного нагрівання до температури початок поковки.

Витримка при температурі остаточного нагріву дається з розрахунку 30 хв на кожні 25 мм перерізу заготовки.

Під час нагрівання заготівлю кантувати не менше двох разів.

Кування заготовок повинна проводитися шляхом багаторазової зворотної витяжки, причому деформація повинна відбуватися по всьому перетину заготовки, а не обмежуватися лише її поверхнею.

Щоб уникнути тріщин заготовки безпосередньо після її кування слід піддавати спеціальному охолодженню в печі з температурою приблизно 750 - 800 С. Після вирівнювання температур витримка заготовок в печі має бути не менше 3 годин. Після витримки заготовки переносять у піч для нагрівання до температури від 840 – до 860 С.

Після кування твердість HRC від 53 – до 56. Для попереднього нагрівання використовується піч.

Остаточний нагрів будемо виробляти в камерній печі при високотемпературної захисної атмосферою.

Безпосереднє охолодження після кування будемо виробляти у криниці при від 750°C – до 800 C .

1.2 Аналіз методів зменшення витрат через футерівку печі

При розгляді теплообмінних процесів в печах є необхідність звернути увагу на роль цегляної кладки робочого простору (футеровки). Основним призначенням футеровки є зведення до мінімуму неминучих теплових втрат внутрішнього тепла в зовнішній простір через огорожувальні конструкції. Під час роботи печі футеровка отримує теплоту від первинного випромінювача – нагрівача ними можуть виступати (факел або газу), поглинає її а потім віддає назад у піч. Поглинена футерівкою теплота, за наявності якісної зовнішньої теплоізоляції стін також повертається в піч шляхом власного випромінювання кладки та передається металевим тілам в середині печі. Внутрішня поверхня робочого простору печі, інтенсивно потрапляє під вплив потоку газів, отримуючи він них теплоту, яка після поглинання її цегляною кладкою також повертається назад до поверхні металу. В даному випадку футеровка під час процесу конвекції виступає трансформатором теплоти отриманою від газів.

При правильно організованому інтенсивному розвитку теплопередачі конвекції від газів до цегляного слою футерівки, перетворення теплоти отриманої в результаті конвекції в випромінювання може відігравати значну роль в тепловіддачі на поверхню металу. Таким чином футерівка печі виступає посередником між нагрівачем та предметами, що нагріваються. Завдяки цегляному слою футерівки з вогнестійкої цегли зменшується кількість втраченої теплоти за рахунок того що цегла вбирає та втримує більшу частину теплоти.

Витрати теплоти робочого простору присутні у всіх печах, особливо часті вони в нагрівальних і термічних печах які працюють циклічно, коли в

циклі термообробки присутнє охолодження яке супроводжується тривалими проміжками між нагрівом садки. В шари футеровки таких печей крім звичайної цегли входить шамотна цегла яка поглинає приблизно в три рази більшу кількість теплоти, ніж садіння металу.

В роботі [9] пропонується використати футерівку з вогнетривкого і теплоізоляційного матеріала з виступами, що будуть контактувати з внутрішньою поверхнею кожуху печі. В цьому випадку площа теплообмінної поверхні елементів кріплення буде перевищувати площу контактів виступів матеріала не менш ніж у 100 разів. Використання даного матеріала дозволяє зменшити площу контактів що в свою чергу зменшує зменшенню теплового потоку від вогнетривкого матеріалу до стінки корпусу завдяки опору теплоізоляційного матеріалу і контакту виступів з кожухом печі. Зменшення теплових витрат в процесі роботи печі поліпшує умови праці обслуговуючого персоналу, та збільшує строк служби футерівки.

Дивлячись і аналізуючи досвід в рішенні такої проблеми на аналогічних підприємствах у роботі пропонується виконати [10] футерівку печі з волокнистих матеріалів плитної або рулонного типу, до всього цього в загальному обсязі футерувальних матеріалів, ці ультра легкі волокнисті матеріали складають малу частку. За основу для виробництва волокнистих матеріалів беруть муллитокремнезисті і базальтові волокна з неорганічних зв'язуючи та високотемпературними властивостями. Футерівка на основі керамічного волокна перед звичайною вогнетривкою має переваги які полягають у низькій теплопровідності та невеликій інерційності, ці властивості най актуальніші при переривчастому режимі роботи камерної печі або при постійній зміні температури в робочому просторі печі. Також зменшена загальна маса футерувального матеріалу знижує акумуляцію тепла футеровкою, це дозволяє значно зменшити витрати тепла при розігріві печі. Що стосується монтажного кріплення футерувальних матеріалів то в різних зонах печі використовується різний вид кріплення, за рахунок цього забезпечується більш надійна та тривала працездатність волокнистих футеровок.

1.3 Підвищення показника використання палива в робочому просторі печі

Для термічних камерних печей та печей в загалі практично досяжним значенням коефіцієнта використання палива (КВП) вважають 0,9, при цьому 90% теплоти палива використовується в робочому просторі печі. Також можна теоретично уявити випадок, коли $KBP = 1$ тоді в цьому випадку вся теплота яка видаляється з димом із робочого простору, повертається в нього з фізичною теплотою повітря і палива які подаються до печі через пальники, форсунки, фурми.

В роботі пропонується три варіанти які підвищують коефіцієнт використання палива:

- за рахунок налагодження процесу повного спалювання палива при оптимальному коефіцієнті витрати повітря локалізуються дві проблеми недопал палива через недостатню або надлишкову кількість повітря зменшують КВП;
- Спад об'єму та температури газів які відходять із робочого простору за допомогою збільшення теплоти згорання палива, насичення повітря киснем і покращення процесу тепловіддачі між пічними газами та матеріалами;
- Виведення теплоти пічних газів які повертаються з нагрітими в рекуператорі або регенераторі. У всіх випадках КВП буде залежати від температури і об'єму газів, які покидають робочий простір камерної печі:

$$KBP = 1 - (V_d \times C_d \times t_{yx.atm}) / Q_p^H, \quad (1.1)$$

де V_d – питомий об'єм продуктів згорання відносно одиниці палива, м³/м³;

C_d – питома об'ємна теплоємність продуктів горіння, кДж/м³;

$t_{yx.atm}$ – температура газів перед димовою трубою, °С;

Q_p^H – теплота згорання палива, кДж/м³.

З перерахованих засобів підвищення показника КВП більш ефективним вважається утилізація теплоти вихідних газів за рахунок нагріву повітря і

газоподібного палива в рекуператорі. Частка теплоти в рекуператорі яка передається повітрю по відношенню до теплоти димових газів від 30% – до 40%. від 60% – до 70% остаточної теплоти виносяться до атмосфери.

До конструкції великих потужних печей зазвичай додають енергетичні котли (утилізатори), але камерна піч працює в режимі змінної продуктивності, що призводить до низької раціональності використання таких утилізаторів.

Найбільш вагомими причинами низької ефективності рекуператорів є:

- температура димових газів до рекуператора не повинна бути вище за 900 - 1000°C;
- фактична температура димових газів перед входом в рекуператор із-за підсосу холодного повітря температура не перевищує значення від 300°C – до 400°C;
- застосовуючи керамічний рекуператор то повітря підігрівається до більш високих температур, але є дві проблеми такі рекуператори громіздкі і негерметичні. Втрати повітря через нещільність приблизно 50%, завдяки цьому порушується теплова потужність печі і регулювання згорання.

Утилізація теплоти пічних газів зокрема з кулькових регенераторів є найбільш перспективний напрям розвитку конструкції камерних печей. Кулькові регенератори здатні повертати в піч тепло вихідних з печей газів приблизно 85% – 90% теплоти. Температура яка необхідна для підігріву повітря на 1000°C нижче температури диму на виході з печі, завдяки цьому спостерігаються зниження палива в 1,5 – 2 рази.

В роботі [11] пропонується спосіб розподілення газу й повітря на пальники у заданій пропорції що підвищить ефективність використання палива та зниження його витрат. Спалювання газового палива відносно прийнятих відхилень коефіцієнтів для витрат палива в суміжних пальниках від заданого забезпечення за рахунок подавання одного з компонентів згорання через сопла з різними вихідними перерізами, в них відношення площ повинно дорівнювати відношенню витрат компонентів горіння через них, в цей час другий компонент розподіляють рівномірно по пальникам. Запропонований метод при його впровадженні дозволяє окрім підвищення коефіцієнта

використання палива, також збільшити якість нагріву заготовок реалізуючи надійніше управління спалюванням палива.

1.4 Методи організації внутрішньої рециркуляції гріючих газів

На ряду з енерго- та ресурсозбереженням, камерні печі майбутнього повинні забезпечувати більш високу якість теплової обробки металу. Висока якість продукції ковальського, ковальсько – пресового, виробництва багато в чому залежить від точності виконання вимог технологічного параметру температури, рівномірності і стандартності нагрівання виробів. Температура нагріву характеризується температурою поверхні деталі в момент видачі її з печі. Результати рівномірності прогріву металевої заготовки отримують за рахунок вимірювання перепаду температур і якщо цей перепад в допуску та поперечний переріз в момент видачі з печі в нормі то якість в нормі.

Вимоги до температури та рівномірності прогріву металу по товщини роблять шляхом відповідної витримки металу в печі при певній температурі. Як показує практика що для рівномірного та стандартного нагріву деталі необхідно керувати температурним полем в об'ємі робочого простору печі за допомогою циркуляції газів.

Організація інтенсивної внутрішньої рециркуляції гріючих газів навколо садки забезпечуються за рахунок енергії високотемпературних швидкісних струменів продуктів згорання. Вони утворюються при спалюванні газоповітряної суміші в швидкісних або напірних пальниках. Швидкість з якою надходять продукти згорання до вільного простору печі під садкою дорівнює приблизно 100м/с, через зазор між садкою і бічною стінкою поєднуються з частиною пічних газів, перемішуються з ними в під череневому просторі. Далі ця суміш газів рухається далі по зазору між садкою і футерівкою печі в корінь струменя продуктів згорання і до димовідводу.

Об'єм гріючих газів, які переміщується в робочому просторі печі, пропорційний кількості рециркуляцій. Для розрахування кратності рециркуляції використовуємо формулу:

$$K = \frac{V_1 + V_2}{V_1}, \quad (1.2)$$

де V_1 – кількість свіжих продуктів згорання;

V_2 – кількість пічних газів, які приєдналися до струменя.

Кількість кратності рециркуляції визначається допустимою величиною нерівномірності нагріву і коливання теплової потужності: чим вище значення необхідне для рівномірності нагріву та ширше інтервал коливання теплової потужності, тим висче значення кратності рециркуляції треба забезпечити [1].

Основним недоліком нагрівальних і термічних камерних печей з нерухомим подом є труднощі в забезпеченні рівномірності розподілу температури в робочому просторі. В процесі вирівнювання температури відбувається лише при умові зміни температурного напору, так і залежність зміни коефіцієнта тепловіддачі при зміні витрати, а також швидкості гріючих газів [4].

Як було зазначено вище, оптимізувати температурне поле можна за рахунок поліпшення перемішування гріючих газів якщо збільшувати їх швидкість до встановлення режиму течії автотельної області при числі Рейнольдса $Re \geq 5 \cdot 10^3$ [5]. Невирішеною залишається задача стабілізації зовнішньої рециркуляції під час зменшення витрати палива.

Існує перспективний метод опалення для камерних печей імпульсний, він дозволяє при зменшенні теплових навантажень зберегти максимальні миттєві витрати гріючих газів, їх швидкості перемішування [4].

Для нагрівальних і камерних печей актуальним є перехід від факельного спалювання палива на розподілений за обсягом печі, тобто об'ємного спалювання палива [3]. Для повної реалізації методу об'ємного спалювання палива в нагрівальних і термічних камерних печах потребують конструктивного рішення і технологічного обґрунтування.

Щоб реалізувати такий метод на промисловій печі способом впливу на рециркуляцію, заснованого на частковому перекритті каналу за допомогою заслінки, що переміщується або повертається, представляє великі труднощі, так як температура горючої суміші в термічних печах нерідко може перевищувати 1000°C . Металева конструкція заслінки при роботі в таких

температурних умовах потребує додаткове водяне охолодження, це суттєво ускладнює процес роботи та постає необхідність у додатковому водному господарстві.

Шляхи розв'язання згаданих проблем наштовхнули на ідею розробки способу струйного управління рециркуляцією [13]. В цьому способі зміна кратності рециркуляції втілюється за рахунок регулюючого струменя, спрямованого на зустріч продуктам згоряння співвісно соплу пальника.

За впливом керуючого струменя можливо задіяти зміну напрямку руху газів у центральному і вихідному каналі на протилежне, а також розглянути різні поєднання напрямків руху зображених на (рис.1.1). Використання рециркуляції за допомогою протиборчого струменя так само, як і при використанні заслінки, дозволить підводити підготовлений теплоносій до найбільш відстаючої ділянки садки в процесі роботи – центральної.

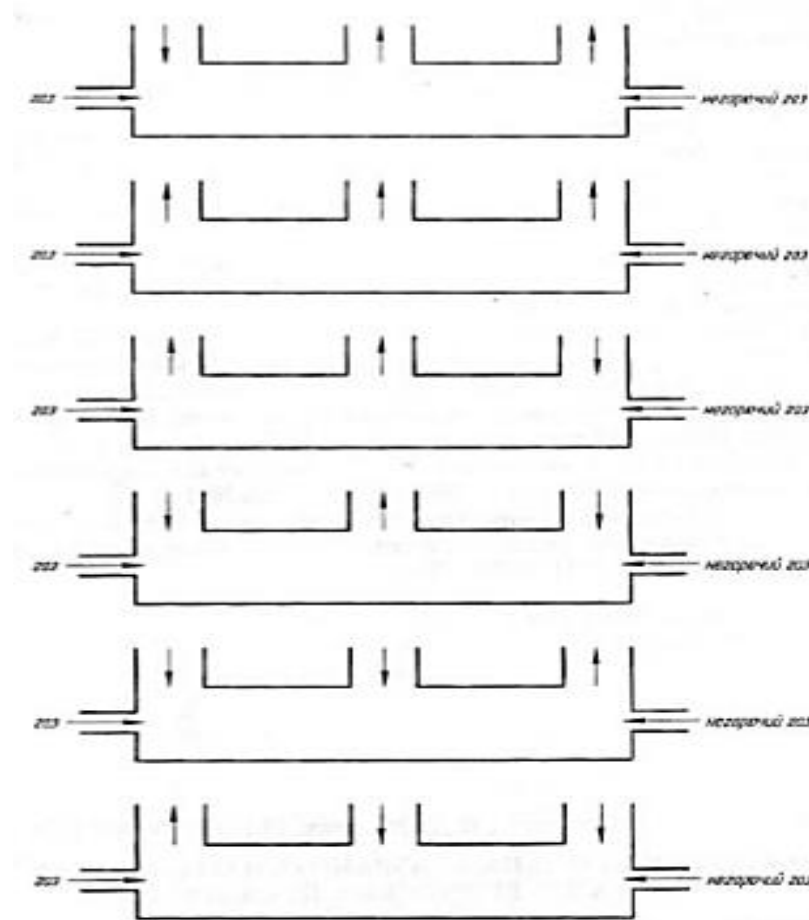


Рисунок 1.1 – Схеми руху газів при струйному управлінні рециркуляцією

Центральна зона, утворюється заготовками або пакетами прокату, на відміну від зовнішніх проточних зон, це є найбільшим споживачем корисної

теплоти. Швидкість, продуктивність і рівномірність нагріву визначається підведенням теплоти саме до цієї ділянки садки [7].

В роботі [12] пропонується за рахунок нового способу допалювання продуктів неповного згорання забезпечується рівномірний нагрів злитків по висоті та ширині камерної печі і зменшити тривалість періоду витримки, що дозволить значно зменшити витрати на енергоресурси. Під час витримки теплове навантаження поступово зменшується до величини, яка відповідає значенню холостого ходу печі, зменшується витрата гріючих газів, які беруть участь у теплообміні, це приводить до ускладнення процесу нагріву. Теплове навантаження обмежують температурною ділянкою які нагріваються, а загальний час необхідний на термообробку розраховують і задають виходячи з умов нагрівання найменш прогрітих ділянок виробу. Такі дії призводять до зниження продуктивності печі та колосальній перевитраті енергоносіїв.

В такому разі продукти неповного горіння допалюють у зонах зниження температур за рахунок спрямованого підсмоктування в данні зони атмосферного повітря або як варіант примусова подача окислювача. Таким чином відбувається стабілізація температурного поля по усьому робочому простору камерної печі.

Проведений аналіз найбільш поширених існуючих напрямів енергозбереження показав, що жоден із них у повній мірі не надає можливості вирішити задачу управління тепловим полем в середині робочого простору камерної печі. Як показує практика, що для рівномірного по поверхні і стандартного нагріву виробів стає необхідність керувати температурним полем в обсязі зони робочого простору печі, звичайно не без допомоги циркуляції газів і умов спалювання палива. Якщо враховувати, що теплоту випромінювання в печі на один – два порядки менше в порівнянні пов'язано з конвективним перенесенням теплоти рухомих газів, тому можна зробити висновок, що керувати температурним полем печі це теж саме що і керувати рухом газів, за допомогою яких теплота повинна бути доправлена до кожної локальної ділянки поверхні металу і футеровки.

Основним завданням даної науково – дослідної роботи є спроба розробки імпульсно – реверсивного способу опалення камерних печей, при

якому змінюється напрямок руху гріючих газів, тим самим забезпечуючи рівномірність температурного поля по ширині і висоті печі та скорочується тривалість періоду витримки металу, та перегляд футерувальних матеріалів які входять в склад футерівки камерної печі з нерухомим подом.

2 РОЗРОБКА ФІЗИЧНОЇ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КАМЕРНОЇ ПЕЧІ З НЕРУХОМИМ ПОДОМ

2.1 Реконструкція камерної печі для застосування удосконалених способів опалення

Термічна камерна піч з нерухомим черенем складається з кількох основних елементів по перше робочого простору в якому на нерухомому черені розміщуються вироби які піддаються термічній обробці. Пальники із соплами розташовуються по бічних стінках, канали відводу та подачі повернення з'єднуються за рахунок так званого ежектора, димові канали приєднуються до збірного колектору, димовою трубою та заслінкою з виконуючим механізмом.

Принцип роботи печі простий. Паливна суміш, потрапляє по трубопроводу до пальників займається та горить без посередньо в робочому просторі печі. Продукти згорання, тобто (димові гази), які утворюються, далі ці гази проходять під черенем і потрапляють в робочий простір де кінцевою їх місією є віддати левину долю теплоти металу в печі. Далі продукти згорання витягуються через димовий канал до цехової системи димовидалення та викидаються до атмосфери.

Оскільки продукти згорання можуть досягати температури в 900° , то транспортування виконує не димосос а ежектор. Газовим ежектором називається пристрій, в якому максимально повний тиск газового потоку значення котрого росте завдяки дії струї другого з більшим тиском потоку.

Обмін енергією між потоками проходить шляхом їх турбулентного змішування. Сам по собі ежектор має не складну конструкцію, може працювати в широкому діапазоні зміни параметрів газу, також дає можливість з легкістю регулювати робочий процес та проводити варіацію параметрів роботи камерної печі.

Схематично ежектор виглядає як металева трубка з декількома рядами отворів. Він виконує роль свого роду насосу (рисунок 2.2), який дозволяє надати велику кількість газу в порівнянні з невеликим тиском за рахунок

енергії деякої кількості газу високого тиску. Повітря під тиском випускають в ежектор де в ньому роблять суміш газів. Тому ми можемо бачити таку закономірність чим вищий тиск повітря, тим буде більша кількість повернення можливо привести в рух з заданою швидкістю.

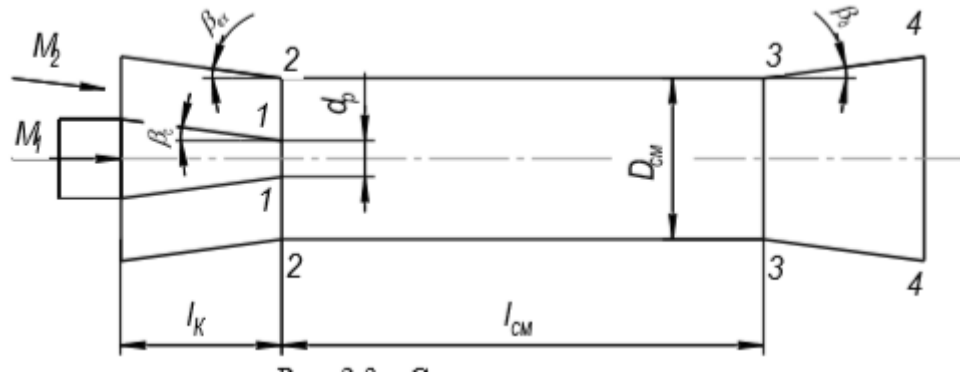


Рис 2.2 – Схема ежектора

Ежектор в свою конструкцію включає такі елементи як: висонапірне сопло, низьконапірне сопло, камера змішування, і в деяких випадках звичайний дифузор.

2.2 Розробка математичної моделі процесу термообробки металу в камерній печі

Одною з першочергових задач енергоефективності термічних камерних печей є створення їх адекватних математичних моделей, що містять в собі явний вигляд всіх енергетичних характеристик і конструктивних параметрів таких технологічних об'єктів [18]. За рахунок цього можна методом обчислювання вирішувати такі завдання:

- конструктивну і технологічну оптимізацію за завданням критерієм ефективності;
- оцінка теплового навантаження печі по зонах;
- розподіл температурного поля всередині камери;
- аналіз змін теплового потоку в об'ємі печі і т.д.

При застосуванні простих методів несучих найбільш повну інформацію про температурне поле методологія розрахунку, що синтезувалася на основі спільного використання чисельніших інженерних методик, можуть надати цілком достатні данні. На це значною мірою впливають великі сучасної

обчислювальної техніки. Виходячи з цього поставлена задача синтезувати та проробити математичну модель термічної камерної печі спираючись на основні принципи інженерної методики розрахунку за допомогою чисельних методів оцінки розподілу температурного поля в середині печі.

Вихідними даними розробляємої математичної моделі є кількість та маса заготовок які безпосередньо беруть участь у термічній обробці, відсотковий склад палива та сталі, температура посаду та кінцева температура нагріву, час необхідний для термообробки заготовок, вологість повітря та коефіцієнт витрати повітря.

Етапи розрахунку запропонованого теоретичного експерименту:

- розрахунок теплового балансу термічної камерної печі;
- розрахунок матеріального балансу в залежності від складу палива та коефіцієнта витрати повітря;
- знаходження значення робочої потужності холостого ходу камерної печі;
- розрахунок теплової потужності, що впливає на метал у будь який момент під час роботи печі;
- знаходження значень тривалості імпульсів та пауз при імпульсному способі подачі палива.

2.2.1 Тепловий баланс термічної камерної печі

Щоб розрахувати тепловий баланс печі треба застосувати закон збереження енергії, він дозволяє провести технологічний аналіз роботи печі. Також до таблиці 2.1 зведено данні необхідні для розрахунку кількості теплоти, що відходить з газами.

Рівняння для розрахунку теплового балансу виглядає так:

$$Q_{x.t} + Q_{ф.в} + Q_{екз} = Q_{м} + Q_{ух} + Q_{под} + Q_{кл} + Q_{ізл} + Q_{акк} + Q_{н.п}, \quad (2.1)$$

де $Q_{x.t}$ – хімічне тепло, що вноситься паливом, МДж;

$Q_{ф.в}$ – фізичне тепло, що вноситься підігрітим повітрям, МДж;

$Q_{екз}$ – фізичне тепло від перебігу екзотермічної реакції, МДж;

Q_M – кількість тепла, що витрачається на нагрів металу садки, МДж;

$Q_{ух}$ – кількість теплоти, що відходить з газами, МДж;

$Q_{под}$ – кількість тепла необхідна для розігріву підставок, МДж;

$Q_{кл}$ – кількість теплоти виділяемою кладкою печі в атмосферу, МДж;

$Q_{ізл}$ – кількість тепла, що виділяється з печі за рахунок випромінювання, МДж;

$Q_{акк}$ – кількість тепла, що акумулюється кладкою, МДж;

$Q_{н.п}$ – кількість тепла з неврахованих втрат, МДж;

Тепер розглянемо кожен складову теплового балансу окремо:

де: $Q_{х.м}$ – хімічне тепло, що вноситься паливом, МДж

$$Q_{х.м} = Q_H^p \times V_m \times \tau_{заг.} \quad (2.2)$$

де: V_m – витрати палива, м³/год;

Q_H^p – теплота згорання палива, МДж/м³;

$\tau_{заг.}$ – загальний час нагрівання, год;

$$Q_H^p = 0,128 * CO + 0,112 * H_2 + 0,351 * H_2S + 0,426 * CH_4 + \sum Q * \left(\frac{C_n H_m}{100}\right), \quad (2.3)$$

де CO – вміст окису вуглецю в паливі, що використовує піч, %;

H_2 – вміст водню в паливі, що використовується в печі, %;

H_2S – вміст сірководню в паливі, що використовується в печі, %;

$Q_{ф.в}$ – фізичне тепло, що вноситься підігрітим повітрям, МДж;

$$Q_{ф.в} = Q_{ф}^B \times V_m \times \tau_{заг.}, \quad (2.4)$$

де $Q_{ф}^B$ – фізичне тепло, яке виситься підігрітим повітрям;

$$Q_p^H = \alpha \times L_0 \times i_b^t, \quad (2.5)$$

де α – коефіцієнт витрати повітря;

L_0 – теоретична витрата повітря для горіння, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

i_b^t – тепло вміст повітря при $t_b = 500^\circ\text{C}$;

$Q_{\text{екз}}$ – фізичне тепло від перебігу екзотермічної реакції, МДж;

$$Q_{\text{екз}} = Q_{Fe} \times G_m \times 0.01 \times \alpha, \quad (2.6)$$

де Q_{Fe} – тепловий ефект реакції окислювання заліза ($Q_{Fe} = 5,650$ МДж/кг);

G_m – загальна маса садки;

α – відсотковий показник угару заліза ($\alpha=1,5\%$);

Q_m – кількість тепла, що витрачається на нагрів металу садки, МДж;

$$Q_m = G_m \times (i_k - i_0), \quad (2.8)$$

де i_k – кількість тепла яке поглинула сталь певного складу в кінці періоду термообробки кДж/кг;

i_0 - кількість тепла яке поглинула сталь певного складу на початку періоду термообробки кДж/кг;

$Q_{\text{ух}}$ – кількість теплоти, що відходить з газами, МДж:

$$Q_{\text{ух}} = V_d \times i_d \times B_m \times \tau_{\text{общ}}, \quad (2.9)$$

де V_d – кількість продуктів згорання, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

i_d – ентальпія продуктів горіння при температурі печі t_p , МДж/м³.

Таблиця 2.1

Ентальпія продуктів горіння при певному спектрі температур печі t_p .

$t_p, ^\circ\text{C}$	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
$i_d, \text{МДж/м}^3$	1,21	1,35	1,5	1,705	1,88	2,1	2,23	2,44

$Q_{\text{под}}$ – кількість тепла необхідна для розігріву підставок, МДж;

$$Q_{\text{под}} = 0,15 \times Q_{\text{м}} \quad (2.10)$$

$Q_{\text{кл}}$ – кількість теплоти виділяємою кладкою печі в атмосферу, МДж;

$$Q_{\text{кл}} = 3,6 \times F_{\text{н}} \times \alpha \times (t_{\text{н}} \times t_{\text{в}}) \times \tau_{\text{общ}} \times 10^{-3}, \quad (2.11)$$

де $F_{\text{н}}$ – значення площі зовнішньої поверхні кладки печі, м^2 ;

α – показник тепловіддачі від зовнішньої поверхні до навколишнього середовища, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{°C}$;

$t_{\text{н}}$ – температура зовнішньої поверхні печі, °C ;

$t_{\text{в}}$ – температура навколишнього середовища, °C .

$Q_{\text{изл}}$ - кількість тепла, що виділяється з печі за рахунок випромінювання, МДж;

$$Q_{\text{изл}} = 3,6 \times C_0 \times [(T_{\text{п}}/100)^4 - (T_{\text{окр}}/100)^4] \times F_{\text{вікна}} \times \psi \times \tau_{\text{відкр}} \times 10^{-3}, \quad (2.12)$$

де C_0 – значення коефіцієнта випромінювання абсолютно чорного тіла;

$F_{\text{вікна}}$ – число площі вікна загрузки, м^2 ;

ψ – коефіцієнт діафрагмування, в нашому випадку ($\psi = 0,7\%$);

$\tau_{\text{відкр}}$ – необхідний час на посад, год;

$Q_{\text{акк}}$ – кількість тепла, що акумулюється кладкою, МДж;

$$Q_{\text{акк}} = V_{\text{огн}} \times \rho_{\text{огн}} \times (i_{\text{к}} - i_{\text{н}}) \times 10^{-3}, \quad (2.13)$$

де $V_{\text{огн}}$ – значення об'єму вогнетривкого шару, м^3 ;

$\rho_{\text{огн}}$ – значення щільності вогнетриву;

$i_{\text{к}}$, $i_{\text{н}}$ – значення ентальпії шару вогнетривкого матеріалу на кінці та початку нагрівання печі до заданої температури;

$Q_{\text{н.п}}$ – кількість тепла з неврахованих втрат, МДж;

$$Q_{\text{н.п}} = 0,20 \times (Q_{\text{под}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{акк}}) \quad (2.14)$$

2.2.2 Матеріальний баланс термічної камерної печі

Матеріальним балансом вважають співвідношення кількості вхідної речовини, проміжної продукції, які використовувались у виробництві до кількості фактично отриманої готової продукції, побічних продуктів, відходів і втрат, іншими словами це співвідношення теоретично можливої і практично отриманої кількості готової продукції.

Рівняння матеріального балансу горіння палива:

$$V_T + V_B = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{SO_2}, \quad (2.15)$$

де V_T – кількість палива яке надійшло;

V_B – кількість повітря необхідна для спалювання палива;

$$V_B = \alpha \times (0.0476 \times [0.5CO + 0.5H_2 + 1.5H_2S + 2CH_4 + \Sigma(m+n/4) \times C_mH_n - O_2]), \quad (2.16)$$

де α – коефіцієнт витрати повітря;

CO, H₂, H₂S, CH₄ – значення відсоткового складу відповідно окису вуглецю, водню, сірководню та метану в паливі;

V_{CO_2} – кількість вуглекислого газу в продуктах горіння.

$$V_{CO_2} = (CO + CO_2 + CH_4 + \Sigma m + C_m H_n) \times 0.01, \quad (2.17)$$

де V_{H_2O} – об'єм водяної пари в продуктах горіння;

$$V_{H_2O} = (H_2 + H_2S + 2 \times CH_4 + \Sigma n/2 \times C_m H_n + H_2O + 0.124 \times L_g \times f_B) \times 0.01, \quad (2.18)$$

де L_g – кількість повітря для спалювання палива даного складу.

V_{N_2} – кількість азоту в продуктах горіння:

$$V_{O_2} = (N_2 + 79 \times L_g) \times 0.01, \quad (2.19)$$

де N_2 – відсоткова доля азоту в складу палива;

V_{O_2} – кількість кисню в продуктах горіння.

$$V_{O_2} = (0.21 \times (\alpha - 1) \times L_0), \quad (2.20)$$

де L_0 – теоретичне значення кількості витрати повітря для горіння палива.

Розрахунок коефіцієнта корисної дії камерної печі:

$$\eta = Q_M / (Q_{x.T} + Q_{екз}) \times 100\%, \quad (2.21)$$

Розрахунок продуктивності камерної печі:

$$P = G_H / \tau_{заг} \quad (2.22)$$

2.2.3 Розрахунок робочої потужності та потужності холостого ходу камерної печі

Теплова потужність печі – це кількість теплоти, яка виділяється при роботі печі за одиницю часу за умови повного згорання палива. Частина потужності споживаної паливом витрачається на здійснення корисної роботи – нагріву металу. Ця частина поглинається матеріалами і тому зветься засвоєною потужністю $M_{усв}$, друга частина вимушено випадає в навколишнє середовищем - $M_{пот}$:

$$M_{общ} = M_{усв} + M_{пот}, \quad (2.23)$$

Потужність холостого ходу печі розраховується:

$$M_{ХХ} = M_{прп} / \eta_{вп}, \quad (2.24)$$

де $M_{прп}$ – потужність втрат теплоти в робочому просторі;

$\eta_{вп}$ – коефіцієнт використання палива.

2.2.4 Розрахунок теплової потужності, що підводиться на металу будь – який момент часу витримки

Зміна в часі значення теплової потужності, що підводиться, в будь – який момент часу витримки [17]:

$$M = M_{\text{роб}} * \exp(-\tau/\tau_{\text{п.в.}}) + M_{\text{ХХ}} * [1 - \exp(-\tau/\tau_{\text{п.в.}})] , \quad (2.25)$$

де $M_{\text{роб}}$ – робоча тепла потужність печі на початку періоду витримки металу, Вт;

$\tau_{\text{п.в.}}$ – постійна часу.

$$\tau_{\text{п.в.}} = \tau^{\text{II}} / (\ln q_{\text{поч}}^{\text{II}} - \ln q^{\text{II}}) , \quad (2.26)$$

де τ^{II} – значення загального часу витримки, с;

$q_{\text{поч}}^{\text{II}}$ – кількість теплового потоку на метал на початку періоду витримки;

q^{II} – кількість теплового потоку на метал за весь період витримки.

2.3 Дослідження температурного поля по ширині та висоті печі

Для рішення задачі теплопровідності необхідно її розглядати з приведенням крайових умов, а також застосування для її вирішення чисельно - аналітичних методів. В даній роботі приведена методика розрахунку параметрів нагріву металу в термічній камерній печі з нерухомим подом, розрахунок поля температур при різних коефіцієнтах витрати палива методом кінцевих різниць.

На (рис. 2.2,а) наведеному нижче представлена схема об'єкту дослідження з зазначенням контурів руху продуктів горіння.

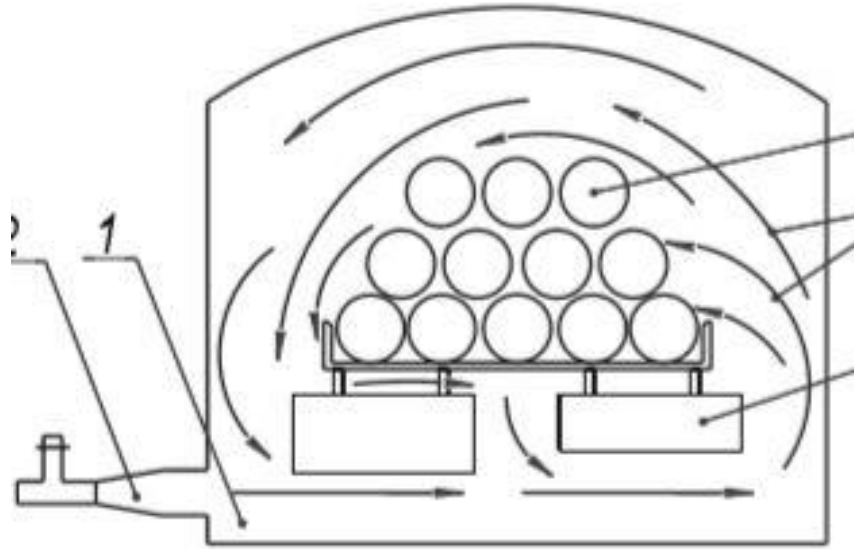


Рис 2.2, а Схематичне зображення камерної печі з нерухомим подом

За для визначення поля температур в робочому просторі застосовується рівняння теплопровідності. У рідких випадках воно приймає вигляд рівняння за законом Фур'є:

$$c\rho \frac{dt}{d\tau} = \text{div}(\lambda * \text{grad}t) , \quad (2.36)$$

де c – значення теплоємності, кДж/кгК;

ρ – значення густини, кг/м³;

τ – значення тривалості нагріву, с;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м*К.

Основне завдання теплопровідності розглядається в 2-х координатах, Y та X . Рівняння теплопровідності в такому випадку приймає вигляд:

$$c\rho \frac{dt}{d\tau} = \frac{d}{dy} \left(\lambda \frac{dt}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(\lambda \frac{dt}{dz} \right) , \quad (2.37)$$

Схема для математичної постановки завдання наведена на рис. 2.3. На малюнку зображуються осі, відображаючи напрямок дослідження температурного поля камерної печі. Так як наша піч є симетричною по розташуванню багаторядної садки металу, початок координат розташовується в середині по ширині печі.

На основі методу кінцевих різниць, на схемі схематично показано вибір кроку сітку дослідження dy і dz .

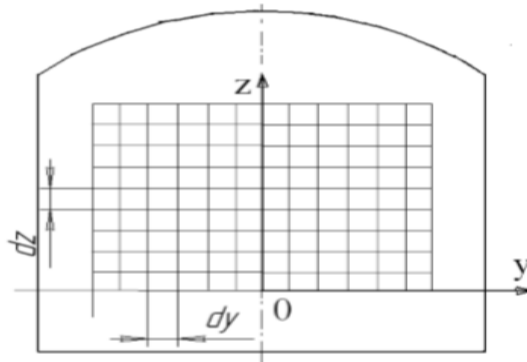


Рис. 2.3– Сітка дослідження dy і dz для рішення задачі теплопровідності
Для розгляду даної задачі потрібно записати:

Початкові умови:

$$t(y, z, 0) = f(y, z) , \quad (2.38)$$

Граничні умови III роду:

$$-\lambda \frac{dt}{dn} = \alpha [t_d(\alpha_B) - t(\tau)] , \quad (2.39)$$

де α – сумарний коефіцієнт, Вт/ (м²*К);

n – значення нормалі, що характеризує розподілення температури на площі y, z .

Граничні умови (2.39) для розподілу температури по двомірній задачі прийняті наступними, згідно рис 2.1:

Для верхніх та бокових поверхонь рівняння має вигляд:

$$-\lambda_y \frac{dt_n}{dy} = \alpha_{\Sigma y} [t_{d.y} - t_{n.y}(\tau)] ; \quad (2.40)$$

$$-\lambda_z \frac{dt_n}{dz} = \alpha_{\Sigma z} [t_{d.z} - t_{n.z}(\tau)] . \quad (2.41)$$

Для лівої та нижньої грані рівняння має вигляд:

$$\frac{dt_n}{dy} = 0 ; \quad (2.42)$$

$$\frac{dt_n}{dy} = 0 , \quad (2.43)$$

де $\alpha_{\Sigma y}$, $\alpha_{\Sigma z}$ – значення сумарного коефіцієнта тепловіддачі по осям y і z відповідно, Вт/м²К;

$t_{d.y}$, $t_{d.z}$ – значення температури продуктів згорання відносно до осей y і z , °С;

λ_y , λ_z – значення теплопровідності відносно до осей y і z , Вт/мК;

$t_{n.y}$, $t_{n.z}$ – значення температури поверхні металу по осях y і z , °С.

Формула розрахунку сумарного коефіцієнта тепловіддачі з рівняння Стефана – Больцмана:

$$\alpha_{\Sigma y} = \frac{q_y}{t_{d.y} - t_{n.y}} . \quad (2.44)$$

Визначення теплового потоку можливо за умови передачі тепла випромінювання і 10% на тепловіддачу конвекцією:

$$q_y = 1,1 * \varepsilon_r * C_0 \left[\left(\frac{T_{d.y}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{n.y}}{100} \right)^4 \right] , \quad (2.45)$$

де 1,1 – коефіцієнт, що враховує 10% на тепловіддачу конвекцією;

ε_r – значення ступеня чорноти газу;

C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/м²К⁴;

Для осі z рівняння є аналогічним.

2.4 Розробка рекомендацій щодо удосконалення засобів опалення

Проаналізувавши результати дослідження процесу термообробки сталі в камерній термічній печі та проведення оцінки її роботи постає необхідність

удосконалення методів та пристроїв теплової обробки. Досліди показали, що найсуттєвішим недоліком в процесі термообробки металу це поява перепаду температур по висоті і за перетином садки, який в свою чергу тягне за собою нерівномірне розподілення теплоти продуктів горіння по площі робочого простору печі.

Усунення недоліку призведе до значного поліпшення процесу термообробки металу та скорочення її тривалості, це принесе відчутний економічний ефект.

В момент роботи печі в періоді витримки через різке зниження витрати паливно – повітряної суміші порушується рециркуляційний контур, через це садка металу нагрівається повільно та нерівномірно. При одно напрямленому русі газів відзначається перепад у температурі між вхідними і вихідними каналами топки, а при випадку багат шарової садки – перепад температури по висоті печі.

На разі виникає необхідність розробити спосіб опалення, який би давав можливість керувати швидкістю перемішування продуктів згорання та напрямом їх руху, та вносити мінімальні зміни в конструкції печі.

Усі вище згадані проблеми пропонується вирішувати за допомогою нового способу опалення – імпульсно – реверсивного, який комбінує у своєму складі імпульсну подачу паливно повітряної суміші, а також змінити напрям руху продуктів згорання під час пауз в подачі палива.

На сам перед треба розробити математичну модель, яка за допомогою математичного опису буде відображати процеси які супроводжують імпульсно – реверсивний метод подачі енергоносія та до завершення усьому цьому систему управління яка буде мати змогу реалізовувати задані алгоритми.

3 АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ З ВИКОРИСТАННЯМ УДОСКОНАЛЕНИХ СПОСОБІВ ОПАЛЕННЯ

3.1 Визначення температурного поля робочого простору печі при реверсивній подачі палива

За допомогою рециркуляції продуктів згорання по робочому простору печі в підчереневій топці здійснюється поєднання відпрацьованих і свіжих продуктів згорання. Так температурне поле гріючого середовища слід розглядати в перетині печі керуючись двома простими координатами (ширина і висота печі), а третю координату по довжині печі в урахування не беремо так як температура істотно не змінюється і може вважатися рівною по довжині. Тому дуже важливо розрахувати температурне поле не тільки по ширині печі але і по висоті.

У роботі поставлена задача технологічно вирішувалось за допомогою незначної реконструкції печі, при експлуатації якої можливо змінювати напрям руху продуктів згорання, за рахунок чого зменшується перепад температури по ширині та висоті а за разом сумарна витрата палива в печі.

Якщо розглянути схему на (рис. 3.1) наведену нижче, можна побачити що додано регулююче сопло навпроти пальника.

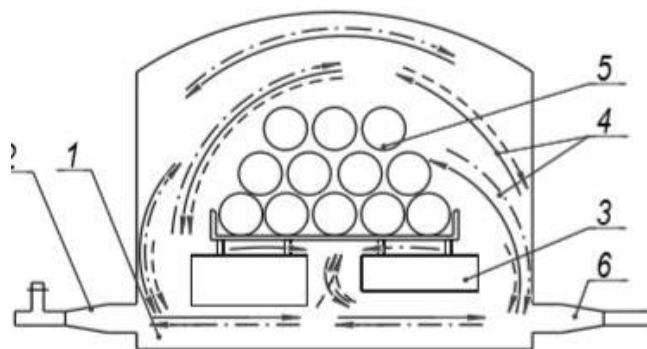


Рис. 3.1б Схема руху продуктів горіння з додаванням регулюючого сопла

В такому випадку напрямок руху продуктів згорання і температура суміші корегуються за допомогою зміни параметру струменя газу, що подається через сопло в підподову топку. В роботі пропонується в якості

регулюючого газу використовувати повернення. Розглянемо тепловий баланс печі за один повний цикл користуючись наведеною схемою.

$$Q_{x.m} + Q_{ф.м} + Q_{ф.в} = Q_M + Q_d + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 , \quad (3.1)$$

де $Q_{x.m}$ – кількість хімічного тепла палива, кДж;

$Q_{ф.м}$ – кількість фізичного тепла, що вноситься з підігрітим паливом, кДж;

$Q_{ф.в}$ – кількість фізичного тепла, що вноситься з підігрітим повітрям, кДж;

Q_M – кількість тепла, що використовується на нагрів металу, кДж;

Q_d – кількість тепла, що уноситься продуктами горіння, кДж;

Q_1 – значення кількості втрати тепла від неповноти згорання палива, кДж;

Q_2 – значення втрати тепла з окалиною, кДж;

Q_3 – значення втрати тепла теплопровідністю через кладку, кДж;

Q_4 – значення втрати тепла випромінюванням через отвори, кДж;

Q_5 – значення втрати тепла на нагрів бугелів, кДж;

Q_6 – значення втрати тепла на акумуляцію кладкою, кДж;

Q_7 – значення неврахованих втрат, кДж.

Давайте припустимо, що повітря і паливо не підігріваються, тобто $Q_{ф.м}$ та $Q_{ф.в}$ дорівнюють нулю, то формула (3.1) прийме такий вигляд:

$$V_T \cdot Q_H^P \cdot \tau = G \cdot c_M (\overline{t_k} - \overline{t_H}) + V_T \cdot \tau \cdot V_d^0 \cdot t_d \cdot c_d + \sum Q , \quad (3.2)$$

де V_T – значення об'ємної витрати палива за одиницю часу, м³/с;

Q_H^P – кількість теплоти згорання палива кДж/м³;

τ – деякий проміжок часу, с;

G – значення маси садки, кг;

c_m, c_d – середня об'ємна теплоємність металу і продуктів згорання, $\text{кДж/м}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$;

t_k, t_n – середньомасова кінцева та початкова температури металу;

t_d – значення температури продуктів згорання, які відходять, $^\circ\text{C}$;

V_d^0 – значення питомого об'єму продуктів згорання, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

ΣQ – загальна сума теплових витрат, кДж .

Як бачимо із схеми 2.2б, що при здійсненні управління рухом продуктів згорання за методом повернення, запис рівняння теплового балансу прийме вигляд:

$$B_T \cdot Q_H^p \cdot \tau \cdot V_d^0 \cdot t_b \cdot c_b = G \cdot c_m (\bar{t}_k - \bar{t}_n) + B_T \cdot \tau \cdot (V_d^0 + m \cdot V_d^0) \cdot t_{cm} \cdot c_{cm} + \Sigma Q$$

де m – величина коефіцієнту повернення;

t_b, c_m – значення температури повернення та суміші продуктів згорання відповідно, $^\circ\text{C}$;

c_b, c_m – значення теплоємності повернення і суміші продуктів згорання відповідно, $\text{кДж/м}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Значення коефіцієнту повернення m може змінюватися в межах від 0 до 1. Він враховує частку від загальної кількості відхідних продуктів згорання, які можуть бути повернені до печі.

Тепер розглянемо рівняння, в лівій частині враховується прихід тепла від продуктів згорання, а права частина являє собою тепло продуктів згорання, що відходять з урахуванням повернення. Після змішування продукти згорання в робочому просторі печі можуть складатися з декількох компонентів: свіжих продуктів згорання, які утворюються при спалювання палива, і потоки газів, що підмішуються вони безпосередньо впливають на температуру суміші продуктів згорання. В рециркуляційній термічній камерній печі основним потоком газу, що підмішується, є відпрацьовані продукти згорання, які направляються в підподову топку з робочого простору печі. Розрахувати температуру багатокомпонентної газової суміші можливо з рівняння теплового балансу:

$$Q_{cm} = Q_c + Q_0, \quad (3.4)$$

де $Q_{см}$, Q_c , Q_o – значення теплової потужності суміші, свіжих і відпрацьованих продуктів згорання, Вт.

Якщо висловлювати теплові потужності через масові витрати M (кг/с), середні значення теплоємності (Дж/кг·°С) та температуру t (°С), отримуємо рівняння в вигляді:

$$t_{см} \cdot M_{см} \cdot c_{см} = t_c \cdot M_c \cdot c_c + t_o \cdot M_o \cdot c_o . \quad (3.5)$$

Оскільки в печі проходить процес рециркуляції, то необхідно розглянути таке поняття як кратність рециркуляції. Кратністю рециркуляції вважають відношення масової витрати потоку, що підмішується, до витрати свіжих продуктів згорання. При нашому даному балансу $U=M_o/M_c$. Розділивши рівність (3.5) на M_c отримуємо вираз для суміші продуктів згорання:

$$t_{см} = \frac{t_c \cdot c_c + t_o \cdot c_o \cdot U}{c_{см} \cdot (1+U)} . \quad (3.6)$$

Тепер можна сформулювати та розглянути схему (рис. 3.1) з додаванням сопла повернення, який встановлено навпроти пальника. Якщо враховувати коефіцієнт повернення то вираз сумарної кількості рециркуляції прийме наступний вигляд:

$$\sum U = \frac{M_o + m \cdot (M_o + M_c)}{M_c} . \quad (3.7)$$

По закінченню перетворення з урахуванням первинної кратності рециркуляції залежної на пряму від геометричних параметрів топки, рівняння сумарної кратності рециркуляцій прийме вигляд:

$$\sum U = U + m \cdot (U + 1) , \quad (3.8)$$

Теплоємність свіжих та відпрацьованих продуктів згорання і повернення при температурах які мають нишу в практиці експлуатації рециркуляційних термічних печей, при достатньому ступені точності можна прийняти рівними один одному. В такому випадку формула розрахунку температури суміші продуктів згорання з урахуванням відпрацьованих газів і повернення буде мати вигляд:

$$t_{\text{см}} = \frac{t_c + t_o \cdot U + t_b \cdot m \cdot (U+1)}{1 + U + m \cdot (U+1)} \quad (3.9)$$

Припустимо, що рівність температур відпрацьованих продуктів згорання і повернення між собою рівні тобто $t_c = t_b$, формула розрахунку температури газової суміші прийме вигляд:

$$t_{\text{см}} = \frac{t_c + t_b \cdot (U + m \cdot (U+1))}{1 + U + m \cdot (U+1)} \quad (3.10)$$

Виходячи з цього рівняння легко простежується вплив величини m на температуру суміші. Данні потрібні для відображення графічної залежності параметрів $t_{\text{см}}$ від m , ці данні розраховані за даним рівнянням для значень $t_o = t_b =$ від 650°C ...до 900°C , $U = 2$ і $m =$ від $0,1$... до 1 , за умови, що значення $t_c = 1200^\circ\text{C}$. Отримані результати зведені та покладені на графік залежності наведений на рис. 3.1.

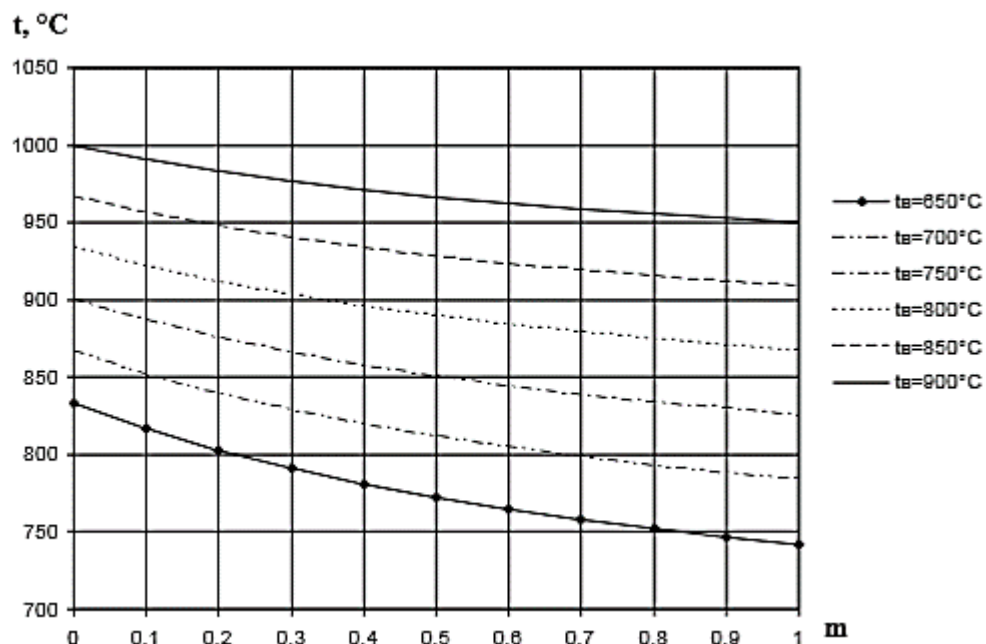


Рис. 3.1 Графік залежності температури суміші від коефіцієнта повернення при різних температурах повернення

З дослідження графіку залежності який наведений вище бачимо, що при збільшенні m температура t_{cm} прагне до величини t_b , іншими словами чим більша температура повернення, тим менше вплив на температуру має зміна параметра m та навпаки, чим менше величина t_b , тим різкіше виражена залежність t_{cm} від коефіцієнта повернення.

3.2 Постановка задачі моделювання системи управління роботою печі при імпульсному опаленні

Процес термічної обробки металу в термічних камерних печах характеризується наявністю перепаду в температурах як за висотою садки, так і за перетином, в свою чергу його поява зумовлюється нерівномірне розподілення теплоти продуктів горіння в робочому просторі печі.

На протязі усього часу періоду нагріву заготовок переважає висока інтенсивність теплообміну між садкою та продуктами горіння, так як піч працює в режимі максимальної потужності і швидкості руху продуктів горіння досить велика. Під час періоду витримки через різке зниження витрати паливно – повітряної суміші сильно порушується рециркуляційний контур, через це садка металу нагрівається повільно та нерівномірно [19].

Щоб вирішити проблему яка проявляється в період витримки металу, застосовують імпульсний спосіб подачі палива, котрий дозволяє при зменшених теплових навантаженнях зберегти максимальні миттєві витрати продуктів горіння, так само як їх швидкості руху в робочому просторі та перемішування.

Якщо розглядати імпульсне опалення з технічної точки зору то воно полягає в коливальній зміні витрати палива (а відповідно, повітря) за певним часовим законом або на підставі сигналів датчиків системи АСУ ТП про досягнення граничних значень деяких величин (тиску, температури і т.д.) [22]. Під час напівперіода подачі палива відбувається підвищення температури

продуктів згоряння, які заповнюють робочу камеру, в напівперіод паузи відбувається нагрів матеріалу за допомогою тепловмісту продуктів згоряння, вони повністю заповнюють простір робочої камери, цей процес супроводжується зниженням їх температури. Для перемикання напівперіодів між собою можна здійснити за рахунок двох варіантів: часової програми або встановлення мінімального і максимального значення температур.

Визначення тривалості імпульсів та пауз при імпульсному способі подачі палива. При постійних значення тривалості пауз $\tau_{пз}$ та імпульсів $\tau_{ім}$ кінцю періоду витримки металу температура поверхневого шару в моменту імпульсу може перевищувати задану, при цьому можливі поверхневі дефекти [17]. Раціональним є змінювати тривалість імпульсів в ході витримки в залежності від теплового потоку на метал при звичайному нагріві, постійної часу, робочої теплової потужності та потужності холостого ходу. Умовно тривалість імпульсу визначається двома складовими:

$$\tau_{ім} = \tau_{ім}^I + \tau_{ім}^{II}, \quad (3.11)$$

де $\tau_{ім}^I$ – значення тривалості подачі палива для нагрівання металу за період паузи, с;

$\tau_{ім}^{II}$ – значення тривалості подачі палива для компенсації втрат піччю за рахунок потужності холостого ходу, с.

$$\tau_{ім}^I = \int_{\tau}^{\tau+\tau_{пз}} q_{поч} \times \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{п.в}}\right) dt / q_{поч}^{II}, \quad (3.12)$$

Виходячи з умов балансу теплоти, яка витрачається за рахунок $M_{хх}$ за період $\tau_{пз}$ і повертається в період імпульсу:

$$\tau_{ім}^{II} = (M_{хх} \times \tau_{пз}) / (M_{роб} - M_{хх}), \quad (3.13)$$

Виходячи із рівнянь (2.28) і (2.29) отримаємо рівняння:

$$\tau_{ім} = \int_{\tau}^{\tau+\tau_{пз}} q_{поч} \times \exp(-\tau/\tau_{п.в}) dt / q_{поч}^{II} + (M_{хх} \times \tau_{пз}) / (M_{роб} - M_{хх}), \quad (3.14)$$

Коли метал знаходиться в процесі витримки припиняється подача палива і температура печі поступово знижується. Весь цей процес проходить за різний проміжок часу в залежності від матеріалу і технології. Рівняння цього процесу має наступний вигляд:

$$t_1 = t_3 \times \exp(-\tau/\tau_{к.в}), \quad (3.15)$$

де t_3 – значення заданої температури витримки печі;

$\tau_{к.в}$ – контрольний час, який визначається положенням початку охолодження печі з моменту виходу на температуру витримки.

$$t_1 = t_3 \times \exp(-\tau/\tau_{к.в}), \quad (3.16)$$

Використавши рівняння (2.32) отримуємо такого виду рівняння:

$$\tau_{пз} = \tau_{к.в}(\ln t_3 - \ln t_1), \quad (3.17)$$

Величина $\tau_{к.в}$ визначається за рахунок тепловою потужністю, постійних часу $M_{роб}$, $M_{хх}$ якщо все це підставити до рівняння (3.17) отримаємо рівняння такого запису:

$$\tau_{пз} = \tau_{пв}[\ln(M_{роб} - M_{хх}) - \ln(M - M_{хх})], \quad (3.18)$$

а якщо в рівняння (3.18) додати вираз тривалості паузи то отримаємо:

$$\tau_{пз} = \tau_{пв}[\ln(M_{роб} - M_{хх}) - \ln(M - M_{хх})] \times (\ln t_3 - \ln t_1), \quad (3.19)$$

Звідси спостерігається, що тривалість паузи $\tau_{пз}$ безпосередньо залежить від допустимої зони відхилення температури відносно заданого значення. Постійну часу $\tau_{пв}$ визначається із рівняння (2.26). Спираючись на приведений розрахунок тривалості пауз та імпульсів при подачі паливної суміші постає

необхідність в моделюванні системи керування, яка б надавала можливість втілити запропонований спосіб опалення термічної камерної печі з керуючим впливом на об'єкт, який би реалізував витримку оптимальних часових інтервалів. При цьому програмна модель, реалізована в системі управління, повинна бути адекватна до реального об'єкту.

4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВІ РОЗГЛНУТИХ СПОСОБІВ ОПАЛЕННЯ

Розглянемо систему автоматичного регулювання – модель САР температури, яка зображена на рисунку 4.1, де регульованим об'єктом є камерна піч, вимірювальним елементом – датчик температури, перетворюючим елементом – реле, а виконавчим органом – мікроконтролер.

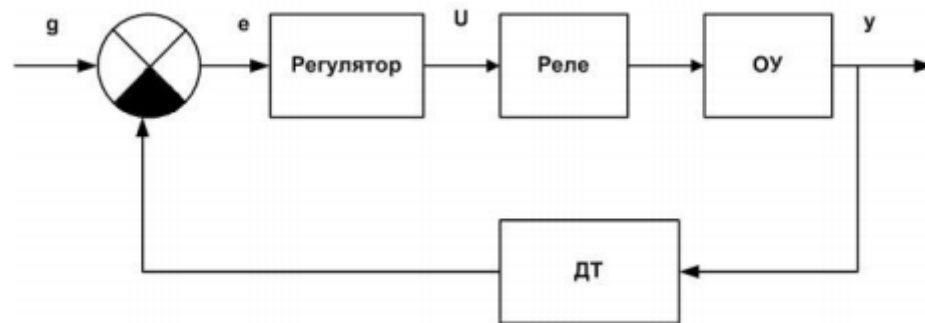


Рисунок 4.1 – Структурна схема САР температури: ОУ – об'єкт управління, ДТ – датчик температури, g – керуючий вплив, e – сигнал неузгодженості, U – вихідна величина регулятора, y – регульована величина.

Принцип роботи такої системи полягає в наступному: аналоговий датчик температури формує напругу, пропорційне температурі об'єкта управління камерної печі, що надходить на вхід мікроконтролера, який програмно перетворює його в градуси Цельсія і здійснює регулювання температури в відповідно до заданого законом регулювання. Для охолодження об'єкта передбачений вентилятор.

Для визначення закону регулювання, необхідного в досліджуваній системі, слід визначити передавальну функцію (ПФ) об'єкта управління. Для отримання перехідної характеристики процесу проведено експеримент, електрична схема якого приведена на малюнку 4.2. У експерименті на мові програмування C++ реалізований нагрів резистора, з інтервалів в 2 секунди за допомогою аналогового датчика ТІ LM335 зафіксовані показники температури протягом 70 секунд, які надходять на монітор послідовного порту комп'ютера, до якого підключена палата контрейлера Arduino UNO, і можуть бути відслідковані в режимі реального часу.

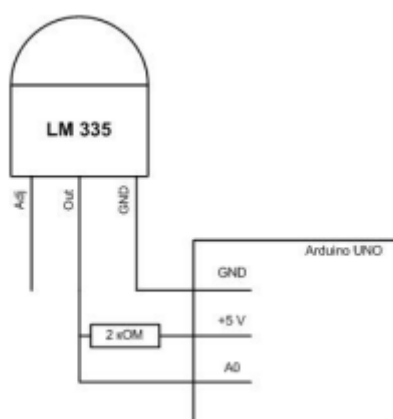


Рисунок 4.2 – Електрична схема експерименту.

На основі знятих показань з датчика температури в математичному пакеті MathCAD побудований графік перехідного процесу, зображений на малюнку 4.3.

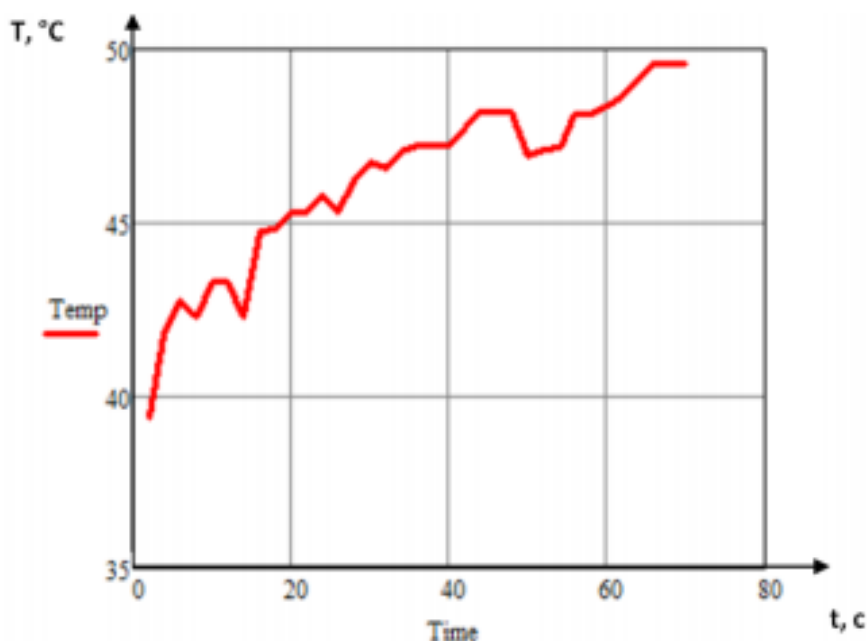


Рисунок 4.3 – Графік експерименту.

На основі графіка можна зробити висновок про те, що перехідний процес відповідає аперіодичній ланці першого порядку, але має перешкоди, тому за допомогою вбудованої функції апроксимації даних був отриманий графік ідеального перехідного процесу (рисунок 4.4), за допомогою якого була визначена передатна функція об'єкта управління. При цьому для того, щоб перехідна характеристика починалася в нулі, задамо початкові умови експерименту: кімнатна температура дорівнює 38 °C.

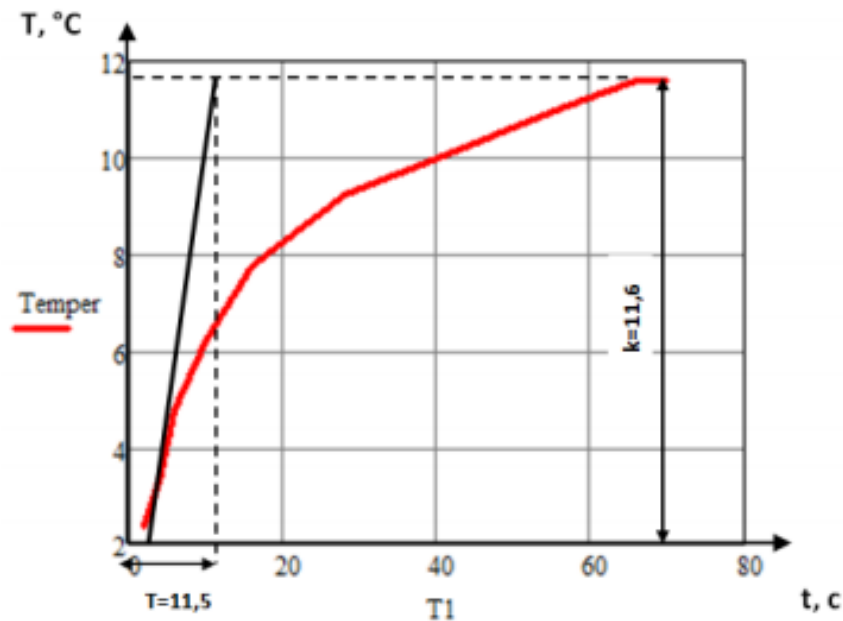


Рисунок 4.4 – Графік переходного процесу експерименту.

Стале значення температури при постійно включеної печі становить 120°C, початок переходного процесу при якому температура досягає 50°C представлена на малюнку 4.4, оскільки не надається можливість вивести параметри ОУ на граничний рівень в силу технічних особливостей установки, то при ідентифікації моделі ОУ необхідно врахувати ці параметри і на їх основі визначити передавальну функцію системи.

Функція аперіодичної ланки першого порядку має наступний вид:

$$W(S) = \frac{k}{T \cdot s + 1}. \quad (4.1)$$

За графіком переходного процесу визначається на основі коефіцієнта посилення k і постійної інтегрування T, характеризує інерційність ланки.

У програмному пакеті MATLAB побудована переходна характеристика системи, на основі якої отримана передавальна функція системи:

$$W(S) = \frac{120}{150 \cdot s + 1}.$$

і перевірена її достовірність (рисунок 4.5).

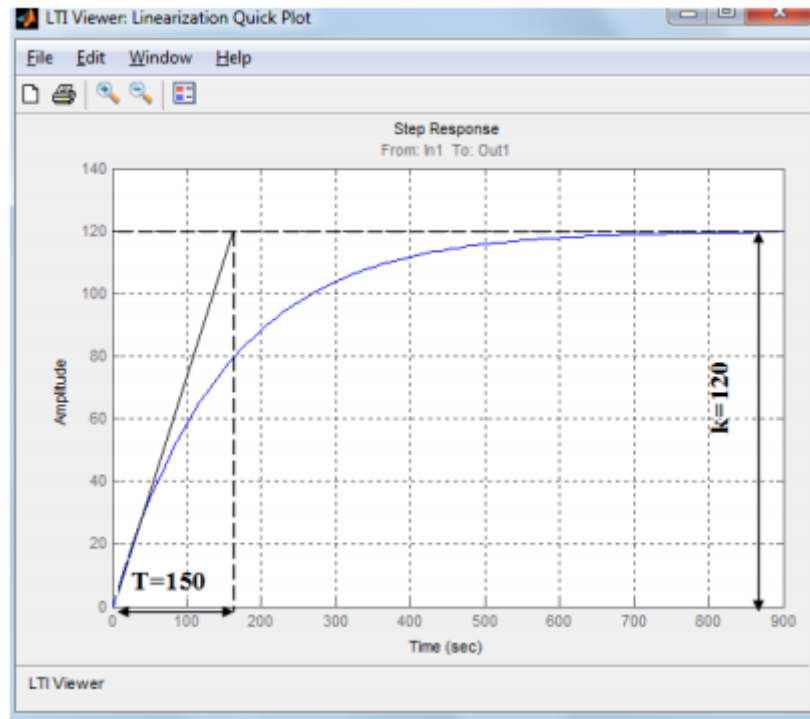


Рисунок 4.5 – Графік перехідного процесу САР температури в програмному пакеті MATLAB.

4.1 Вибір закону регулювання

САР температури доповнена функцією включення, відключення вентилятора й нагрівального елементу, а також реалізована компенсація напруги між всією системою і мікропроцесором за допомогою двохпозиційного регулювання. У досліджуваній системі програмно реалізовані фільтрація вхідного сигналу і ПІ-регулювання для стабілізації вимірних значень. Удосконалена система представлена на рисунку 4.6.

В ході вивчення роботи системи і на основі аналізу характеристик законів регулювання був обраний закон ПІ-регулювання, так як він може забезпечити більшу точність регулювання при великих, але плавних змінах навантаження.

ПІ – регулятор має на тлі ПІІ – закону регулювання істотний недолік – залишкове відхилення регульованого параметра, яке впливає на якість системи в цілому.

І – регулятор має великий час регулювання, що неприпустимо для систем подібного роду.

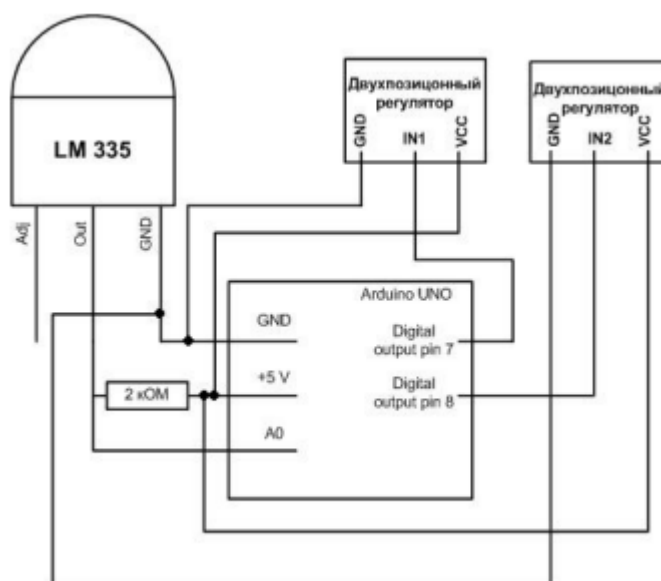


Рисунок 4.6 – Електрична схема САР температури.

4.2 Налаштування ПІ-регулятора

Дана система має один чутливий елемент і здійснює обробку одного вхідного сигналу на регулятор, отже, вона є одноконтурною системою регулювання. У таких системах застосовуються десятки методів параметрів настройки регуляторів. Розрахунок коефіцієнта передачі регулятора k_p , постійної інтегрування $T_{и}$, постійної диференціювання $T_{д}$ є безпосередньо налаштуванням регулятора.

4.2.1 Метод Зиглера-Нікольса

Для налаштування ПІ-регулятора використано кілька методів, одним з яких є метод Зиглера-Нікольса, який ґрунтується на пошуку параметрів відгуку об'єкта на одиничний стрибок, якими є a і L , зображені на рисунку 4.7 [2].

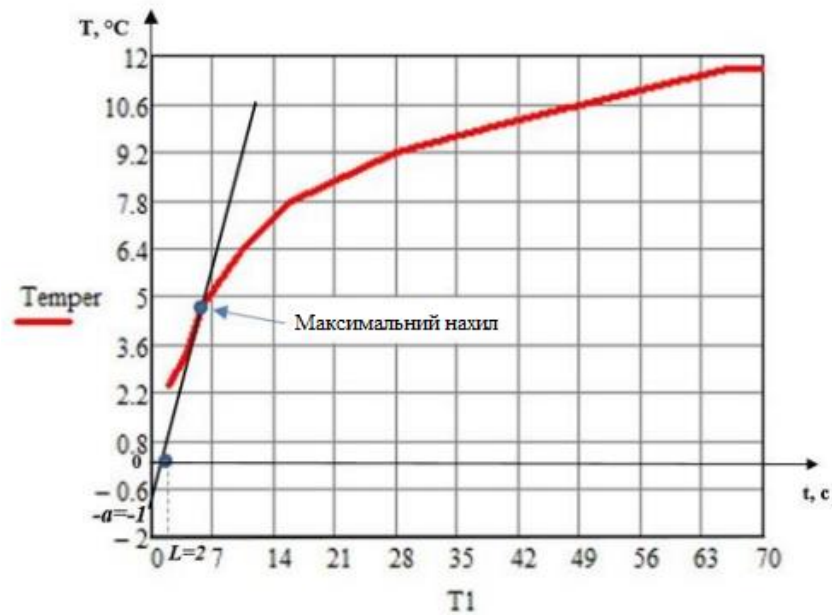


Рисунок 4.7 – Перехідна характеристика об'єкта з параметрами відгуку об'єкта на одиничний стрибок a і L .

На основі цих параметрів розраховуються коефіцієнти різних законів регулювання, формули для розрахунку яких наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Формули для розрахунку коефіцієнтів регулятора методом Зіглера-Нікольса по відгуку на стрибок

Регулятор	k_p	T_u	T_d
П	$1/a$	-	-
ПИ	$0,9/a$	$3L/k_p$	-
ПИД	$1,2/a$	$0,9L/k_p$	$0,5L/k_p$

Розрахунок налаштувань для ПІ-регулятора за методом Зіглера-Нікольса:

$$k_p = \frac{0,9}{a}; \quad (4.2)$$

$$T_u = \frac{3L}{k_p}; \quad (4.3)$$

$$k_p = \frac{0,9}{1} = 0,9;$$

$$T_u = \frac{3 \cdot 2}{0,9} = 6,66.$$

Щоб оцінити якість системи для знайдених параметрів регулювання, в програмному пакеті MATLAB змодельована структурна схема системи (рисунок 4.8), на основі якої отримана перехідна характеристика системи з ПІ-регулюванням (рисунок 4.9), по якій визначені основні показники якості САР температури.

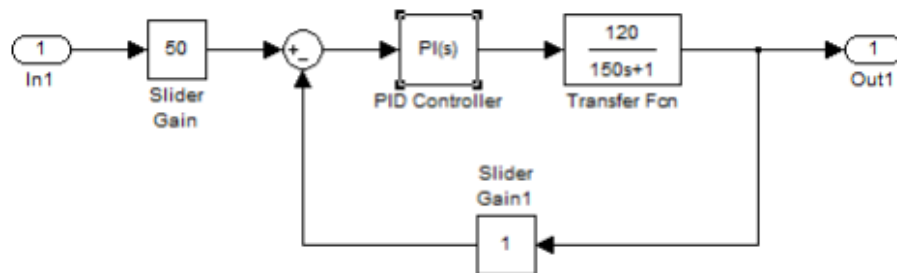


Рисунок 4.8 – Структурна схема САР температури.

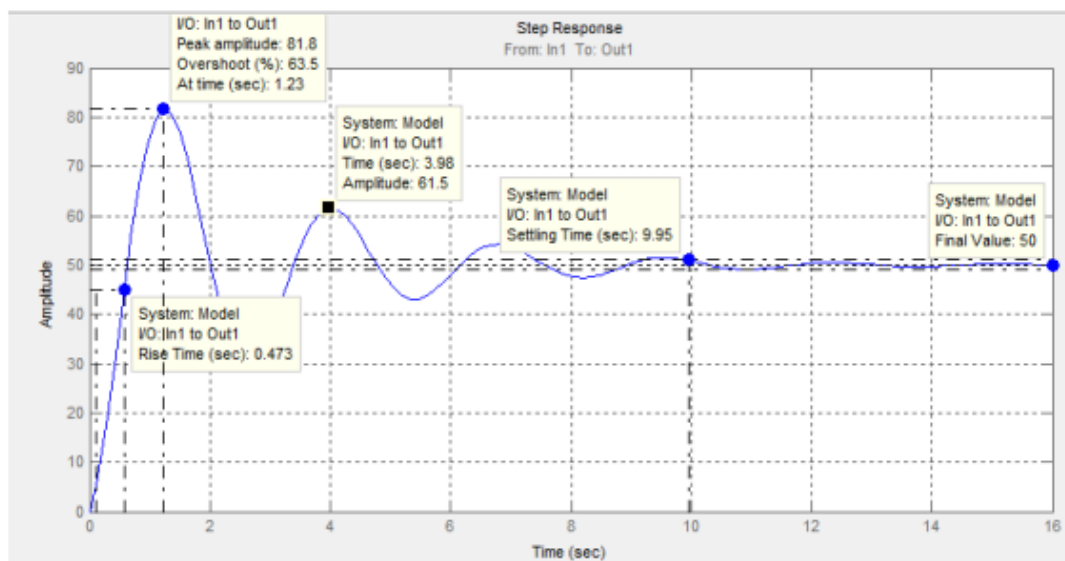


Рисунок 4.9 – Перехідна характеристика системи з налаштуванням коефіцієнтів ПІ-регулятора методом Зіглера-Нікольса.

В ході аналізу перехідної характеристики системи з налаштуванням параметрів ПІ-регулятором методом Зіглера-Нікольса отримані такі показники якості системи на основі графіка перехідного процесу в пакеті MATLAB:

- встановилися відхилення $y_{уст} = 50$ при заданій уставці в 50;

- час регулювання $t_r = 9,95$ с;
- максимальне перерегулювання $\sigma = 63,5\%$;
- число пере регулювань $\delta = 3$;
- максимальне значення регульованої величини $y_{\max} = 81,8$.

Даний аналіз дозволяє зробити висновок про те, що налаштування регулятора, отримані методом Зіглера-Нікольса, впливають на характер перехідного процесу в такий спосіб: коливання в системі мають повільний загасаючий характер, перерегулювання перевищує допустимі норми, що знижує точність системи в цілому, але дані результати виправдані тим, що сам метод ґрунтується тільки на двох параметрах системи.

4.2.2 Метод CHR

Критерієм якості другого досліджуваного методу налаштування регулятора CHR (Chien, Hrones, Reswick) є критерій максимальної швидкості наростання при відсутності перерегулювання або за наявності не більш ніж 20-відсоткового перерегулювання, даний метод дозволяє отримати більший запас стійкості, ніж попередній.

Метод CHR дає дві різні системи параметрів регулятора. Одна з них отримана при спостереженні відгуку на зміну уставки (таблиця 4.2), а друга – при спостереженні відгуку на зовнішні обурення.

Вибір системи параметрів залежить від пріоритетів, які ставить розробник для певного технологічного процесу: якість регулювання при зміні уставки або ослаблення зовнішніх впливів.

Розглянутий метод використовує ті ж параметри a і L , що і метод Зіглер-Нікольса, але має менші коефіцієнти пропорційності в формулах. Оскільки якість регулювання при зміні уставки є більш пріоритетним фактором для досліджуваної системи, то пошук коефіцієнтів настройки регулятора був обмежений першою системою параметрів регулятора за умови 20-відсоткового перерегулювання.

Таблиця 4.2 – Формули для розрахунку коефіцієнтів регулятора методом CHR по відгуку на зміну уставки

Регулятор						
	k_p	$T_{и}$	T_d	k_p	$T_{и}$	T_d
П	$0,3/a$	-	-	$0,7/a$	-	-
ПИ	$0,35/a$	$1,2L/k_p$	-	$0,6/a$	L/k_p	-
ПИД	$0,6/a$	L/k_p	$0,5L/k_p$	$0,95/k_p$	$1,4L/k_p$	$0,47L/k_p$

Розрахунок налаштувань для ПІ-регулятора за методом CHR:

$$k_p = \frac{0,6}{a}; \quad (4.4)$$

$$T_u = \frac{L}{k_p}; \quad (4.5)$$

$$k_p = \frac{0,6}{1} = 0,6;$$

$$T_u = \frac{2}{0,6} = 3,33.$$

В ході аналізу перехідної характеристики системи з налаштуванням параметрів ПІ-регулятором методом CHR отримані наступні показники якості системи на основі графіка перехідного процесу в пакеті MATLAB:

- встановилися відхилення $y_{уст} = 50$ при заданій уставці в 50;
- час регулювання $t_n = 15,7$ с;
- максимальне перерегулювання $\sigma = 65$ %;
- число пере регулювань $\delta = 3$;
- максимальне значення регульованої величини $y_{max} = 82,5$.

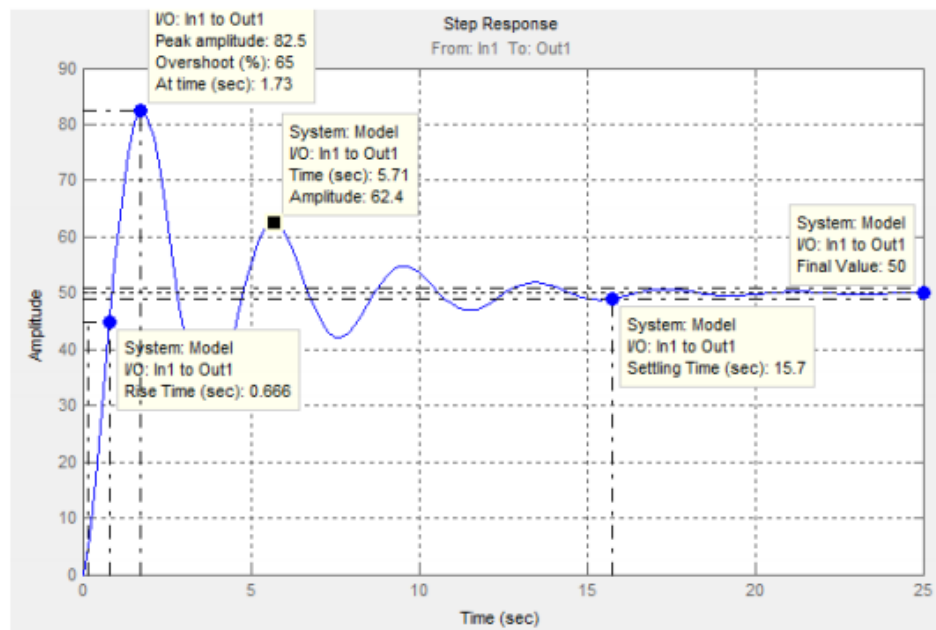


Рисунок 4.10 – Перехідна характеристика системи з налаштуванням коефіцієнтів ПІ-регулятора методом CHR.

Даний аналіз дозволяє зробити висновок про те, що налаштування регулятора, отримані методом CHR, впливають на характер перехідного процесу в такий спосіб: коливання в системі, як і в попередньому методі, мають повільний загасаючий характер, перерегулювання також перевищує допустимі норми, час регулювання збільшилася, що знижує не тільки точність системи, але і її якість.

4.2.3 Метод ручного підстроювання

Слід зазначити, що розрахунок коефіцієнтів настройки регулятора не дав очікувані результатів, оскільки якість регульованої системи не відповідає встановленим вимогам. Так як розглянуті методи ґрунтуються на спрощених моделях об'єкта, самі моделі використовують параметри, ідентифіковані з деякою погрішністю, отже, після розрахунку знайдених параметрів необхідно здійснити їх підстроювання на основі правил, використовуваних при ручного налаштування:

- збільшення пропорційного коефіцієнта збільшує швидкодія і знижує запас стійкості;

- зі зменшенням інтегральною складовою помилка регулювання з плином часу зменшується швидше;
- зменшення постійної інтегрування зменшує запас стійкості;
- збільшення диференціальної складової збільшує запас стійкості і швидкодія.

Застосування цих правил, можливо, тільки при попередній настройці регулятора за формулами, знайдені коефіцієнти справедливі тільки в межах оптимальної настройки регулятора.

Дотримуючись вище наведених правил, регулятор після підстроювання має наступні параметри: $k_p = 3,5$, $T_n = 1,5$ і перехідну характеристику, зображену на рисунку 4.11.

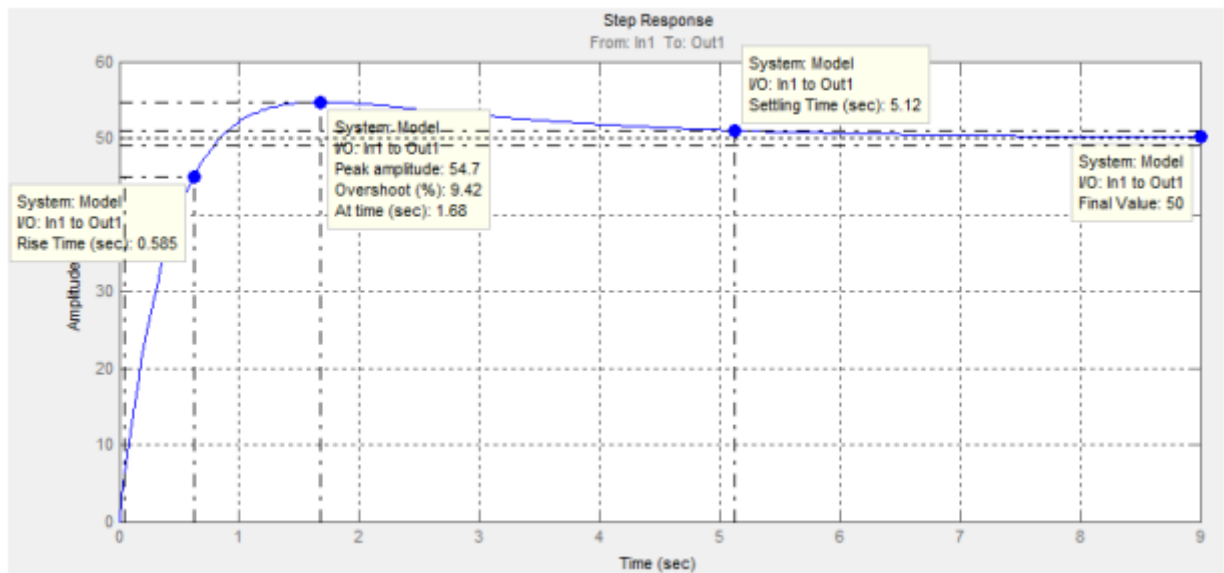


Рисунок 4.11 – Перехідна характеристика системи після ручного підстроювання ПІ-регулятора.

Система має такими показниками якості:

- встановилися відхилення $y_{уст} = 50$ при заданій уставці в 50;
- час регулювання $t_n = 5,12$ с;
- максимальне перерегулювання $\sigma = 9,42\%$;
- коливальність в системі відсутній;
- максимальне значення регульованої величини $y_{max} = 54,7$.

4.3 Забезпечення коректної роботи реле і фільтрація сигналу

З метою забезпечення коректної роботи реле-печі і реле-вентилятора застосована широтно-імпульсна модуляція, яка забезпечує кодування аналогового вхідного сигналу за рахунок зміни його тривалості (ширини) прямокутних імпульсів несучої частоти, що дозволяє здійснювати перемикання між мінімальним і максимальним значеннями.

Широтно-імпульсна модуляція формується на основі двох сигналів – модулюючого, в даній роботі який формується на основі показань, прийшли з датчика температури, і допоміжного, має пилкоподібну форму сигналу. Амплітуда пилообразного сигналу обрано таким чином, щоб вона відповідала діапазону зміни керуючого сигналу ПІ-регулятора, який лежить в межах від – 255 до 255. Вибір частоти визначено в ході експерименту на основі наступних принципів:

- період допоміжного сигналу не може мати мінімальне значення, оскільки це вплине на частоту перемикання реле, що може привести до зносу контактів і швидкого виходу з ладу;

- велике значення періоду не дозволить забезпечити коректне перемикання реле в рамках технологічного процесу.

Сигнал моделює напругу, в даному випадку максимальна напруга становить 5В, а мінімальне 0В, що визначається технічними характеристиками мікроконтролера. В процесі модуляції змінюється ширина імпульсу, тобто тривалість часу включення, відключення пристрою, в даному експерименті - реле, що відповідає за роботу нагрівального елемента і вентилятора. На основі загальної структурної схеми для систем з використанням модуляторів такого роду, зображеного на рисунку 4.13, в пакеті MATLAB побудована модель САР із застосуванням широтно-імпульсної модуляції і одночасно з ПІ-регулюванням.

Програмна реалізація на мікроконтролері представлена в Додаток А.

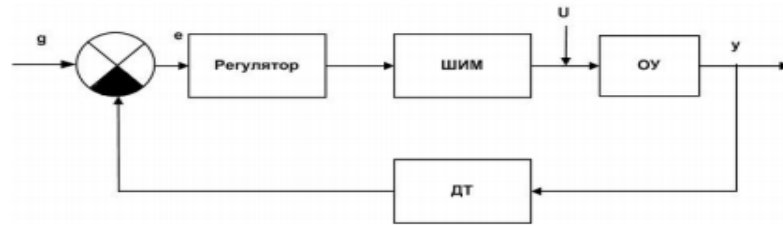


Рисунок 4.12 – Типова структурна схема САР із застосуванням широтно-імпульсної модуляції і ПІ-регулюванням.

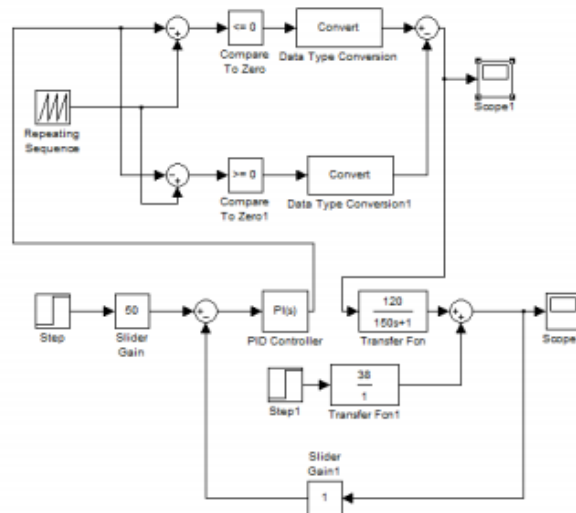


Рисунок 4.13 – Структурна схема САР із застосуванням широтно-імпульсної модуляції і ПІ-регулюванням, складеної в пакеті MATLAB.

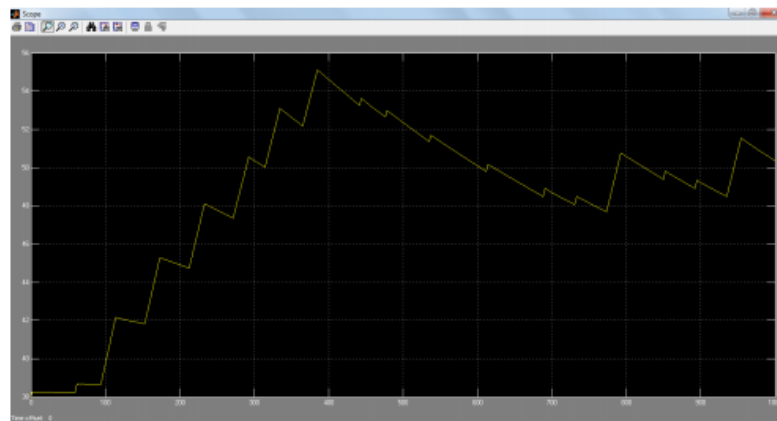


Рисунок 4.14 – Перехідна характеристика процесу із застосуванням широтно-імпульсної модуляції і ПІ-регулюванням.

За характером отриманого графіка перехідного процесу (рисунок 4.14) можна зробити висновок про те, що отримані настройки для регулятора, а також перемикавання реле, здійснювані на основі ШІМ, і забезпечують необхідний принцип роботи досліджуваної системи. При регулюванні такого

роду температура досягає максимального значення рівного 55°C і коливається в районі заданого значення, маючи відхилення в $(2-4)^{\circ}\text{C}$.

4.4 Первинна обробка сигналу

Оскільки отримані результати характерні для ідеалізованої системи, а її сигнал, знятий в ході експерименту, має імпульсні перешкоди, що представляють собою порівняно короткий і потужний сплеск заважає напруги в каналі, а час дії імпульсної перешкоди виявляється досить малим, то існує необхідність в фільтрації вхідного сигналу.

Для первинної обробки вимірних значень застосована фільтрація, забезпечує виділення корисного сигналу з отриманої інформації з перешкодою. Найбільш поширеними є фільтри низьких частот, куди входить фільтр експоненціального згладжування, в основі якого лежить розрахунок експоненційних ковзаючих середніх згладжуваного ряду, членами якого є вимірні значення. Основним гідністю такого роду згладжування є здатність адаптуватися до нового рівня процесу без значного реагування на випадкові відхилення.

Процедура простого експоненціального згладжування здійснюється за такими формулами:

$$S_t = a \cdot X_{t-1} + (1-a) \cdot S_{t-1}; \quad (4.6)$$

де S_t – значення експоненціального середнього в момент t ;

X_{t-1} – фізичне спостереження в момент $t-1$;

α -параметр згладжування, $\alpha = \text{const}$, $\in (0; 1)$.

Чим менше α , тим більшою мірою пригнічуються коливання вихідного ряду, але при дуже малих значеннях α може статися викривлення корисного сигналу. У прикладному пакеті MathCAD написана програма для експоненціального згладжування, за допомогою якої експериментально було

5 ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

З метою забезпечення високої якості регулювання системи, а також візуалізації перехідного процесу даної системи використана SCADA система, що дозволяє здійснити процес збору інформації в режимі реального часу з віддалених об'єктів для їх управління та аналізу отриманих даних.

Сучасні SCADA системи включають до свого складу три основні компонента, структура яких зображена на рисунку 5.1, і виконують наступні функції:

1) Віддалений термінал здійснює обробку завдання в режимі реального часу.

2) Диспетчерський пункт здійснює обробку даних і управління високого рівня в режимі реального часу; забезпечення інтерфейсу між людиною-оператором і системою.

3) Комунікаційна система необхідна для передачі даних з віддалених об'єктів, терміналів на центральний інтерфейс оператора диспетчера і передачі сигналів управління на диспетчерський пункт.



Рисунок 5.1 – Основні структурні компоненти SCADA системи.

Віддаленим терміналом в досліджуваній системі є мікроконтролер Arduino UNO, який здійснює обробку завдання по засобам написаної програми на мові програмування C ++, комунікаційною системою, що здійснює обмін даними між віддаленим терміналом і диспетчерським пунктом, є Modbus Universal MasterOPC сервер, який використовує для роботи найбільш поширений протокол обміну в промисловості Modbus. [8] Комп'ютер, що виконує функції диспетчерського пункту, оснащений пакетом програм

MasterSCADA, який побудований на клієнт-серверній архітектурі з можливістю функціонування в локальних і глобальних мережах. Прийом і передача у даному пакеті відбувається на основі стандартів OPC, таких як HTML, OLE, ODBC, COM / DCOM, ActiveX і інші.

Істотною перевагою обраного SCADA-пакета є його забезпечення всіх необхідних можливостей для стикування із зовнішніми програмами і системами, а також надання користувачам його безкоштовної ліцензійної версії в розмірі 32-точок виконання на офіційному сайті inSAT, що є достатнім для роботи з досліджуваною системою.

5.1 Встановлення зв'язку між мікроконтролером і SCADA-системою

Оскільки основним завданням використання SCADA пакету в даній роботі є регулювання температури в камерній печі, то розробляється програма має здійснювати настройку коефіцієнтів для ПІ-закону регулювання; корекцію уставки температури; відображення стану відключення і включення реле-печі і реле-вентилятора; відображення вхідних значень температури, вихідного сигналу з ПІ-регулюванням і ШІМ-модуляцією в вигляді трендів.

Для забезпечення поставлених завдань і встановлення зв'язку між платою Arduino і MasterSCADA в розробляється код і в MasterOPC сервері, що представляє собою комунікаційний стандарт, підтримує взаємодію між польовими пристроями, контролерами і додатками пакета Master, виділені наступні змінні, які представлені в таблиці 3. Встановлено зв'язок з портом, до якого підключений мікроконтролер, швидкість опитування рівна 115200, оскільки реєстрація показань на платі відбувається з такою ж частотою, час відповіді і період опитування, рівні 500 мс, таким чином, завершена настройка OPC сервера.

З метою перевірки працездатності написаної програми (Додаток А), код завантажений в мікроконтролер, конфігурація для досліджуваної системи запущена, а в пакеті MasterOPC можна спостерігати процес обміну даними між датчиком температури і OPC сервер через мікропроцесорну плату на основі зміни прийнятих значень і якості передачі. (Рисунок 5.2)

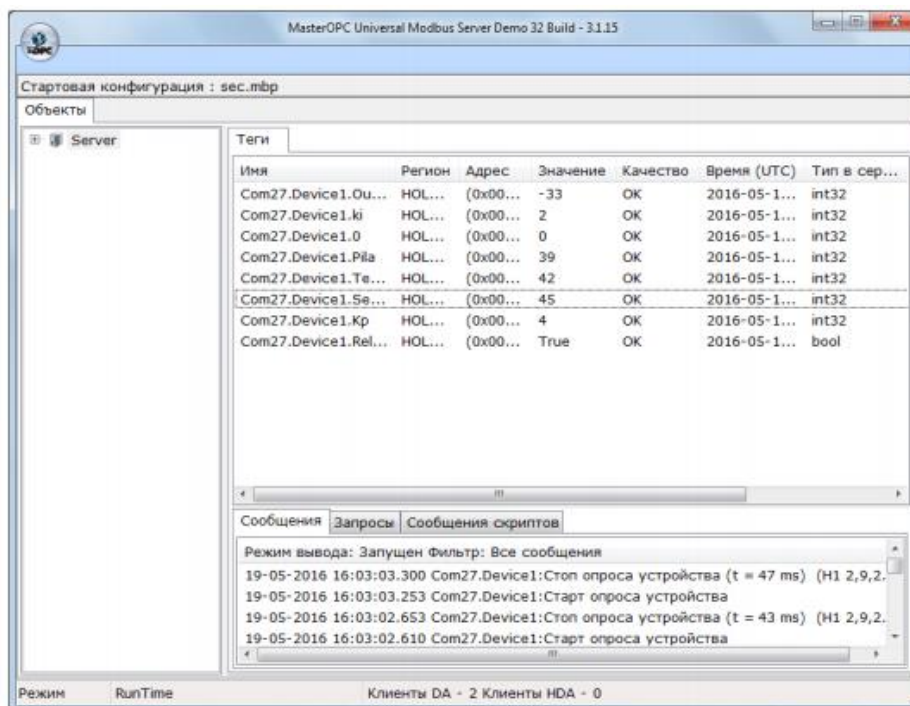


Рисунок 5.2 – Процес обміну даними між мікроконтролером і OPC сервером за коштами програми MasterOPC.

5.2 Відображення технологічного процесу в режимі реального часу

Оскільки на виробництві безпека управління через SCADA-системи здійснюється за рахунок видалення оператора від пульта технологічного процесу, розмежуванням прав доступу, шифруванням, секретністю протоколів зв'язку, а також застосуванням між мережевих протоколів, то невід'ємною завданням для розробника таких систем залишається детальна візуалізація технологічного процесу, яка допоможе оператору коректно керувати системою.

Основними засобами візуалізації в SCADA-пакетах є тренди, графічні індикатори, задатчики і відображення значення какихлибo величин, а також кнопки, що дозволяють переміщатися між об'єктами мнемосхем. За допомогою тренда, який в режимі реального часу дозволяє відстежити зміну значень температури, визуализирован ШИМ-сигнал, процес зміни перехідного процесу в залежності від зміни коефіцієнтів регулятора, уставки, які задаються оператором, а також стан працездатності печі і вентилятора.

На основі конфігураційного файлу, який зв'язує OPC сервер і мікропроцесорну плату Arduino UNO, в пакеті MasterSCADA вставлені змінні в розроблений проект, які містяться в таблиці 4.1, і з допомогою елементів палітри, описаних вище, розроблений проект, виконують функції регулювання і візуалізацію технологічного процесу, представлений на малюнку 5.3.

Таблиця 5.1 – Перелік змінних, що відповідають за подання інформації в пакеті SCADA

Назва змінної	Регістр контролера	Тип	Тип доступу	Призначення
Temperature	HOLDING_REGISTERS[4]	Real	ReadOnly	Зберігання показань з датчика температури
Pila	HOLDING_REGISTERS[3]	Double (float)	ReadOnly	Формування ШІМ-сигнала
ki	HOLDING_REGISTERS[1]	Double (float)	ReadOnly	Коефіцієнт постійного інтегрування
Output	HOLDING_REGISTERS[2]	Double (float)	ReadOnly	Сигнал ПІ-регулювання
Setpoint	HOLDING_REGISTERS[5]	Double (float)	WriteOnly	Уставка температури
kp	HOLDING_REGISTERS[6]	Double (float)	WriteOnly	Коефіцієнта передачі регулятора
Relay3State	HOLDING_REGISTERS[7]	Bool (boolean)	ReadOnly	Стан реле-печі

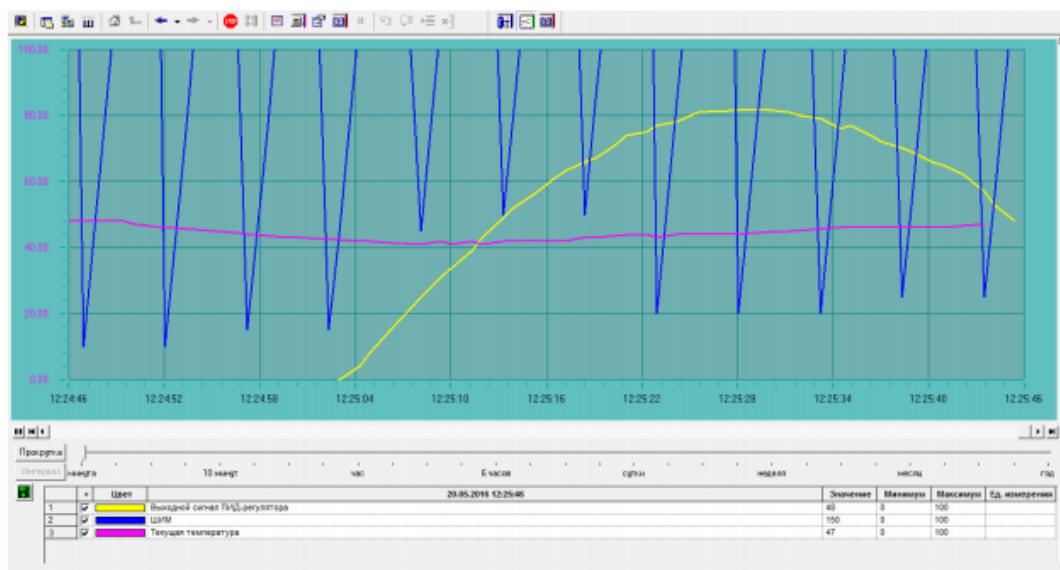


Рисунок 5.2 – Тренд сигналу ПІ-регулятора, ШІМ-сигналу і поточного значення температури САР температури в камерній печі.

5.3 Інтерфейс SCADA-системи САР температури

З метою комфортного дистанційного керування системою створено дружній інтерфейс САР температури. На мнемосхемі об'єкта управління (рисунок 5.3) містяться три задатчика: уставки, коефіцієнта передачі регулятора, коефіцієнта постійної інтегрування; відображається стан включення реле-печі у вигляді індикатора стану; представлено поточне значення температури, вихідного сигналу з ПІД-регулятора, ШІМ-сигналу; кнопка, що забезпечує перехід до тренду, зображеному на рисунку 5.2.

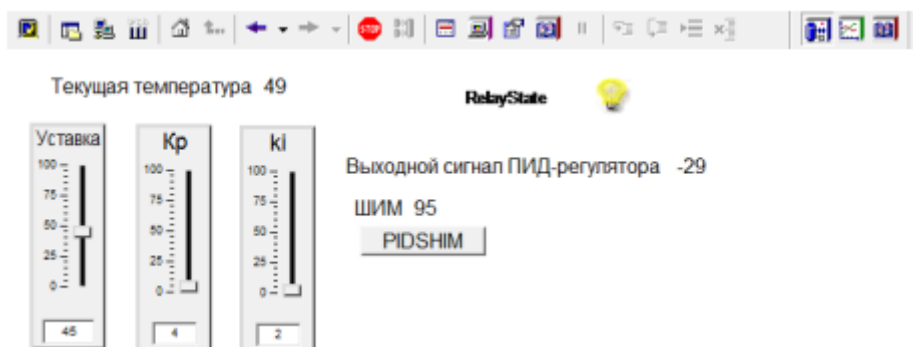


Рисунок 5.3 – Мнемосхема об'єкта управління САР температури.

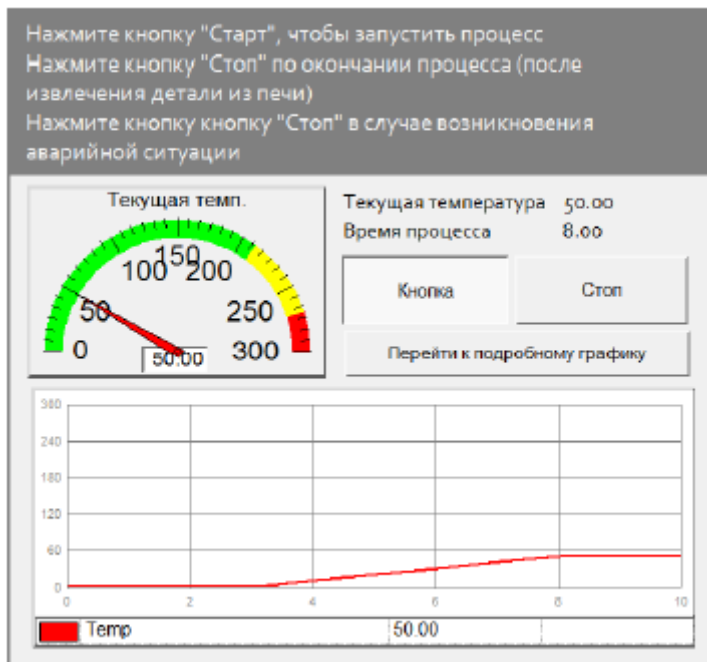


Рисунок 5.4 – Мнемосхема об'єкта «Управління процесом».

Оскільки розглянута система регулювання призначена для впровадження на виробництві, то для її використання необхідно розробити елементи управління SCADA системою, такі як друк мнемосхеми, зупинка системи, зміна оператора, виклик журналу подій з обмеженими правами доступу.

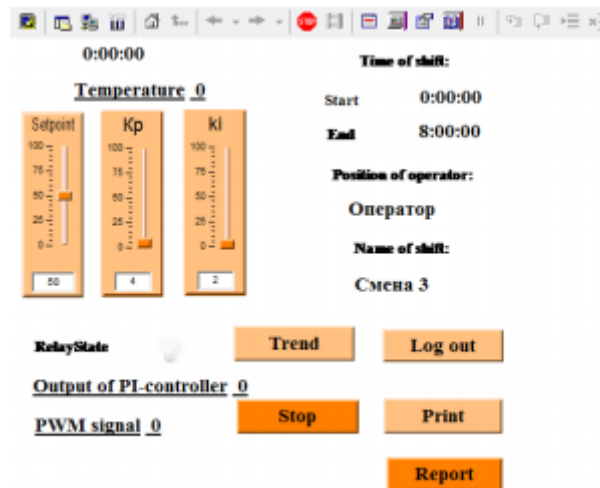


Рисунок 5.5 – Мнемосхема для управління САР температури на виробництві.

На мнемосхемі, представленій на малюнку 5.5 додані кнопки зміни оператора, зупинки системи, друку мнемосхеми, відкриття журналу подій, доступ до якого має тільки диспетчер зміни, щоб відстежувати дії кожного оператора. Також на мнемосхемі відображені поточний час, час початку і кінця зміни, її номер і посаду оператора.

Висновки: в даному розділі була розроблена SCADA система для автоматичного регулювання температури в печі, яка включає функції дистанційного керування системою на базі мікроконтролера Arduino UNO на основі розрахованих показників ПІ-закону регулювання, а також представляє наочну візуалізацію технологічного процесу оператору системи. Досліджувана система може стати недорогою прикладної моделлю, яка виконує основні функції і дозволяє провести аналіз основних характеристик технологічного процесу та налаштування необхідних параметрів системи без значних витрат і зусиль.

6 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

6.1 Техніко – економічне обґрунтування удосконалених засобів опалення

З точки зору економічної оцінки розроблена система АСУ ТП термообробки металу в камерних печах повинна визначити її якість, доцільність та корисність для підприємства. Варіант який проектується, обирався лише на підставі достатньо обґрунтованих розрахунків, що покажуть найбільш ефективне використання матеріальних, трудових і фінансових ресурсів.

Сучасність потребує впровадження АСУ ТП, ці вдосконалення дозволять змінити собівартість продукції в результаті скорочення витрат палива на 3.37%, за рахунок зниження кількості браку на 0.02%

Після проведення аналізу, розрахуємо зміну собівартості тони продукції за формулою:

$$\Delta C_Q = \frac{Q_6 - Q_{пл}}{Q_6}, \quad (6.1)$$

де ΔC_Q – значення зміни обсягу виробництва, грн / т;

$Q_6 = 120\,586$ – значення базового обсягу виробництва, т (2018);

$Q_{пл}$ – значення планового обсягу виробництва, т.

$$Q_{пл} = Q_6 \times 0,002 + Q_6 \times 0,337 + Q_6 = 120235 \times 0,002 + 120235 \times 0,337 + 120235 = 160994,7$$

Тепер давайте вставимо значення до формули:

$$\Delta C_Q = \frac{120235 - 160994,7}{120235} = 0,33 \text{ грн/т}$$

Зведенні дання стосовно розрахунку суми капітальних вкладень наведено в таблиці 6.1 нижче.

Таблиця 6.1 Сума капітальних вкладень

Найменування	Кількість, шт	Ціна, грн	Сума, грн
Ежектор	5	2532,00	12660,00
Персональна ЕОМ	2	7000,00	14000,00
МФУ	1	1500,00	1500,00
Кабельна продукція	-	7100,00	7100,00
Програмне забезпечення		15800,00	15800,00
Загальна сума капіталовкладень			51060,00

При впровадженні даної модернізації збільшуються амортизаційні відрахування за рахунок вартості основних фондів на загальну суму капіталовкладень, грн:

$$\Delta KB = KP \times H_{га} / Q_{п}, \quad (6.2)$$

де KP – значення загальної суми капіталовкладень, грн;

$H_{га}$ – річна норма амортизації;

$Q_{п}$ – значення річного обсягу виробництва;

Вносимо значення до формули (6.2) отримуємо:

$$\Delta KB = 51060 \times 0,25 / 120235 = 0,10.$$

Значення сумарної зміни планових витрат по переділу, грн.:

$$\Delta ПР_{\Sigma} = \Delta C_T - \Delta KB \quad (6.3)$$

Знесемо значення до формули (6.3) отримаємо:

$$\Delta ПР_{\Sigma} = 0,33 - 0,10 = 0,23$$

Для розрахунку економічного ефекту, грн/рік, використовуємо формулу:

$$\epsilon = \Delta C_T \times Q_{пл} - E_H \times KB, \quad (6.4)$$

де $Q_{пл}$ – значення річного обсягу виробництва за планом, $Q_{пл} = 120235т$;

E_H – нормативний коефіцієнт порівняльної ефективності нової техніки

$$E_H = 0,19.$$

Давайте підставимо дані значення до формули (6.4):

$$\epsilon = 0,33 \times 120235 - 0,19 \times 51060 = 29\,976,15 \text{ грн/рік.}$$

Економічна ефективність капітальних вкладень складе, грн/рік і розраховується за формулою:

$$E = \epsilon / KB \quad (6.5)$$

Підставимо значення до формули:

$$E = 29\,976,15 / 51060 = 0,59$$

Не менш важливим поняттям є термін окупності проекту, рік:

$$T = КП / E \quad (6.7)$$

Підставим значення для розрахунку до формули:

$$T = 51\,060 / 29\,976,15 = 1,7.$$

Для розрахунку рентабельності підприємства, % скористаємося формулою:

$$P_p = \frac{\Pi_p}{ОФ+ОС} \times 100\% , \quad (6.7)$$

де Π_p – значення розрахункового прибутку, грн;

(ОФ+ОС) – середньорічна вартість виробничих фондів, грн.

Занесемо значення до формули (6.7) і розрахуємо:

$$P_p = 2244874,46 / 124196,38 \times 100\% = 18,07.$$

Виходячи з результатів розрахунку можна зробити висновки про доцільність проведення заходів з впровадження вдосконаленого методу опалення ході термообробки металу в камерних печах. При розмірі капітальних вкладень у 51 060 грн. економічна ефективність буде становити 0,59 грн. на рік на кожен вкладену гривню. Що стосується до терміну окупності даного проекту 1,7 року. Значення рентабельності виробництва складе 18,07%. Зводимо техніко – економічні показники до таблиці 6.2.

Таблиця 6.2

Техніко – економічні показники проекту впровадження імпульсно реверсивного способу опалення на камерних печах кувалального цеху ТОВ «ЗЛМЗ».

Показник	Базовий варіант	Проектний варіант
Річний обсяг виробництва, тонн	120 235	161 114,9
Капітальні вкладення	-	51 060
Річний економічний ефект, грн	-	29 976,15
Економічна ефективність, грн/рік	-	0,59
Чисельність ремонтних робітників КВП і А, чол	4	4

Продовження таблиці 6.2

Середньомісячна заробітна плата ремотних робітників, грн.	4 942,2	6 782,3
Чисельність чергових робочих КВП і А, чол.	5	5
Середньомісячна заробітна плата чергових робітників, грн.	4 231,2	5 148,5
Термін окупності, рік	-	1,7
Рентабельність, %	-	18,07

6.2 Ефективність та рекомендації до застосування за результатами проведених розробок

В науковій роботі проведено детальний аналіз існуючих напрямків в сфері термічної обробки та енергозбереження в термічних печах. На основі опрацьованих результатів пропонується новий вдосконалений спосіб нагріву печі імпульсно – реверсивний, цей би метод дозволив зменшити перепад температурного поля в термічній печі тим самим зменшити відсоток отримання мало якісної продукції. Запропонований метод за рахунок використання відпрацьованих продуктів згорання в робочий простір це дозволить зменшити витрати корисного тепла, підвищити коефіцієнт використання палива та мінімізувати викиди шкідливих речовин до атмосфери.

Багаторазові дослідження на основі комплексної методики розрахунку для імпульсно – реверсивного методу опалення. В свою чергу даний метод дозволяє:

- визначити тривалість імпульсів та пауз під час роботи печі в періоді витримки в залежності від кратності рециркуляції продуктів згорання в робочому просторі печі;
- детально визначити кінцеву тривалість витримки та витрату палива на один цикл термообробки за налаштуванням різних параметрів імпульсно – реверсивного опалення.

На основі наведеного способу опалення було розроблено прогножуючу систему управління, яка адекватно відображає процеси, які відбуваються в робочій камері печі під час термообробки металу.

Що стосується основних рекомендацій на рахунок керованого теплообміну за рахунок внутрішньої рециркуляції продуктів згорання. Застосували удосконалену технологію імпульсного опалення це дає нам можливість керувати тривалістю імпульсу та пауз в залежності від характеристик садки металу, змінювати напрямки циркуляції продуктів згорання, забезпечивши зменшення перепаду температур за перетином садки.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

7.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника кувального цеху.

У відділенні по виробництву поковки і нагріву заготовок із сталі Кувальний згідно «Реєстру ідентифікації небезпек і ризиків», на людський організм можливий вплив небезпечних і шкідливих факторів. .

До фізичних небезпечних виробничих факторів в кувальному виробництві відносяться:

- рухомі (оберткові) частини машин і механізмів;
- відлітаючи окалини при обробці деталей на кувальному молоті;
- обладнання, матеріали, що переміщуються за допомогою вантажно-підйомних механізмів (кранів);
- автотранспортні засоби;
- пар і гаряча рідина;
- вантажопідйомні та транспортні механізми з гідравлічним і електричним приводами;
- електричні і електрозварювальні прилади;
- газонебезпечні місця (термічне відділення);
- вибухонебезпечне приміщення (зарядна станція акумуляторів);
- пожежонебезпечні приміщення (склад масел);
- ураження електричним струмом (380,220,24,10) В;

До фізичних шкідливих виробничих факторів відносять:

- підвищену запиленість повітря;
- підвищені температуру і вологість повітря робочої зони;
- знижену рухливість повітря;
- підвищений рівень інфрачервоної радіації;
- підвищений рівень шуму, інфразвукові коливання, ультразвук і вібрації;
- підвищений рівень електричних, магнітних і електромагнітних випромінювань;

- недостатню освітленість робочої зони, підвищену яскравість світла і знижену контрастність;

Хімічні виробничі фактори.

Виділення шкідливих речовин в повітря (токсичного пилу, газів) відбувається при проведенні технологічних процесів нагріву металу і проведенні робіт, пов'язаних з послідуною його обробкою (мастило, технічне масло і ін.). При нагріві металу найбільш можливе проникнення в організм речовин у вигляді пари і пилу через органи дихання (близько 95% всіх отруєнь).

Найбільш характерними психофізіологічними факторами для кувалального виробництва є висока швидкість технологічних процесів та інтенсивність вантажопотоків, яка обумовлює в свою чергу високу інтенсивність роботи персоналу. Це призводить до сильного розумового стомлення, яке пов'язане з помилками в управлінні механізмами, і виникнення небезпечних ситуацій, тобто переважають нервово-психічні перевантаження.

Розглянемо найбільш важливі виробничі фактори кувалального виробництва.

Пил є найбільш поширеним несприятливим фактором виробничого середовища. У металургійному виробництві переважає пил, який містить оксиди заліза, кремнію, марганцю, фтористі з'єднання і ін. Наприклад, При спалюванні 1 м³ природного газу утворюється 0,21 г NO, 0.21 г NO₂; Виділення токсичних газів від нагрівальних печей у молотових і пресових прольотах досягають 3–7 г CO при спалюванні 1 кг природного газу і 2,2–5,2 г SO₂.

При роботі молотів в результаті роздавлювання поверхневого пласту окалини на металі утворюється металевий пил.

Мікроклімат в кувалальних цехах визначається наявністю надмірного конвекційного і променистого тепла, в зв'язку з чим, вони відносяться до груп гарячих цехів. Джерелами тепла є метал з яким працюють, нагріті обладнання, механізми та комунікації, відкриті отвори або кришки нагрівальних пристроїв, горючі гази. Нагрітий метал є основним джерелом тепла. Промениста енергія на відстані 1 м від місця обробки становить до 45 кал / см² за хвилину.

На робочих місцях температура повітря в літній період досягає 30-45⁰С. Висока температура повітря спостерігається також на постах управління операторів, в кабінах кранівників, які працюють в головному прольоті стану. Кількісні характеристики інтенсивності випромінювання в кувальних цехах наведені в таблиці - 1.1.

Метеорологічні умови в кувальних цехах характеризуються також наявністю ділянок з високою і низькою вологістю повітря, що негативно впливає на самопочуття і здоров'я людини.

У кувальних цехах до шумонебезпечного обладнання належать кувальні молоти та преси, ножиці для різання металу, і ін.

Ковальсько-пресові цехи характеризуються значними виділеннями теплоти, що передається випромінюванням і конвекцією. Інтенсивність теплового потоку від нагрівальних печей, пресів і молотів складає 1,4– 2,1 кВт/м², у місцях складування заготовок, пультів управління і кабін крановиків – 1–1,95 кВт/м², у місць складування виробів після кування – 0,5– 1 кВт/м²; на робочих місцях при нагріві металу на високочастотних установках – 0,24–0,3 кВт/м², виділення теплоти від електропечей – до 2,2 МДж год на 1 кВт потужності печі.

Таблиця - 1.1 – Оцінка чинників виробничого і трудового процесу ковалів у цеху.

№	Чинники виробничого середовища і трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	III клас: шкідливі і небезпечні умови	Тривалість дії чинників за зміну %

				I ступінь	II ступінь	III ступінь	IV ступінь
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м ³ 1 клас небезпеки 2 клас небезпеки <u>NO, NO₂</u> 3-4 класи небезпеки <u>CO, SO₂</u>	0,1-1мг/м ³ 1-10мг/м ³	0.21 3-7;2.2-5,2				
2	Пил, переважно фіброгенної дії, мг/м ³	200	265				80
3	Вібрація (загальна і локальна), дБ	92	100-110				80
4	Шум, дБА	80	100				80
5	Інфразвук, дБ	100	105				
6	Ультразвук, кГц	20	17				
7	Неіонізуючі випромінювання: -діапазон промислової частоти, кв/м -оптичний діапазон (лазерне випромінювання), кВт/м ²	0,26 15,2	0,18–3,5 9-45				80
8	Мікроклімат в приміщенні: - температура повітря, °С - швидкість руху повітря, м/с -відносна вологість повітря % - інфрачервоне випромінювання, Вт/м ²	16-27 0,3 70 140 140	30-45 0,6 90 100 80				60
9*	Категорія важкості і напруженість праці	напружена					
10	Загальна оцінка умов праці	Середньої важкості 3					

Ковальсько-пресові цехи характеризуються підвищеним шумом і вібраціями. Амплітуда коливань шабота молота досягає 7–8 мм, фундаменту молота – 0,56–0,08 мм, жорсткого фундаменту молота – до 1,2 мм. Час дії вібрацій на коваля дорівнює 7,5–10 періодам коливань фундаменту. Загальний час дії вібрацій залежить від числа ударів, що наносяться в зміну. Число ударів пневматичних молотів в хвилину складає 95– 210, безшаботних молотів – 6– 10. Штампувальні молоти завдають 3000– 5500 ударів в зміну. Коефіцієнт використання числа ударів в хвилину знаходиться в межах 0,25–0,75.

Між двома послідовними ударами цього молота можуть бути принаймні п'ять ударів сусідніх молотів. Молот звичайної конструкції з відношенням мас, що співударяються, рівним 25, встановлений на дубову подушку, має власну частоту коливань 14–17 Гц. Тривалість безпосередньо удару знаходиться в інтервалі 0,0008–0,01 с.

Ультразвук має головним чином локальну дію на організм, оскільки передається безпосередньо при контакті з ультразвуковим інструментом, обробляємими деталями або середовищами, в яких збуджуються ультразвукові коливання. Ультразвук, що генерується низькочастотних промисловим обладнанням, впливають на організм людини.

Інфразвук виникає за рахунок тих же процесів що і шум чутних частот. Кувальні молоти створюють умови для генерації інфразвуку. Інфразвук при куванні металу має періодичний характер.

Максимальні рівні низькочастотних акустичних коливань від промислових джерел в кувальному цеху досягають 100-110 дБ.

В умовах кувального виробництва спостерігається місцева (локальна) і загальна вібрації. Кувальні молоти та преси(система механізмів) при своїй роботі створюють загальну вібрацію, яка полягає у відхиленні робочих місць від положення рівноваги на малу величину. при виробництві окремих видів робіт по обробці металу працівники відчувають локальну вібрацію, що передається на руки та ноги працюючого. Надмірна вібрація високих рівнів на організм людини призводить до розвитку передчасного стомлення, зниження продуктивності праці, зростанню захворюваності та нерідко до виникнення професійної патології - вібраційної хвороби.

У кувальному виробництві застосовують велику кількість різноманітного електрообладнання, який надає небезпечний вплив на працівників (електричні поля промислової частоти і електромагнітні поля високої частоти). Джерелом електричних полів промислової частоти є струмопровідні частини діючих електроустановок (лінії електропередач, індуктори, конденсатори термічних установок, фідерні лінії, генератори, трансформатори, електромагніти, соленоїди, імпульсні установки, литі і металокерамічні магніти та ін.). Тривалу дію електричного поля на організм

людини може викликати порушення функціонального стану нервової та серцево-судинної системи. Це виражається в підвищеній втомлюваності, зниження якості виконання робочих операцій, болях в області серця, зміні кров'яного тиску і пульсу.

7.2 Заходи з поліпшення умов праці.

Велике значення поліпшення умов праці пояснюється тим, що вони в основному являють собою виробничу середу, в якій протікає життєдіяльність людини під час праці. Від їх стану в прямій залежності знаходиться рівень працездатності людини, результати її роботи, стан здоров'я, ставлення до праці. Поліпшення умов праці істотно впливає на підвищення її продуктивності. Тому для мінімізації впливу на людину під час її трудової діяльності шкідливих факторів необхідно впроваджувати заходи з поліпшення умов праці.

Для виключення дії шкідливого шуму та вібрацій на організм людини, приміщення обслуговуючого персоналу відділені від цеху цегельною стіною товщиною 15см. Усі побутові та допоміжні приміщення і механічні майстерні також відділені від цеху. Для обмеження і усунення шкідливої дії вібрації безпосередньо в цеху необхідний ретельний догляд за обладнанням, своєчасна заміна рухомих частин, що зношуються, застосування вібропоглинаючих прокладок, використання різних типів глушників, раціональне чергування періодів відпочинку і роботи при впливі вібрації.

Для захисту персоналу від ураження електричним струмом у мережах трифазного струму застосовується обладнання в захисному виконанні. Усі струмоведучі частини та дроти ізольовані. Також застосовується захисне блокування, тобто відключення електричних кіл при аварійних ситуаціях з повним часом спрацьовування 0,2 секунди.

Для зменшення впливу надлишкового виділення тепла застосовується вентиляція. Ізольовані від цеху приміщення обслуговуючого персоналу обладнані побутовими кондиціонерами.

Освітленість на робочому місці повинна відповідати характеру зорової роботи. Збільшення освітленості робочої поверхні покращує видимість об'єктів за рахунок підвищення їх яскравості, збільшує швидкість розрізнення деталей, що позначається на зростає продуктивності праці, тому необхідно покращувати якісні характеристики освітлення. Необхідно забезпечити достатньо рівномірний розподіл яскравості на робочій поверхні, а також в межах навколишнього простору. На робочій поверхні не повинні бути присутніми різкі тіні. Необхідно також вибирати правильний спектральний склад світла, тобто зі спектральної характеристикою близькою до сонячної.

Для захисту працівників від впливу електромагнітних полів проводяться такі заходи: нормування параметрів електромагнітних впливів, періодичний контроль опромінювання, раціональне розміщення джерел і приймачів випромінювання (територіальний рознос), обмеження часу перебування в ЕМП, попереджувальні написи і знаки[27].

Також одним з видів покращення умов праці є забезпечення працівників, зайнятих на роботах зі шкідливими або небезпечними умовами праці спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту.

Окрім цього в цеху впроваджено ряд організаційних заходів, направлених на профілактику аварійних ситуацій. До таких заходів відносять чіткий розподіл обов'язків між обслуговуючим персоналом, закріплення обслуговування окремих одиниць обладнання за конкретними працівниками, розробку посадових інструкцій для усіх категорій працівників та періодичну перевірку знань персоналу.

Особливу увагу слід приділяти раціональному режиму праці та відпочинку. Персонал повинен виконувати вимоги з техніки безпеки, описані в спеціальних інструкціях. Особливу увагу слід приділяти раціональному режиму праці та відпочинку. Персонал повинен виконувати вимоги з техніки безпеки, описані в спеціальних інструкціях.

7.3 Виробнича санітарія.

Санітарні правила встановлюють гігієнічні вимоги до показників мікроклімату робочих місць виробничих приміщень з урахуванням інтенсивності енерговитрат працюючих, часу виконання роботи, періодів року. Показники мікроклімату повинні забезпечувати збереження теплового балансу людини з навколишнім середовищем і підтримка оптимального допустимого теплового стану організму. Показниками, що характеризують мікроклімат у виробничих приміщеннях, є:

- температура повітря;
- відносна вологість повітря;
- швидкість руху повітря;
- інтенсивність теплового випромінювання.

Оптимальні показники мікроклімату поширюються на всю робочу зону, допустимі показники встановлюються, диференційовано для постійних і непостійних робочих місць.

Оптимальних величин показників мікроклімату необхідно дотримуватися на робочих місцях виробничих приміщень, на яких виконуються роботи операторського типу, пов'язані з нервово-емоційним напруженням.

Допустимі мікрокліматичні умови встановлені за критеріями допустимого теплового і функціонального стану людини на період 8 годинної робочої зміни. Вони не викликають пошкоджень або порушень стану здоров'я, але можуть призводити до виникнення загальних і, локальних відчуттів дискомфорту, напруги механізмів терморегуляції, погіршення самопочуття, зниження працездатності. Допустимі величини показників мікроклімату встановлюються в тих випадках, коли за технологічними вимогами, технічно і економічно обґрунтованим причин не можуть бути забезпечені оптимальні величини.

У приміщеннях пультів управління технологічними процесами, обчислювальної техніки та інших обслуговуючих приміщеннях при виконанні робіт операторського типу, пов'язаних з нервово-емоційним напруженням повинні підтримуватися оптимальні значення температури повітря (22-24°C), його відносної вологості (40-60%) і швидкості руху (не більше 0,1 м/с).

Безпосередньо в цеху неможливо забезпечити оптимальні умови праці, тому необхідно передбачати заходи щодо захисту працюючих від перегрівання, охолодження та інших шкідливих чинників.

Для захисту працівників від перегрівання, охолодження, надлишкової вологості повітря необхідно застосовувати прецизійну систему кондиціонування. Система кондиціонування виконує функції охолодження, опалення, зволоження та осушення. Така система може бути обладнана пароочисником, що дозволяє підтримувати заданий рівень вологості повітря, пристрій може використовуватись для осушення повітря.

У приміщенні цеху повинна використовуватися як природна, так і штучна вентиляція. Приміщення повинне бути обладнано механічною загально обмінною припливно-витяжною вентиляцією. Припливною вентиляцією повітря подається в робочу зону, а витяжною вентиляцією видаляється з верхньої зони приміщення.

Правильне освітлення робочих місць кувальних цехів має велике значення для створення безпечних умов роботи: незадовільне освітлення негативно впливає на зір працівників, може стати причиною травматизму. Рівномірний розподіл яскравості в умовах кувального виробництва не досягається. Внаслідок виникнення великої кількості пилу спостерігається погіршення видимості і зменшується огляд. Надмірна сліпуча яскравість металевих деталей порушує умови комфортного зору, погіршує контрастну чутливість.

7.4 Електробезпека.

Приміщення кувального цеху виробництва поковки відноситься до класу з підвищеною небезпекою ураження струмом (підвищена температура, струмопровідна підлога). Джерелом живлення печей є однофазна мережа змінного струму напругою 220В з частотою 50 Гц. Джерелом живлення двигунів є трифазна мережа змінного струму напругою 380В з частотою 50 Гц.

Факторами небезпечного і шкідливого впливу на людину, пов'язаними з використанням електричної енергії, є протікання електричного струму через організм людини, вплив електричної дуги, вплив біологічно активного електричного поля, вплив біологічно активного магнітного поля, вплив електростатичного поля, вплив електромагнітного випромінювання (ЕМВ).

Для забезпечення електробезпеки необхідно:

- утримувати електроустановки в працездатному стані, експлуатувати їх відповідно до вимог нормативно - технічних документів;
- своєчасно проводити технічне обслуговування, ремонт, випробування, модернізацію та реконструкцію електроустановок та електрообладнання;
- проводити інструктажі з безпеки праці, пожежної безпеки;
- проводити навчання та перевірку знань електротехнічного персоналу та електротехнологічного персоналу;
- перевіряти надійність роботи і безпеку експлуатації електроустановок;
- дотримуватись вимог охорони праці електротехнічним та електротехнологічним персоналом;
- здійснювати облік, аналіз і розслідування порушень в роботі електроустановок, нещасних випадків, пов'язаних з експлуатацією електроустановок, і вживання заходів щодо усунення причин їх виникнення;
- подавати повідомлення до органів Держенергонагляду про аварії, смертельні, важких і групові нещасні випадки, пов'язані з експлуатацією електроустановок;
- розробити посадові та виробничі інструкції з охорони праці для електротехнічного персоналу;
- забезпечити укомплектування електроустановок захисними засобами, засобами пожежогасіння та інструментом;
- здійснювати облік, раціональне витрачання електричної енергії та проведення заходів з енергозбереження;
- проводити необхідні випробування електрообладнання, експлуатацію вимірювальних приладів і засобів обліку електричної енергії

7.5 Пожежна безпека. Техногенна безпека.

Згідно СНіП[28] П-М.2-72ковальський цех відноситься до категорії «Г», тобто це виробництво присутні (зберігаються, переробляються, транспортуються) негорючі речовини або матеріали в гарячому, розпеченому або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор і / або полум'я.

При проведенні робіт в ковальсько-пресових цехах існує небезпека виникнення пожеж через скупчення масла у приймачах під пресами. Температура самозаймання нафтових масел 250–400°C, мазуту – 380–420°C. Пожежі можуть виникнути в підвальних приміщеннях, на складах горючих матеріалів, або матеріалів в горючій упаковці, стелажних складах, закритих електромашинних приміщеннях і т. д. Пожежа може виникнути також при обробці легкозаймистих металів, наприклад поковок з магнію і його сплавів. Магнієвий пил, що осів на металоконструкціях, схильний до самозаймання. При пуску газових нагрівальних печей внаслідок неправильного запалення, при раптовій зупинці дуття, просочуванні газу у виробниче приміщення, а також при підсосі повітря всередину газових пристроїв може статися вибух.

Таким чином, аналіз шкідливих і небезпечних факторів дозволяє зробити висновок, що умови праці в кувальному цеху характеризуються наявністю шкідливих виробничих чинників, які призводять до зростання захворюваності з втратою працездатності та проявом початкових ознак професійної патології.

Для гасіння пожеж на початкових стадіях застосовуються вуглекислотні вогнегасники, перевагою яких є висока ефективність гасіння пожежі, схоронність електронного устаткування. Діелектричні властивості вуглекислого газу, що дозволяє використовувати ці вогнегасники навіть у тому випадку, коли не вдається знеструмити електроустановку відразу.

Необхідними заходами для запобігання пожежі є своєчасний ремонт електроприладів, якісне виправлення поломок, виключення використання несправних електроприладів, протипожежний інструктаж, на якому

працівники ознайомлюються з правилами протипожежної безпеки та використання первинних засобів пожежогасіння.

Особливу увагу приділяють евакуації людей з приміщення. Евакуація проводиться по заздалегідь спланованих шляхах.

7.6 Засоби індивідуального захисту.

Для зменшення дії шкідливих і небезпечних виробничих чинників, а також для захисту від забруднення необхідно використовувати засоби індивідуального захисту.

Виробничий шум шкідливо впливає на здоров'я працюючих, сприяючи травматизму і знижуючи продуктивність праці. Крім того, робота в умовах підвищеного шуму протягом всього робочого дня викликає стомлення слуху, а при тривалому впливі шуму, що перевищує допустимі норми, спостерігаються випадки втрати слуху. Тому для захисту органів слуху використовують зовнішні та внутрішні протишуми. Як зовнішні протишуми використовуються захисні навушники, які покривають вушну раковину, як внутрішні – заглушки, які вставляють в зовнішній слуховий прохід.

Для захисту органів дихання застосовуються фільтруючі та ізолюючі засоби. В якості фільтруючих приладів застосовують респіратори («Пелюсток», Астра-2).

Спецодяг відноситься до числа широко застосовуваних засобів індивідуального захисту. Призначенням спецодягу є запобігання тіла робітників від несприятливого впливу механічних і фізичних факторів зовнішнього середовища. У цеху виробництва поковки для захисту від впливу високої температури, від опіків необхідно використовувати одяг з щільної важкозаймистої тканини з гладкою поверхнею. Така тканина повинна погано проводити тепло. Щоб уберегти тіло від перегрівання, вона повинна повільно поглинати променисте тепло та легко віддавати його в зовнішнє середовище.

Спецодяг може давати загальний і місцевий захист. Загальний захист досягається носінням костюмів, комбінезонів, халатів, плащів. Місцевий захист створюється фартухами, рукавицями, нарукавниками, гетрами, наколінниками.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі вирішено важливу науково – технічну задачу підвищення ефективності використання енергетичних та матеріальних ресурсів при термообробці металу в термічних камерних печах, що досягається завдяки впровадженню удосконаленого імпульсно-реверсивного способу опалення, та поліпшенню теплового балансу. Аналіз науково-технічної літератури показав, що найбільш перспективними напрямками підвищення ефективності роботи камерних печей періодичної дії є нові методи та пристрої, що спрямовані на організацію управління температурним полем робочого простору печі за рахунок циркуляції продуктів згорання. Було розроблено конструкторські рішення і технологію імпульсно-реверсивної подачі енергоносія з використанням ежектора та математичну модель процесу термічної обробки металу при вищезгаданому удосконаленому способі опалення термічною камерною печі. Також було розроблено методику розрахунку тривалості імпульсів та пауз в подачі паливно-повітряної суміш під час витримки металу в залежності від маси садки, теплового потоку на метал при звичайному нагріві, виду споживаного палива, робочої потужності та потужності холостого ходу печі. На основі цієї методики розроблено прогноуючу систему управління термічною камерною піччю, що реалізує запропонований спосіб опалення., за допомогою якої виконано експериментальні дослідження параметрів роботи камерної печі. Проведено чисельні розрахунки тривалості імпульсів та пауз при різних значеннях коефіцієнта рециркуляції. Практичним шляхом доведено, що застосування оптимального значення кратності рециркуляції - 0,3 у комбінації з імпульсною подачею енергоносія дає можливість скоротити тривалість витримки з 16 до 12 годин, а витрату палива за цикл – з 12 810 м³ до 7 749 м³.

Також проведено дослідження впливу інтегрального показника роботи печі – коефіцієнта корисної дії на загальну тривалість імпульсної подачі палива під час періоду витримки. Встановлено, що зі збільшенням ККД зменшується тривалість подачі енергоносія в період витримки. Було сформульовано основні рекомендації щодо організації керованого

теплообміну за рахунок внутрішньої рециркуляції продуктів згорання. А саме, застосування удосконаленої технології імпульсного опалення дає можливість керувати тривалістю імпульсу та пауз в залежності від характеристик садіння металу, змінювати напрямок циркуляції продуктів згорання, що забезпечить зменшення перепаду температур за перетином садіння. Попередні розрахунки за 2018 рік показали, що економічна ефективність при розмірі капітальних вкладень 51 060 гривень становить 0,45 гривень на кожен вкладений гривню. Термін окупності капіталовкладень на впровадження даного проекту становить 1,7 роки, а рентабельність виробництва складе 18,07%

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ:

1. Пилипенко Р. А. Інтенсифікація теплової роботи камерних печей, опалювальних природним газом / Металургійна теплотехніка (СБ науч. ТрудівНМетАУ). - Дніпропетровськ: НМетАУ, 2002. - Т.8. - С.99-105.
2. Губинський В. І. Нагрівальні печі металургії - сьогодні і завтра / / Теорія і практика металургії. - 2004 рік. - № 6. - С.56-60.
3. Губинський В. І. Актуальні завдання реконструкції нагрівальних печей / Металургійна теплотехніка (СБ научн. Трудів НМетАУ). - У двох книгах. - Книга перша. -Дніпропетровськ: НМетАУ, 2005. - С. 149-156.
4. Ревун М.П., Зінченко В.Ю. Перспективні напрямки вдосконалення теплової роботи нагрівальних і термічних камерних печей / Металургійна теплотехніка (СБ науч. Трудів НМетАУ). - Дніпропетровськ: НМетАУ, 2006. - Т.6. - С.294-302.
5. Пуговкін А.У. Рециркуляційні полум'яні печі. Розрахунок і конструювання. - Л: Машинобудування, 1975 .. - 200 с.
6. А.С. № 1133457 (СРСР). Крігул'ській І.К, Губинський В.І., Якименко ГС. та ін Спосіб опалення промислових печей. - 1985 рік. - Бюлетень № 1.
7. Рижков В.Г. Дослідження і розробка технічних засобів підготовки теплоносія, що забезпечують зниження теплових і газоподібних викидів: Автореферат дис. канд. техн. наук. - Запоріжжя: ЗП 1994 року. - 20 с.
8. Губинский В.И. Металлургические печи: Учеб. пособие. - Днепропетровск: НМетАУ, 2006. – 85 с.
9. Пат. 2086 Україна МПК F27D1/00. Футерівка печі / Шулаєв В. М., Поляков Ф.М.; заявник і патентовласник Шулаєв В. М., Поляков Ф.М. - № 2003010728; заявл. 28.01.2003; опубл. 15.10 2003, Бюл № 10, 2003 р.
10. Киселёва Т.С., Киселев М.Н., Котлицкая Ю.И. Підвищення ефективності роботи печей. - <http://www.niiterm.com>, сайт компанії «УкрНИИЭлектротерм».
11. Пат. 3359 Україна МПК С21D9/00. Спосіб опалювання методичної нагрівальної печі / Сокурєнко А.В., Шеремет В.О. Теряєв О.М. Гончаров М.В.

Остапенко А.Л., Романенко В.І. Курочкін О.Ф.; заявник і патентовласник Криворізький державно-гірничий комбінат «Криворіжсталь» - № 2004010652; заявл. 29.01.2004; опубл. 15.11.2004, Бюл. №11, 2004р.

12. Пат. 21358 Україна МПК F23C99/00. Спосіб опалювання низькотемпературних газових камерних печей /Ревун М.П., Зінченко В.Ю., Лютий О.П., Андрієнко О.М., Петрик О.В.; заявник і патентовласник Запорізька державна інженерна академія - №u200609683; заявл. 08.09.2006; опубл. 15.03.2007, Бюл. № 3, 2007 р.

13. Аналіз напрямів енергозберігання в нагрівальних і термічних камерних печах / Краснокутська І.Н., Рижков В.Г. // Металургія: Збірник наукових праць ЗДІА. – Запоріжжя, 2009. – № 19. – С. 139 - 144.

14. А.У. Пуговкин Рециркуляционные пламенные печи. Расчет и конструирование. Л., «Машиностроение» (Ленинградское отделение), 1975, с. 183-184.

15. Пат. 16114 Україна МПК F23C99/00. Спосіб опалювання камерних газових печей /Ревун М.П., Зінченко В.Ю., Лютий О.П., Кравченко В.Р., Андрієнко О.М.; заявник і патентовласник Запорізька державна інженерна академія - №u 200602088; заявл. 27.02.2006; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7, 2006р.

16. Рижков Г. М. Удосконалення термічних камерних / Рижков Г. М., Черняков В. А., Рижков В. Г. – Москва, Ин-т «Черметінформація», 1988. – 20с.

17. Ревун М.П., Гранковський В.І., Байбуз А.Н. Інтенсифікація роботи нагрівальних печей. – К.: Техніка, 1987. -137с.

18. Качан Ю. Г., Степкин В. В., Спекторова Ю. Б. О проблеме энергоэффективности нагревательных газовых печей //Вісник Східноукраїнського університету ім. Володимира Даля. – 2011. – № 11. – с. 31–34.

19. Інтенсифікація конвективної тепловіддачі в термічних рециркуляційних печах при реверсивній подачі повернення / Яковлева І.Г., Мних І.Н., Баріщенко О.М. // Металургія: Збірник наукових праць ЗДІА. – Запоріжжя, 2009. – № 19. – С. 171 - 175.

20. А.С. № 1171642 (СРСР). Рижков Г.М., Ченцов О.О., Пилипенко І.О. Рециркуляційна топка. - 1985 рік. - Бюлетень № 29.
21. Дослідження можливості посилення променистого теплообміну при імпульсному опаленні високотемпературних теплотехнічних агрегатів. /А.Б. Бирюков, В.В. Кравцов // Наукові праці ДонНТУ. Металургія. - Донецьк, 2011. - № 13.
22. Пат. 68022 Україна МПК F23B 3/02. Камерна термічна піч/Яковлева І.Г., Мних І.М., Баріщенко О.М.; заявник і патентовласник Запорізька державна інженерна академія - №и 201110574; заявл. 01.09.2012; опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5, 2012 р.
23. Нові схеми імпульсного опалення нагрівальних та термічних печей / М.П. ревул, О.М. Баріщенко, О.І. Чепрасов [та ін.] // Металургійна та гірнорудна промисловість. – 2005, №3. – С.97-100.
24. Порівнювальні випробування імпульсного та непереривного опалення термічної печі / Неймарк Л.А., Гречишніков Я.М., Енно І.К. [та ін.] // Ковальсько – штампувальне виробництво. – 1987, №9. – С35-37.
25. Нагрів валків холодної прокатки та роликів МНЛЗ під термічну обробку в печі з імпульсною подачею теплоносія / Мороз В.І., Єгорова В.І., Гусев С.В. // Ковальсько – штампувальне виробництво та обробка металів тиском. – 2002, №8. – С. 29-34.
26. ДСН 3.3.6.039-99 Держані санітарні норми виробничої загальної та локальної безпеки.
27. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
28. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату промислових приміщень.
29. ГОСТ 1 2.4.1 23-83 ССБТ. Засоби захисту від інфрачервоного випромінювання. Загальні технічні вимоги.
30. Правила улаштування електроустановок - М.: Енергія - 1987.
31. Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони № 4617-88.
32. СНіПШ-92-79. Промисловий пил. Загальні вимоги.

33. Вентиляція та кондиціонування повітря. СН 245-71.
34. Бринза В.П., Зиньковський М.М. Охорона праці в чорній металургії.
-М: Металургія. - 1982. -336 с.
35. ДБН В.2.5.-28-2006 Природне та штучне освітлення.
36. СНіП 2.01.-02-85. Протипожежні норми.

ДОДАТОК А