

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
Факультет автоматизації виробництва та цифрових технологій  
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»  
Гарант ОПП

Богдан ЦИМБАЛ

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання  
освітньо-професійної програми  
«Комп'ютерне конструювання мехатронних систем»  
за спеціальністю 131 Прикладна механіка

**на тему «Удосконалення методу візуального контролю стану  
внутрішніх стінок зміювика холодильника для металургійного  
виробництва»**

Керівник роботи

Богдан ЦИМБАЛ

Консультант від  
бази практики

Євген ПАНФІЛОВ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень та напрацювань.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне  
джерело. Електронний та паперовий варіанти роботи є ідентичними*

Здобувач

Андрій КАРПЕНКО

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Олег БОНДАР

Запоріжжя 2026



ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
Факультет автоматизації виробництва та цифрових технологій  
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем  
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр  
Спеціальність 131 Прикладна механіка  
ОПП Комп'ютерне конструювання мехатронних систем

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Гарант ОПП

\_\_\_\_\_ (підпис)

Богдан ЦИМБАЛ  
(прізвище та ініціали)

«03» жовтня 2025 р.

## **ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Карпенка Андрія Юрійовича  
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи (проєкту) Удосконалення методу візуального контролю стану внутрішніх стінок змійовика холодильника для металургійного виробництва  
керівник роботи (проєкту) Цимбал Богдан Михайлович, доктор наук з державного управління, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від 10.09.2025 №239/10.09.2025р.

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 19.01.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з обраної тематики, літературні джерела, технологічні інструкції, дані ТОВ «ЗЛМЗ» м. Запоріжжя, результати власних експериментів та досліджень тощо

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз технічного завдання та сучасних методів контролю стану теплообмінних елементів. 2. Огляд конструкції та умов експлуатації змійовика холодильника у металургійному виробництві. 3. Обґрунтування вибору та удосконалення методу візуального контролю внутрішніх стінок змійовика. 4. Розроблення технічних рішень та моделі системи візуального контролю, практична реалізація та оцінка ефективності удосконаленого методу контролю. 5. Техніко-економічне обґрунтування впровадження, охорона праці та безпека під час проведення діагностичних робіт. Висновки. Додатки

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу: презентація за темою кваліфікаційної роботи.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Консультант (прізвище, ініціали та посада)

7. Дата видачі завдання 03 жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи (проекта)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Аналіз технічного завдання та сучасних методів контролю стану теплообмінних елементів	03.10.2025 – 20.10.2025	
2	Розділ 2. Огляд конструкції та умов експлуатації змійовика холодильника у металургійному виробництві	21.10.2025 – 03.11.2025	
3	Розділ 3. Обґрунтування вибору та удосконалення методу візуального контролю внутрішніх стінок змійовика	04.11.2025 – 24.11.2025	
4	Розділ 4. Розроблення технічних рішень та моделі системи візуального контролю, практична реалізація та оцінка ефективності удосконаленого методу контролю	25.11.2025 – 08.12.2025	
5	Розділ 5. Техніко-економічне обґрунтування впровадження, охорона праці та безпека під час проведення діагностичних робіт	09.12.2025 – 05.01.2026	
6	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	06.01.2026 – 12.01.2026	
7	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	13.01.2026 – 19.01.2026	
8	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	20.01.2026 – 21.01.2026	
8	Рецензування завершеної роботи.	22.01.2026 – 23.01.2026	
9	Захист	26.01.2026 – 30.01.2026	

Здобувач

\_\_\_\_\_ (підпис)

Андрій КАРПЕНКО

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Богдан ЦИМБАЛ

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)



## АНОТАЦІЯ

Карпенко Андрій Юрійович. Удосконалення методу візуального контролю стану внутрішніх стінок зміювика холодильника для металургійного виробництва. – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 131 «Прикладна механіка». ОПП «Комп'ютерне конструювання мехатронних систем» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Метою роботи є удосконалення методу візуального контролю стану внутрішніх стінок зміювика холодильника, застосування сучасних технічних засобів і методів обробки візуальної інформації для підвищення достовірності контролю та своєчасного виявлення дефектів.

Об'єктом дослідження є існуючі методи візуального контролю технічного стану внутрішніх поверхонь теплообмінних елементів, що використовуються в металургійному виробництві.

Предметом дослідження є методи, засоби та алгоритми візуального контролю стану внутрішніх стінок зміювика холодильника металургійного виробництва.

У першому розділі проведено аналіз технічного завдання та сучасних методів контролю стану теплообмінних елементів.

У другому розділі здійснено огляд конструкції та умов експлуатації зміювика холодильника у металургійному виробництві.

У третьому розділі здійснено обґрунтування вибору та удосконалення методу візуального контролю внутрішніх стінок зміювика.

У четвертому розділі розроблені технічні рішення та модель системи візуального контролю, виконана практична реалізація розробленого методу та виконана його оцінка ефективності

У п'ятому розділі прораховано техніко-економічне обґрунтування впровадження та розроблені заходи щодо охорона праці та безпека під час проведення діагностичних робіт.

ЕНДОСКОПІЯ, ВІЗУАЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ, НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, ЕНДОСКОП, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЗМІЙОВИК, ТЕПЛООБМІННІ ЕЛЕМЕНТИ, ДЕФЕКТИ, МВК, МНК.



## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз технічного завдання та сучасних методів контролю стану теплообмінних елементів .....	11
1.1 Загальні відомості про теплообмінні елементи .....	11
1.1.1 Класифікація та функціональне призначення теплообмінних елементів .....	11
1.1.2 Теплообмінні елементи доменних печей.....	12
1.1.3 Теплообмінні елементи електродугових печей.....	12
1.1.4 Теплообмінні елементи індукційних печей.....	13
1.1.5 Узагальнюючі характеристики та проблематика контролю .....	14
1.2 Аналіз впливу стану теплообмінних елементів на ефективність роботи холодильних систем .....	14
1.3 Огляд сучасних методів контролю стану теплообмінних поверхонь .....	16
1.3.1 Ультразвукові методи контролю .....	16
1.3.2 Візуальні та оптичні методи контролю.....	17
1.3.3 Інші неруйнівні методи.....	18
1.3.4 Методи непрямой діагностики за експлуатаційними параметрами .....	20
1.4 Комплексний підхід та місце візуального контролю .....	21
2 Огляд конструкції та умов експлуатації змійовика холодильника у металургійному виробництві .....	22
2.1 Призначення та роль змійовика у системі охолодження металургійного обладнання.....	22
2.2 Конструктивні особливості змійовика та матеріали, з яких виготовлені змійовики .....	23
2.2.1 Конструктивні особливості змійовиків у металургійних печах ..	23
2.2.2 Матеріали, з яких виготовляються змійовики.....	25
2.3 Умови експлуатації: температурні, гідродинамічні, корозійні впливи .....	25



2.3.1 Температурні впливи .....	26
2.3.2 Корозійні та ерозійні впливи .....	26
2.4 Типові дефекти та пошкодження внутрішніх стінок труб зміювика	27
3 Обґрунтування вибору та удосконалення методу візуального контролю внутрішніх стінок зміювика .....	30
3.1 Недоліки традиційних методів візуального контролю .....	30
3.2 Вибір найбільш доцільного методу контролю для специфічних умов металургійного виробництва .....	31
3.3 Розроблення концепції удосконаленого методу візуального контролю .....	32
4 Розроблення технічних рішень та моделі системи візуального контролю, практична реалізація та оцінка ефективності удосконаленого методу контролю .....	33
4.1 Робот «змія» .....	33
4.2 Пневматичний привід .....	35
4.3 Розрахунок тіла робота на порив .....	35
4.4 Математичне моделювання роботи пневматичної системи робота .....	38
4.5 Практична реалізація та оцінка ефективності удосконаленого методу контролю .....	42
5 Розділ 5. Техніко-економічне обґрунтування впровадження, охорона праці та безпека під час проведення діагностичних робіт .....	44
5.1 Техніко-економічне обґрунтування впровадження мехатронної системи візуального контролю .....	44
5.1.1 Розрахунок капітальних витрат .....	44
5.1.2 Розрахунок річних експлуатаційних витрат .....	44
5.1.3 Розрахунок річної економії витрат .....	45
5.1.4 Визначення економічного ефекту .....	45
5.1.5 Показники економічної ефективності .....	46
5.1.6 Узагальнююча таблиця економічної ефективності .....	46
5.2 Охорона праці та безпека під час проведення діагностичних робіт .....	46
Висновки .....	48



Список використаних джерел.....	49
Додаток А. Креслення виготовлення зміювика .....	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>
Додаток Б. Сертифікат .....	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>
Додаток В. Диплом .....	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>



## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВОК – візуально-оптичний контроль.

ЕДП – електродугова піч.

НК – неруйнівний контроль.

УЗК – ультразвуковий контроль.

УЗТ – ультразвукова товщинометрія.

LED – light emitting diode (світлодіод).



## ВСТУП

Актуальність теми «Удосконалення методу візуального контролю стану внутрішніх стінок зміювика холодильника для металургійного виробництва» зумовлена жорсткими умовами експлуатації зміювиків у металургійних агрегатах, де вони зазнають інтенсивних температурних, гідродинамічних і корозійних впливів. Більшість небезпечних дефектів формується на внутрішніх поверхнях труб і тривалий час залишається прихованою для традиційних методів контролю, що підвищує ризик аварійних відмов та незапланованих простоїв обладнання.

Метою роботи є удосконалення методу візуального контролю стану внутрішніх стінок зміювика холодильника, застосування сучасних технічних засобів і методів обробки візуальної інформації для підвищення достовірності контролю та своєчасного виявлення дефектів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) проаналізувати технічне завдання та сучасні методи контролю стану теплообмінних елементів;
- 2) зробити огляд конструкції та умов експлуатації зміювика холодильника у металургійному виробництві;
- 3) обґрунтувати вибір та удосконалення методу візуального контролю внутрішніх стінок зміювика;
- 4) розробити технічні рішення та моделі системи візуального контролю, виконати практичну реалізацію та оцінку ефективності удосконаленого методу контролю;
- 5) провести техніко-економічне обґрунтування впровадження, проаналізувати питання пов'язані охороною праці та безпеки під час проведення діагностичних робіт.

Об'єктом дослідження є існуючі методи візуального контролю технічного стану внутрішніх поверхонь теплообмінних елементів, що використовуються в металургійному виробництві.

Предметом дослідження є методи, засоби та алгоритми візуального контролю стану внутрішніх стінок зміювика холодильника металургійного виробництва.

В роботі розроблено і випробувано удосконалений метод візуального контролю, який суттєво перемагає існуючі за рахунок удосконалення ендоскопічного методу і його з системою – роботом змією, який може транспортувати камеру ендоскопу в глиб зміювика. Таким чином в роботі вирішується проблематика доступу до внутрішніх стінок зміювика. Також цей метод може бути використаним в інших сферах (обстеженні споруд, вентиляційних шахт, завалів, тощо).

Апробацією результатів магістерської роботи є публікація тез доповідей на Start in Science: студентська науково-технічна конференції:

1. Цимбал Б.М, Карпенко А.Ю. Особливості удосконалення методу візуального контролю стану внутрішніх стінок зміювика холодильника для



металургійного виробництва. Start in Science: студентська науково-технічна конференція : збірник тез і анотацій наукових доповідей. – Одеса: Олді+, 2025. – С. 151-153.



# 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ СТАНУ ТЕПЛООБМІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

## 1.1 Загальні відомості про теплообмінні елементи

Теплообмінні елементи металургійних агрегатів відіграють ключову роль у забезпеченні їх термічної стійкості, довговічності та безпечної експлуатації. При переробці металургійної сировини в доменних, електродугових та індукційних печах виділяється значна кількість теплоти, концентрована у невеликому об'ємі. Без ефективного відведення цієї теплоти елементи металоконструкцій, футерівка та обмурування печей швидко руйнуються, що призводить до аварійних ситуацій, зупинок виробництва та значних економічних збитків. Саме тому системи охолодження - різноманітні теплообмінні елементи (змійовики, панелі, коробчасті холодильники, мідні плити з каналами тощо) - є невід'ємним конструктивним компонентом сучасного металургійного обладнання [1].

### 1.1.1 Класифікація та функціональне призначення теплообмінних елементів

Загалом теплообмінні елементи металургійних агрегатів можна класифікувати за кількома ознаками:

а) за конструкцією:

- трубчасті (змійовики, прямі та гнуті труби);
- панельні (водоохолоджувані панелі);
- блочні/коробчасті холодильники (корпуси з внутрішніми каналами);
- мідні пластини з внутрішніми каналами для інтенсивного охолодження;

б) за типом теплоносія:

- водоохолоджувані (найпоширеніші);
- повітроохолоджувані;
- комбіновані (вода + повітря, вода + інші охолоджувальні середовища);

в) за місцем розташування:

- охолоджувачі стінок і склепінь печей;
- охолоджувачі фурм, льоток, кришок, кристалізаторів, індукторів;
- охолоджувальні елементи подин, подів, завантажувальних зон.

Основна функція таких елементів - забезпечити стабільний температурний режим металоконструкцій і футерівки, не допускаючи їх перегріву вище допустимих меж. У доменних печах це дає змогу зберегти стійкість робочої футерівки й зменшити витрати вогнетривів; в електродугових та індукційних печах - зберегти цілісність кожуха, кришки, панелей та індукторів, а також запобігти виходу розплаву за межі робочого об'єму [1; 2].



### 1.1.2 Теплообмінні елементи доменних печей

У конструкції доменних печей застосовується розвинена система охолодження, що включає стінові, льоткові, фурмені та горнові холодильники, а також охолоджувані плити та змійовики. На різних ділянках доменної печі умови теплового навантаження суттєво відрізняються, тому й конструкція охолоджувачів адаптована до конкретної зони.

У верхніх і середніх поясах доменної печі широко використовують коробчасті холодильники й охолоджувані плити, які контактують з вогнетривкою футерівкою та відводять теплоту через систему внутрішніх каналів із проточною водою. У зоні фурм і льоток застосовують водоохолоджувані блоки складної форми (часто з вмонтованими змійовиками), оскільки тут тепловий потік до стінок є максимальним через високу температуру та інтенсивний рух розплаву й газів [1].


Типовим теплоносієм у системах охолодження доменних печей є вода, яка циркулює по замкнутому контуру. Важливо забезпечити необхідну витрату, швидкість руху та температуру води на вході/виході для запобігання закипанню в каналах, утворенню накипу й локальних зон перегріву. Порушення режимів охолодження призводить до інтенсивної корозії внутрішніх стінок труб, зменшення перерізу каналів через відкладення солей і продуктів корозії, а в гіршому випадку — до пропалу холодильників та небезпечних витоків [3].

Особливістю теплообмінних елементів доменних печей є те, що значна частина з них виконується з чавуну або сталі з внутрішніми каналами, а в зоні найвищих теплових навантажень — з міді чи мідних сплавів з високою теплопровідністю. При цьому внутрішні канали мають складну просторову геометрію, що ускладнює доступ до них для діагностики. Саме тому для підтримання їх працездатності критично важливі періодичні огляди та контроль стану внутрішніх поверхонь теплообмінних елементів.

### 1.1.3 Теплообмінні елементи електродугових печей

У електродугових печах (ЕДП) джерелом теплоти є електрична дуга, яка створює надзвичайно високі локальні теплові навантаження на кришку, стінки, зону завантаження, а також на вузли, розташовані у верхній частині печі (газовідвід, електродотримачі тощо). Для захисту металевого кожуха й елементів конструкції в ЕДП застосовують водоохолоджувані панелі та змійовикові системи, змонтовані з внутрішнього боку стінок і кришки [2].

Панельні елементи ЕДП, як правило, являють собою зварні конструкції з труб (змійовиків), приварених до несучих листів або рам. Трубчастий контур охолоджується проточною водою, яка відводить теплоту від внутрішньої поверхні панелі, що піддається дії радіаційного теплопереносу, бризок металу та шлаку. В окремих конструкціях



застосовують мідні охолоджувані блоки у місцях найбільшого теплового навантаження (наприклад, у зоні виходу дуги), що забезпечує інтенсивніший теплообмін і кращу термічну стабільність.

Важливим фактором для ЕДП є термічний цикл роботи: періодичний характер плавок, швидкі зміни теплового навантаження, можливі термічні удари на поверхні панелей. У таких умовах внутрішні стінки труб охолоджувальних елементів піддаються комбінованому впливу корозії, ерозії потоком води й дії циклічних напружень. Накопичення відкладень на внутрішній поверхні зменшує ефективну теплопередавальну здатність системи, що може призвести до локального перегріву і навіть до розплавлення металу панелі.


Через складну геометрію й велику протяжність трубчастих контурів системи охолодження ЕДП традиційні методи контролю (товщиномір, гідравлічні випробування) не завжди дозволяють виявити локальні дефекти внутрішніх стінок, особливо на ранніх стадіях. Це обумовлює актуальність розвитку ендоскопічних та відеоінспекційних методів контролю внутрішніх каналів таких теплообмінних елементів.

#### **1.1.4 Теплообмінні елементи індукційних печей**

В індукційних печах (канальних і тигельних) головними конструктивними елементами, що потребують інтенсивного охолодження, є індуктори (котушки), а також у ряді випадків — стінки та подина тигля. Індуктор, як правило, являє собою мідну водоохолоджувану спіраль (змійовик), через яку пропускається струм високої частоти. Магнітне поле індуктора нагріває метал у тиглі, але при цьому індуктор сам піддається значному тепловому навантаженню як від струмових втрат (джоулеве тепло), так і від випромінювання та конвекції від гарячого металу [1; 4].

Через це конструкція індукторів індукційних печей майже завжди включає систему внутрішнього водяного охолодження. Теплообмінні елементи в цьому випадку - це, власне, трубчасті витки індуктора, усередині яких відбувається рух охолоджувача. Найчастіше використовуються мідні труби з високою теплопровідністю та достатньою механічною міцністю. Вимоги до якості охолоджувальної води в індукційних системах особливо високі: підвищений вміст солей або забруднень швидко призводить до утворення накипу на внутрішніх стінках труб, зменшення перерізу каналів, а відповідно - і до зростання температури індуктора [4].

Пошкодження теплообмінних елементів індукційних печей (наприклад, пробій індуктора) є надзвичайно небезпечними: можливий контакт охолоджувальної води з розплавленим металом, що супроводжується вибухом, розкиданням металу та руйнуванням обладнання. Тому регулярний і якісний контроль стану внутрішніх стінок індукторів і пов'язаних з ними змійовиків охолодження є обов'язковою умовою безпечної експлуатації.



Через просторову конфігурацію індуктора (спіраль з малим радіусом вигину) традиційний візуальний огляд внутрішніх поверхонь труб є надзвичайно ускладненим. У таких випадках методи дистанційного візуального контролю (відеоендоскопія, гнучкі зондові системи) набувають особливого значення, дозволяючи виявляти зони локальної корозії, ерозії, накипу та мікротріщин до виникнення критичних пошкоджень.

### **1.1.5 Узагальнюючі характеристики та проблематика контролю**

Попри різноманітність конструкцій і режимів роботи доменних, електродугових і індукційних печей, теплообмінні елементи цих агрегатів мають спільні риси:

- вони працюють в умовах екстремальних теплових навантажень і значних температурних градієнтів;
- внутрішні канали часто мають складну просторову геометрію (змійовики, багатоканальні плити, спіралі індукторів);
- доступ до внутрішніх поверхонь обмежений, а демонтаж теплообмінних елементів є трудомістким і дорогим;
- якість теплоносія безпосередньо впливає на інтенсивність утворення накипу, корозії та відкладень;
- від технічного стану теплообмінних елементів залежить ресурс усього агрегату, його енергоефективність і безпека.

Ці особливості зумовлюють необхідність розвитку спеціалізованих методів діагностики стану внутрішніх стінок теплообмінних елементів, зокрема для змійовиків холодильників, що застосовуються в зонах інтенсивного теплового навантаження. Одним із найбільш практично доступних і технічно перспективних напрямів є удосконалення методу візуального (відео-) контролю з використанням сучасних ендоскопічних систем

## **1.2 Аналіз впливу стану теплообмінних елементів на ефективність роботи холодильних систем**

Стан теплообмінних елементів (змійовиків, водоохолоджуваних панелей, мідних плит з каналами, індукторів з внутрішнім охолодженням) є визначальним фактором ефективності роботи холодильних систем металургійних агрегатів. У доменних, електродугових та індукційних печах саме ці елементи забезпечують відведення інтенсивних теплових потоків від футерівки, металоконструкцій і вузлів, що працюють при високих температурах. Погіршення їх технічного стану призводить не лише до зниження теплової ефективності системи, а й до зростання енергоспоживання та підвищення ризику аварійних ситуацій.

Наприклад, за [5] причиною виходу фурми з ладу може стати порушення режиму відведення тепла або наявність внутрішніх дефектів (див. рис. 1.1) у структурі металу, що виникли в процесі виробництва на заводі-виробнику.



Рисунок 1.1 – Пошкодження форм «Кульові отвори» [5]

Стан внутрішніх поверхонь також суттєво впливає на гідравлічні характеристики системи. Накопичення відкладень і продуктів корозії зменшує ефективний переріз каналів і збільшує їх шорсткість, що веде до зростання гідравлічного опору. Це потребує підвищення напору насосів для підтримання розрахункової витрати охолоджувача, збільшує енергоспоживання та, у граничних випадках, призводить до зменшення витрати в окремих гілках системи. У результаті охолодження стає нерівномірним: частина змійовиків і панелей працює в режимі недостатнього тепловідведення, що є особливо небезпечним для панелей електродугових печей та індукторів індукційних печей.

Додатковим аспектом є корозійний та ерозійний знос внутрішніх стінок. Навіть за відносно задовільних теплогідравлічних параметрів поступове зменшення товщини стінки знижує її механічну міцність і стійкість до внутрішнього тиску та термічних навантажень. Локальне стоншення в зонах вигинів, зварних швів або зміни напрямку потоку може залишатися непоміченим при стандартних зовнішніх оглядах, але стати причиною раптового прориву води в зону високих температур, що в умовах металургійного виробництва створює загрозу вибуху, руйнування футерівки й обладнання [5].

Таким чином, погіршення стану теплообмінних елементів призводить до:

- зниження коефіцієнта теплопередачі та ефективності відведення теплоти;

- збільшення гідравлічних втрат і енергоспоживання насосів;
- скорочення ресурсу футерівки й металоконструкцій агрегатів;
- зростання імовірності аварійних відмов і позапланових простоїв.

У зв'язку з цим є обґрунтована необхідність не лише контролювати експлуатаційні параметри (температуру, тиск, витрату), а й діагностувати реальний стан внутрішніх поверхонь теплообмінних елементів.

### **1.3 Огляд сучасних методів контролю стану теплообмінних поверхонь**

До основних сучасних методів контролю стану теплообмінних поверхонь можна віднести:

- а) ультразвукові методи контролю;
- б) візуальні та оптичні методи контролю;
- в) інші неруйнівні методи;
- г) методи непрямої діагностики за експлуатаційними параметрами.

#### **1.3.1 Ультразвукові методи контролю**

Ультразвуковий контроль (УЗК) широко застосовується для оцінки товщини стінок труб, панелей і корпусів теплообмінних елементів без їх демонтажу. Суть методу полягає в реєстрації часу проходження ультразвукового імпульсу крізь матеріал і відбиття сигналу від протилежної поверхні або дефекту. За відомою швидкістю звуку в матеріалі можна визначити фактичну товщину стінки та локалізувати внутрішні дефекти типу несплошностей, пор, підповерхневих тріщин [6].

Для теплообмінних елементів металургійних агрегатів УЗК особливо корисний у випадках, коли необхідно:

- оцінити ступінь стоншення стінки внаслідок корозії чи ерозії (див. рис. 1.2);
- виявити підвідкладну корозію (коли зовнішня поверхня візуально неушкоджена, але під відкладеннями сформувалися зони зменшеної товщини);
- діагностувати неоднорідність металу у відповідальних зонах (зварні з'єднання (див. рис. 1.3), місця термічних впливів).



Рисунок 1.2 – Вимірювання товщини стінки труби за допомоги УЗТ



Рисунок 1.3 – УЗК зварних швів

Перевагами ультразвукових методів є висока чутливість до змін товщини, можливість кількісної оцінки, відносно невелика вартість обладнання та можливість застосування в умовах цеху.

До недоліків слід віднести:

- необхідність контактного доступу до контрольованої поверхні (вимагає очищення від фарби, нагару, окалини);
- чутливість до кривизни поверхні й якості акустичного контакту;
- складність застосування на тонкостінних елементах малої кривизни або в місцях складної геометрії.

У разі теплообмінних труб і змієвиків УЗК зазвичай використовується для зовнішньої оцінки товщини (по зовнішній поверхні), а інформація про внутрішній стан (наявність накипу, відкладень) залишається непрямую. Тому ультразвук добре доповнює візуально-оптичні методи, але не замінює їх для задач детального аналізу внутрішньої поверхні.

### 1.3.2 Візуальні та оптичні методи контролю

Прямий візуально-оптичний контроль (ВОК) є найбільш простим і широко застосовуваним методом оцінки технічного стану теплообмінних поверхонь. Він передбачає огляд доступних ділянок елементів (відкритих частин панелей, зовнішніх поверхонь труб, фланцевих з'єднань, місць можливих протікань) за допомогою органів зору оператора, іноді з використанням допоміжних засобів – ліхтарів, дзеркал, луп, ручних камер. Такий метод дозволяє швидко виявити грубі дефекти: корозійні ушкодження зовнішньої поверхні, тріщини, деформації, сліди протікань, локальні перегриви (змінена забарвленість металу, нагар тощо).

Однак можливості прямого візуального контролю істотно обмежуються геометрією та доступністю теплообмінних елементів. Внутрішні стінки змієвиків, канали в мідних плитах, індуктори індукційних печей практично недоступні для огляду без розбирання, що є трудомістким та економічно не вигідним.

У таких випадках застосовуються дистанційні оптичні методи, зокрема:

- промислові ендоскопи та відеоендоскопи (гнучкі або жорсткі з камерами на кінці);
- бороскопи з оптоволоконною передачею зображення;

- мініатюрні відеокамери, вбудовані у гнучкі зонди.

Ці засоби дозволяють оглядати внутрішні поверхні каналів через технологічні отвори, штуцери, колектори. Сучасні системи оснащені підсвічуванням (LED), можливістю регулювання фокусу і кута огляду, передачею зображення на монітор та його цифровим записом для подальшого аналізу [8]. Важливою перевагою є можливість фіксації стану поверхонь у часі, що дозволяє відстежувати динаміку розвитку дефектів.



Рисунок 1.4 – Знімок внутрішньої поверхні труби зроблений за допомоги ендоскопа

Основними обмеженнями оптичних методів є:

- залежність якості зображення від чистоти середовища (наявність відкладень, мутних рідин, нагару);
- обмежений радіус вигину та довжина зонда;
- суб'єктивність інтерпретації результатів (людський фактор).

Саме тому в сучасних підходах усе активніше використовуються методи цифрової обробки зображень – фільтрація шумів, підвищення контрасту, автоматизоване виявлення корозійних плям, відкладень та тріщин, що частково зменшує суб'єктивність оцінки.

### **1.3.3 Інші неруйнівні методи**

До групи неруйнівних методів контролю (НК), окрім ультразвукових, належать рентгенографічні, вихрострумові, магнітопорошкові, капілярні методи тощо [6; 8]. Їх застосування до контролю теплообмінних елементів має специфічні особливості.

Рентгенографічний контроль дозволяє виявляти внутрішні несплошності (порожнини, тріщини, шлакові включення) у матеріалі стінки, але для довгих тонкостінних елементів (труб, змійовиків) його використання є трудомістким і не завжди економічно виправданим. Крім того, застосування рентгену в умовах діючих металургійних агрегатів потребує суворих заходів радіаційної безпеки та організаційної підготовки.

Вихрострумний метод базується на індукції електричних струмів у провідному матеріалі й реєстрації змін їхнього розподілу, спричинених наявністю дефектів або зміною властивостей матеріалу. Він особливо чутливий до поверхневих і підповерхневих дефектів у провідних матеріалах (сталь, мідь) і може бути ефективним для контролю зовнішньої поверхні труб, виявлення тріщин, зон інтенсивної корозії. Проте застосування вихрострумного контролю для діагностики внутрішніх поверхонь теплообмінних каналів ускладнене з огляду на необхідність доступу та специфічну геометрію.

Магнітопорошкові (див. рис. 1.5) та капілярні (див. рис. 1.6) методи більше підходять для виявлення відкритих поверхневих тріщин і дефектів на обмежених ділянках (зварні шви, зони концентраторів напружень). Вони можуть використовуватися для контролю корпусних елементів, колекторів, фланців, але мають обмежене застосування для протяжних внутрішніх каналів теплообмінних елементів.



Рисунок 1.5 – Магнітопорошковий контроль

Таким чином, хоча неруйнівні методи загалом мають високу чутливість до різних типів дефектів, їх масштабне застосування до контролю стану внутрішніх поверхонь теплообмінних елементів (особливо змійовиків) часто обмежується складністю доступу, вартістю та організаційними факторами.



Рисунок – 1.6 Капілярний контроль

#### **1.3.4 Методи непрямої діагностики за експлуатаційними параметрами**

Окрему групу становлять непрямі методи діагностики, що базуються на аналізі експлуатаційних параметрів системи охолодження: температури стінок і теплоносія, тиску, витрати, перепаду тиску на ділянках, коефіцієнта теплопередачі тощо. У цих випадках технічний стан теплообмінних елементів оцінюється за відхиленнями параметрів від розрахункових або еталонних значень [9].

Наприклад:

- зростання перепаду тиску при незмінній витраті свідчить про можливе заростання каналів накипом або відкладеннями;
- підвищення температури стінки або теплоносія на виході при незмінному тепловому навантаженні може свідчити про зниження коефіцієнта теплопередачі;
- зниження ефективності охолодження окремих зон при нормальних загальних параметрах вказує на локальні дефекти (засмічення, часткове руйнування, завоздушення).

Перевагою таких методів є можливість безперервного моніторингу під час експлуатації без зупинки агрегату. Недоліком – низька просторово-локальна роздільна здатність: за зміною загальних параметрів не завжди можна однозначно визначити місце й характер дефекту. Тому непрямі методи найефективніше працюють у поєднанні з візуально-оптичними та вибірковими неруйнівними дослідженнями.



#### 1.4 Комплексний підхід та місце візуального контролю

Сучасна практика діагностики стану теплообмінних поверхонь у металургійних агрегатах орієнтується на комплексне застосування різних методів, де кожен із них використовується відповідно до своїх сильних сторін. При цьому особливу роль відіграють візуальні та оптичні методи, які:

- забезпечують пряму візуальну інформацію про стан поверхні (тип, форма та розташування дефектів, наявність накипу й відкладень);
- дозволяють документувати результати у вигляді фото- та відеоматеріалів;
- можуть бути технічно реалізовані у формі компактних, мобільних систем, придатних для використання в умовах цеху.

Удосконалення саме візуальних (відеоендоскопічних) методів – за рахунок розвитку засобів введення (гнучкі зонди, маніпулятори), підсвічування, оптики та програмної обробки зображень – є одним із найбільш перспективних напрямів підвищення якості контролю внутрішніх стінок теплообмінних елементів. Це особливо актуально для складних за геометрією змійовиків холодильників доменних, електродугових та індукційних печей, де інші методи НК або малодоступні, або економічно невиправдані.



## **2 ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЇ ТА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗМЙОВИКА ХОЛОДИЛЬНИКА У МЕТАЛУРГІЙНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

Металургійне виробництво характеризується високими температурами, значними тепловими навантаженнями та безперервністю технологічних процесів. У процесі виплавки, обробки та транспортування металу відбувається інтенсивне виділення теплової енергії, що потребує ефективного та надійного відведення. Перегрів металургійного обладнання може призвести до зниження його ресурсу, аварійних ситуацій та погіршення якості готової продукції. Саме тому системи охолодження є невід'ємною складовою металургійних агрегатів.

Одним із важливих елементів таких систем є змійовик – теплообмінний пристрій, який широко застосовується для охолодження окремих вузлів обладнання, робочих середовищ та технологічних контурів.

### **2.1 Призначення та роль змійовика у системі охолодження металургійного обладнання**

Призначення змійовика в системах охолодження металургійного обладнання полягає у забезпеченні надійного, безперервного та керованого відведення теплової енергії, що утворюється під час роботи агрегатів і технологічних процесів. Металургійне виробництво відрізняється високою концентрацією теплових потоків, тому навіть короткочасне порушення температурного режиму може призвести до пошкодження обладнання або порушення технологічного процесу. Саме змійовик виконує функцію проміжної ланки між джерелом тепла та охолоджувальним середовищем, забезпечуючи стабільність теплового балансу системи.

У процесі експлуатації прокатних станів, доменних і мартенівських печей, машин безперервного лиття заготовок, а також допоміжного обладнання виділяється значна кількість тепла. Якщо це тепло не відводити вчасно, виникають локальні перегріви, які спричиняють термічні напруження, деформації та прискорений знос конструктивних елементів. Змійовик, інтегрований у систему охолодження, дозволяє підтримувати температуру обладнання в допустимих межах, що є критично важливим для його довговічної та безпечної роботи.

Окремим призначенням змійовика є охолодження робочих середовищ — газів, парів або рідин, які беруть участь у металургійних процесах. У багатьох технологічних схемах виникає потреба зниження температури відпрацьованих газів перед їх очищенням або утилізацією. Змійовикові теплообмінники дозволяють ефективно знижувати температуру газових потоків без змішування середовищ, що є важливим з точки зору екологічної безпеки та збереження працездатності очисного обладнання [10].

Отже, призначення змійовика в системах охолодження металургійного обладнання є багатофункціональним і включає захист обладнання від перегріву, забезпечення стабільності технологічних процесів, локальне та загальне охолодження теплонанавантажених елементів, охолодження робочих середовищ, а також підвищення енергоефективності та безпеки виробництва. Саме завдяки цим функціям змійовик займає важливе місце у сучасних системах охолодження металургійної галузі.

## **2.2 Конструктивні особливості змійовика та матеріали, з яких виготовлені змійовики**

### **2.2.1 Конструктивні особливості змійовиків у металургійних печах**

Конструкція змійовика в металургійному обладнанні визначається насамперед типом печі, рівнем теплових навантажень, характером теплообміну та вимогами до надійності системи охолодження. У загальному вигляді змійовик являє собою трубчастий елемент складної просторової форми, призначений для циркуляції охолоджувальної води або іншого теплоносія з метою інтенсивного відведення тепла від теплонанавантажених поверхонь. В додатку А наведено креслення виготовлення змійовика.

В індукційних печах змійовики є критично важливою частиною конструкції, оскільки система охолодження безпосередньо пов'язана з роботою індуктора. Змійовики тут виконуються у вигляді багатовиткових мідних труб, які одночасно виконують функцію електричного провідника та теплообмінного елемента (див. рис. 2.1). Вони мають високу геометричну точність, рівномірний крок витків та гладку внутрішню поверхню для забезпечення стабільної циркуляції води. Особливістю таких змійовиків є необхідність роботи в умовах інтенсивних електромагнітних полів і високих температур, що зумовлює підвищені вимоги до герметичності та якості матеріалу.



Рисунок 2.1 – Індуктор індукційної печі

В електродугових печах (ЕДП) змійовики зазвичай інтегруються у водоохолоджувані панелі, стінки та покрівлю печі (див. рис. 2.2). Конструктивно вони виконуються у вигляді трубчастих каналів, вмонтованих у сталеві або мідні панелі, що формують захисний бар'єр між зоною дуги та несучими конструкціями. Такі змійовики мають розгалужену систему підведення та відведення води, розраховану на великі теплові потоки та різкі температурні коливання. Конструкція передбачає турбулентний режим руху теплоносія для інтенсифікації тепловіддачі та зниження температури панелей.



Рисунок 2.2 – Використання змійовиків для охолодження кришки електродугової печі

У доменних печах змійовики застосовуються переважно у складі систем охолодження стінок печі та холодильників (ставів). Конструктивно вони можуть бути виконані у вигляді вбудованих трубчастих каналів або окремих спіральних елементів, розміщених у масивних чавунних чи мідних блоках. Особливістю доменних змійовиків є їхня робота в умовах тривалої безперервної експлуатації та надзвичайно високих теплових навантажень. Тому їх конструкція орієнтована на максимальну довговічність, рівномірний розподіл теплових потоків та можливість формування захисного гарнісажу на внутрішній поверхні печі.

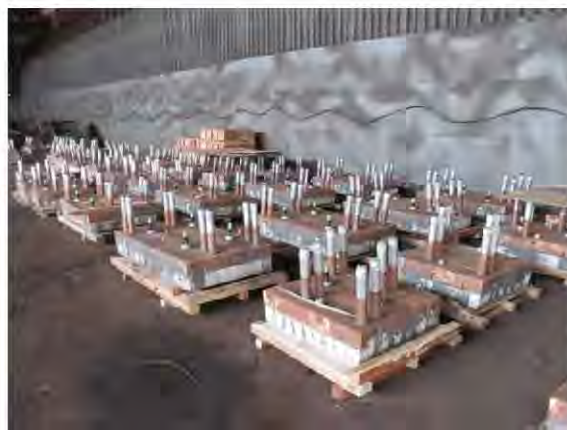


Рисунок 2.3 – Попередньо зафутеровані карбідкремнієвою цеглою мідні холодильні плити



Окрім зазначених типів печей, змійовики широко застосовуються в нагрівальних, термічних та ковальських печах, а також у допоміжному металургійному обладнанні. У цих випадках конструкція змійовика може бути як знімною, так і стаціонарною, з різною геометрією труб залежно від конфігурації агрегату та режиму роботи.

### **2.2.2 Матеріали, з яких виготовляються змійовики**

Вибір матеріалу для виготовлення змійовиків є одним із ключових факторів, що визначає їхню ефективність і ресурс. Основними вимогами до матеріалів є висока теплопровідність, корозійна стійкість, механічна міцність та здатність працювати за високих температур і тисків.

В індукційних печах найбільш поширеним матеріалом для змійовиків є мідь та її сплави. Мідні змійовики забезпечують високу ефективність тепловідведення та одночасно виконують роль провідника електричного струму. Для підвищення зносостійкості та корозійної стійкості мідні трубки часто легують або покривають захисними шарами.

В електродугових печах поряд із міддю широко застосовуються низьковуглецеві та леговані сталі. Сталеві змійовики мають вищу механічну міцність і стійкість до механічних ударів, проте поступаються міді за теплопровідністю. У сучасних конструкціях ЕДП все частіше використовуються мідні або мідно-сталеві водоохолоджувані панелі зі вбудованими змійовиками, що дозволяє суттєво підвищити термін служби футерівки та зменшити теплові втрати.

Для доменних печей характерним є застосування чавуну, міді та спеціальних жароміцних сталей. Чавунні холодильники зі вбудованими змійовиками традиційно використовуються в доменному виробництві завдяки їхній міцності та здатності формувати стабільний гарнісаж. Водночас сучасні доменні печі все частіше оснащуються мідними ставами зі змійовиками, які забезпечують кращий тепловий контакт і значно подовжують кампанію печі.

Таким чином, конструктивні особливості та матеріали змійовиків тісно пов'язані з типом металургійної печі та умовами її експлуатації. Рациональний вибір конструкції та матеріалу дозволяє забезпечити ефективне охолодження, підвищити надійність обладнання та зменшити експлуатаційні витрати.

### **2.3 Умови експлуатації: температурні, гідродинамічні, корозійні впливи**

Умови експлуатації змійовиків у системах охолодження металургійних печей характеризуються поєднанням надзвичайно високих температур, інтенсивних теплових потоків, складних гідродинамічних режимів руху охолоджувального середовища та агресивного корозійного впливу. Сукупність цих факторів суттєво впливає на ресурс змійовиків, їхню надійність та ефективність тепловідведення.

### 2.3.1 Температурні впливи

Температурні умови експлуатації змійовиків визначаються типом металургійної печі та характером теплового навантаження.

У доменних печах змійовики та охолоджувальні елементи працюють в умовах тривалої дії високих температур внутрішнього простору печі, які можуть досягати 1800–2000 °С у зоні горна. При цьому температура зовнішніх поверхонь холодильників і ставів підтримується значно нижчою за рахунок інтенсивного водяного охолодження. Основною небезпекою є нерівномірність теплових потоків і локальні перегриви, які призводять до виникнення термічних напружень та термічної втоми матеріалу змійовика.

В індукційних печах температурні впливи мають специфічний характер. Змійовик індуктора знаходиться поблизу розплавленого металу, температура якого зазвичай становить 1400–1700 °С. При цьому сам мідний змійовик повинен працювати при значно нижчій температурі, що досягається інтенсивною циркуляцією охолоджувальної води. Особливістю є різкі температурні градієнти та циклічні теплові навантаження, пов'язані з періодичністю плавки, що спричиняє термічну втому та зниження ресурсу трубок.

В електродугових печах температурні умови є одними з найбільш жорстких. Температура в зоні електричної дуги може перевищувати 3000°С, а теплове випромінювання безпосередньо впливає на водоохолоджувані панелі та змійовики. Для цих умов характерні різкі температурні коливання під час плавки, завалювання шихти та випуску металу, що вимагає від змійовиків високої термостійкості та здатності витримувати багаторазові теплові удари.

### 2.3.2 Корозійні та ерозійні впливи

Корозійні умови експлуатації змійовиків зумовлені хімічним складом охолоджувальної води, наявністю розчинених газів, домішок і продуктів корозії. У доменних печах система охолодження часто працює з технічною водою, що містить солі, кисень та механічні домішки. Це сприяє розвитку електрохімічної корозії, а в поєднанні з високими температурами - корозійно-ерозійному зносу.

В індукційних печах основною загрозою є корозія мідних трубок у разі порушення водно-хімічного режиму. Підвищена жорсткість води або наявність агресивних іонів може призвести до утворення відкладень на внутрішніх поверхнях змійовика, що погіршує теплопередачу і підвищує температуру металу трубки.

В електродугових печах корозійні процеси поєднуються з інтенсивним ерозійним впливом через високі швидкості води та наявність температурних напружень. Особливо небезпечними є мікротріщини, що виникають внаслідок термічної втоми та стають осередками прискореної корозії.

Таким чином, умови експлуатації змійовиків у доменних, індукційних та електродугових печах є надзвичайно складними та різноманітними. Температурні, гідродинамічні та корозійні впливи діють одночасно, визначаючи вимоги до конструкції, матеріалів і режимів роботи систем охолодження. Урахування цих факторів є необхідною умовою забезпечення довговічності та безпечної експлуатації металургійного обладнання.

#### 2.4 Типові дефекти та пошкодження внутрішніх стінок труб змійовика

Внутрішні стінки труб змійовика в системах охолодження металургійного обладнання працюють в умовах інтенсивних теплових, гідродинамічних і хімічних навантажень.

Сукупна дія високих температур, швидкісного потоку охолоджувальної води та агресивного водно-хімічного середовища зумовлює виникнення характерних дефектів і пошкоджень, які з часом можуть призвести до зниження ефективності теплообміну або аварійного виходу змійовика з ладу.

Одним із найбільш поширених дефектів внутрішніх стінок труб є корозійне ураження. Воно проявляється у вигляді рівномірної корозії, локальної пітингової корозії (рис. 2.4) або міжкристалітного руйнування матеріалу (рис. 2.5). У доменних та електродугових печах корозія часто посилюється через використання технічної води з підвищеним вмістом солей, розчиненого кисню та механічних домішок. Локальні корозійні осередки призводять до зменшення товщини стінки труби та створюють небезпечні концентрації напружень, що значно підвищує ризик прориву змійовика [11].

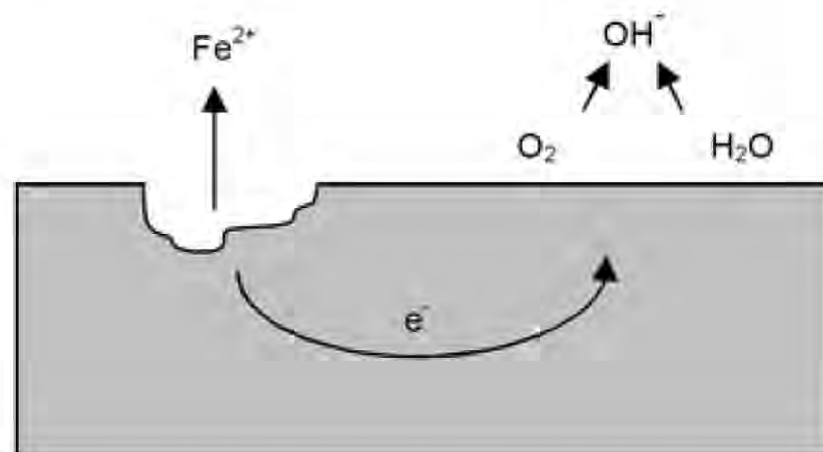


Рисунок 2.4 – Механізм виникнення корозійних ямок – пітінгу, під впливом кисню

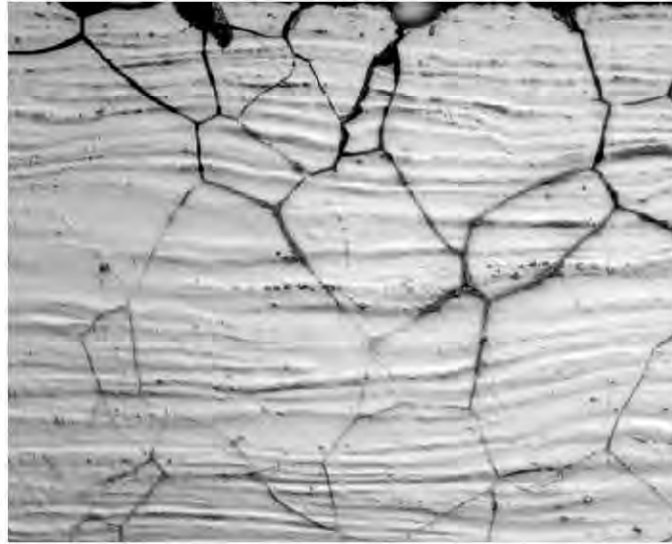


Рисунок 2.5 – Міжкристалітна корозія

Характерним видом пошкоджень є ерозійний знос внутрішніх поверхонь труб, спричинений високими швидкостями руху води та наявністю твердих частинок. Найінтенсивніше ерозія проявляється в місцях поворотів, вигинів та з'єднань труб, де виникають турбулентні вихори і локальні зони підвищеної швидкості потоку. В індукційних печах ерозійний знос особливо небезпечний для мідних зміювиків, оскільки навіть незначне зменшення товщини стінки може призвести до втрати герметичності.

Ще одним типовим дефектом є утворення відкладень і накипу (рис. 2.6) на внутрішніх стінках труб. Відкладення солей кальцію, магнію та продуктів корозії знижують ефективність теплопередачі, збільшують тепловий опір і призводять до локального перегріву металу труби. У результаті зростають термічні напруження, що може спричинити появу мікротріщин і прискорити процеси корозійного руйнування. Проблема накипоутворення є особливо актуальною для систем з порушеним водно-хімічним режимом.



Рисунок 2.6 – Накип на стінках зміювика



Термічна втома є ще одним поширеним механізмом пошкодження внутрішніх стінок труб зміювика. В умовах циклічних теплових навантажень, характерних для індукційних та електродугових печей, матеріал труб зазнає багаторазових розширень і стискань. Це призводить до накопичення мікропошкоджень, утворення мікротріщин і, зрештою, до розвитку наскрізних тріщин. Термічна втома часто поєднується з корозійними процесами, що суттєво прискорює руйнування труб.

Окрему групу дефектів становлять тріщини та розшарування матеріалу внутрішніх стінок труб, зумовлені поєднанням термічних, механічних і гідродинамічних навантажень. У електродугових печах такі дефекти можуть виникати внаслідок теплових ударів під час різких змін режиму роботи або аварійних зупинок. У доменних печах розвиток тріщин часто пов'язаний з нерівномірним тепловим навантаженням і тривалою безперервною експлуатацією.

Таким чином, типові дефекти внутрішніх стінок труб зміювика включають корозійне та ерозійне зношування, утворення відкладень, термічну втому та розвиток тріщин. Своєчасне виявлення цих пошкоджень і контроль стану внутрішніх поверхонь труб є необхідною умовою забезпечення надійної та безпечної роботи систем охолодження металургійного обладнання.



## **3 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВІЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ВНУТРІШНІХ СТІНОК ЗМІЙОВИКА**

### **3.1 Недоліки традиційних методів візуального контролю**

Візуальний контроль є одним із найдавніших і найбільш поширених методів неруйнівного контролю, який широко застосовується у металургійному виробництві для оцінювання технічного стану обладнання, зокрема змійовиків систем охолодження. Проте в умовах сучасних металургійних агрегатів традиційні методи візуального контролю мають низку суттєвих недоліків, що обмежують їх ефективність та достовірність отриманих результатів.

Одним із головних недоліків традиційного візуального контролю є обмежена доступність внутрішніх поверхонь труб змійовика. У більшості випадків змійовики є вбудованими елементами печей або теплообмінних систем і мають складну просторову конфігурацію з численними вигинами та з'єднаннями. Це унеможливує пряме спостереження внутрішніх стінок без демонтажу обладнання або його повного зупинення, що призводить до значних простоїв виробництва та економічних втрат [8].

Ще одним важливим обмеженням традиційного візуального контролю є його низька інформативність щодо прихованих дефектів. Візуальні методи дозволяють оцінювати лише поверхневий стан доступних ділянок, не надаючи інформації про внутрішні напруження, підповерхневі тріщини або локальні зони зменшення товщини стінки труби. У металургійних умовах, де пошкодження часто мають комплексний характер і розвиваються зсередини матеріалу, це значно знижує ефективність контролю.

Крім того візуальний контроль, як правило, має епізодичний характер і не забезпечує безперервного моніторингу стану змійовиків. Це унеможливує своєчасне виявлення дефектів, що розвиваються в міжремонтний період. В умовах пов'язаних з роботою доменних, індукційних та електродугових печей, де теплові та гідродинамічні навантаження можуть змінюватися дуже швидко, така затримка виявлення пошкоджень створює підвищений ризик аварійних ситуацій.

Таким чином, основним недоліком традиційних методів візуального контролю змійовиків у металургійному виробництві є обмежена доступність контрольованих поверхонь, а через те – низька здатність до виявлення прихованих дефектів, залежність від умов навколишнього середовища та відсутність можливості безперервного контролю. Зазначені обмеження зумовлюють необхідність розроблення та впровадження удосконалених методів візуального та інструментального контролю стану внутрішніх стінок труб змійовиків.

### **3.2 Вибір найбільш доцільного методу контролю для специфічних умов металургійного виробництва**

Вибір методу контролю технічного стану змієвиків у системах охолодження металургійного обладнання є складним інженерним завданням, яке повинно враховувати специфічні умови експлуатації, конструктивні особливості змієвиків та характер можливих дефектів. Для доменних, індукційних та електродугових печей ці умови суттєво відрізняються, проте спільною рисою є обмежена доступність внутрішніх поверхонь труб і висока відповідальність систем охолодження з точки зору безпеки виробництва.

Традиційні методи контролю, зокрема зовнішній візуальний огляд або контроль доступних ділянок труб, не забезпечують достатньої інформативності щодо стану внутрішніх стінок змієвика. Більшість характерних дефектів, таких як корозійні осередки, ерозійний знос або утворення відкладень, розвиваються саме на внутрішній поверхні труб і тривалий час залишаються прихованими. Це зумовлює необхідність вибору такого методу контролю, який дозволив би отримувати достовірну інформацію з глибини змієвика без його демонтажу [8].


У специфічних умовах металургійного виробництва доцільний метод контролю повинен відповідати низці ключових вимог:

- має бути неруйнівним і не впливати на працездатність системи охолодження;
- повинен забезпечувати можливість контролю внутрішніх поверхонь труб складної геометрії, включаючи вигини та протяжні ділянки.

Для доменних печей, де змієвики працюють у режимі тривалої безперервної експлуатації, особливо важливою є можливість раннього виявлення дефектів без зупинки агрегату або з мінімальним втручанням у технологічний процес. У цьому випадку пріоритет надається методам, які можуть бути інтегровані у планово-попереджувальні огляди та забезпечувати контроль внутрішніх поверхонь на значній глибині труб.

В індукційних та електродугових печах додатковим фактором є циклічність теплових навантажень і підвищений ризик термічної втоми труб змієвика. Це вимагає застосування методів контролю, здатних фіксувати початкові стадії розвитку дефектів, зокрема мікротріщини та локальне зменшення товщини стінки.

Таким чином, аналіз специфічних умов металургійного виробництва свідчить, що найбільш доцільним є вибір або розроблення методу контролю, орієнтованого на дослідження внутрішніх стінок труб змієвика по всій їх довжині. Такий метод повинен поєднувати можливості візуалізації або інструментального зондування з глибини труб, високу інформативність та адаптованість до складних умов експлуатації. Саме необхідність «дістатися» до глибин змієвика та забезпечити достовірний контроль прихованих дефектів є ключовим обґрунтуванням для



подальшої розробки удосконаленого методу контролю стану змійовиків у металургійному виробництві.

### **3.3 Розроблення концепції удосконаленого методу візуального контролю**

Концепція удосконаленого методу передбачає застосування засобів дистанційної візуалізації, адаптованих до складної геометрії труб змійовика та жорстких умов металургійного виробництва. Такий метод повинен забезпечувати отримання візуальної інформації і безпосередній доступ до внутрішніх поверхонь змійовика майже всій його довжині, включаючи вигнуті ділянки, без необхідності демонтажу обладнання.

Особлива увага приділяється можливості виявлення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку, що дозволить своєчасно приймати рішення щодо технічного обслуговування або ремонту змійовиків.

Важливою складовою концепції є інтеграція удосконаленого візуального контролю в систему планово-попереджувального обслуговування металургійного обладнання.

Метод повинен бути простим у застосуванні, надійним та безпечним.

Ключовою ідеєю концепції є об'єднання ендоскопічного метода, який займає ключову позицію у ВМК, з використанням спеціального засобу доставки, пристрою або рухомого механізму, здатного транспортувати відеокамеру безпосередньо в глибину змійовика. Такий пристрій повинен забезпечувати кероване просування засобу візуалізації вздовж осі труби, стабільне положення камери та можливість огляду внутрішніх стінок навіть у зонах вигинів і локальних звужень.

Реалізація такої концепції створює передумови для підвищення надійності систем охолодження, зниження ризику аварійних ситуацій та оптимізації експлуатаційних витрат у металургійному виробництві.

#### 4 РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА МОДЕЛІ СИСТЕМИ ВІЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ, ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ

Для впровадження концепції удосконаленого методу візуального контролю зміювика взято за основу ендоскопічний метод з розробленням системи яка б могла реалізувати транспортування відеокамери ендоскопу в порожнину зміювика.

Принципова схема системи наведена на рисунку 4.1. Вона складається: з робота «змія», який виконує основну функцію транспортування камера ендоскопа в порожнину труби; пневматичного приводу, який виконую роль рушійного приводу робота; та самого ендоскопа, який отримує зображення з камери.



Рисунок 4.1 – Принципова схема системи удосконаленого методу візуального контролю

Детальний опис кожної складової наводиться у наступних підрозділах.

##### 4.1 Робот «змія»

Конструкційна схема робота наведена на рисунку 4.2. Робот являє з себе гнучке тіло виконане у вигляді циліндричного гнучкого рукава, який загорнуто сам у себе. В якості матеріала може використовуватися різний тонкий еластичний матеріал (просочена тканина, силікон, щільний полімерний матеріал тощо). В розробленого в цій роботі робота використовується поліетилен товщиною 100 мкм. На кінці рукава розташована «головка» робота, в яку вмонтована відеокамера від ендоскопа. Відеокамера з'єднується з ендоскопом за допомоги кабелю живлення, який розташовано в середині рукава. Кабель укріплено дротом для можливості витягати робота з труби. Рух робота здійснюється за рахунок пневматичного приводу (компресора). При нагнітанні повітря у порожнину тіла робота, воно розпрямляється лінійно. Робот, начебто, розгортається сам із себе. Завдяки тому що, він розташовується в трубі

змійовика, він може рухатися тільки вперед. Після закінчення візуального контролю, з рукава запускається тиск, тіло робота за допомоги дроту витягується з труби змійовика. Завдяки гнучкості тіло робота може просуватися в трубі не зважаючи на різноманітні повороти та вигини.

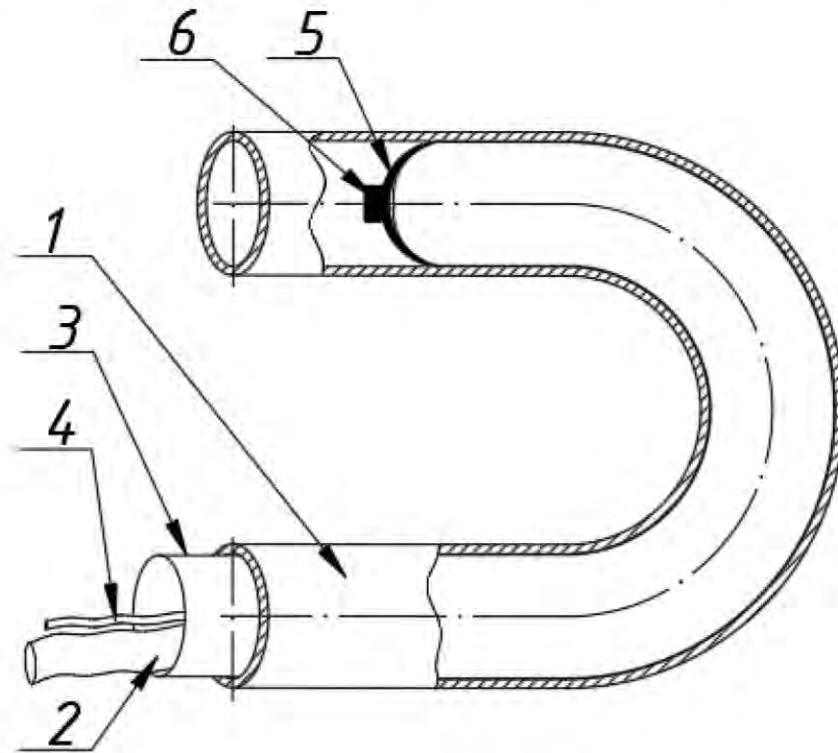


Рисунок 4.2 – Робот «змія»: 1 – труба змійовика; 2 – внутрішня стінка тіла робота; 3 – зовнішня стінка тіла робота; 4 – кабель живлення камери; 5 – голова робота; 6 – камера ендоскопа

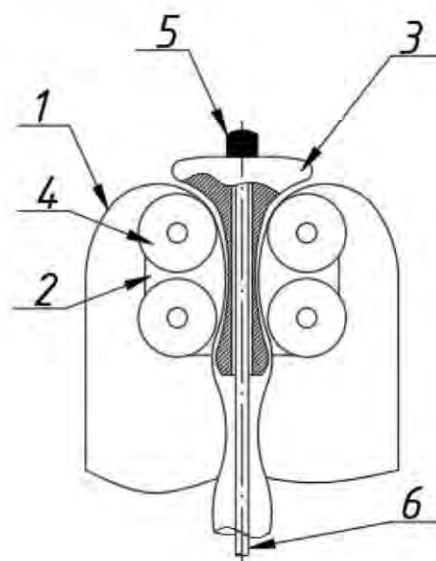


Рисунок 4.3 – Головка робота: 1 – тіло робота; 2 – внутрішній корпус з роликами; 3 – зовнішній корпус з закріпленою камерою; 4 – ролики; 5 – камера; 6 – кабель живлення камери

## 4.2 Пневматичний привід

Пневматичний привід (див. рис. 4.4) складається з:

- джерела стисненого повітря (компресор постійного струму 24 В);
- дроселя (регулятора витрати повітря);
- датчика тиску з функцією пресостата;
- виконавчого елемента (реле або електронний ключ);
- запобіжного скидного клапана;
- вимірювальних та допоміжних елементів (манометр, клапан ручного скидання, трубопроводи).

Принцип роботи установки.

При запуску тиск у ємності нижчий за заданий поріг, тому пресостат вмикає компресор. Повітря подається шлангом в рукав (тіло) робота змії через дросель, який обмежує витрату та забезпечує плавну зміну (зростання) тиску. При досягненні робочого тиску компресор автоматично вимикається.

У разі аварійного перевищення тиску запобіжний клапан відкривається і скидає надлишок повітря, запобігаючи руйнуванню тіла робота. Здуття (спорожнення) тіла робота здійснюється вручну через клапан скидання.

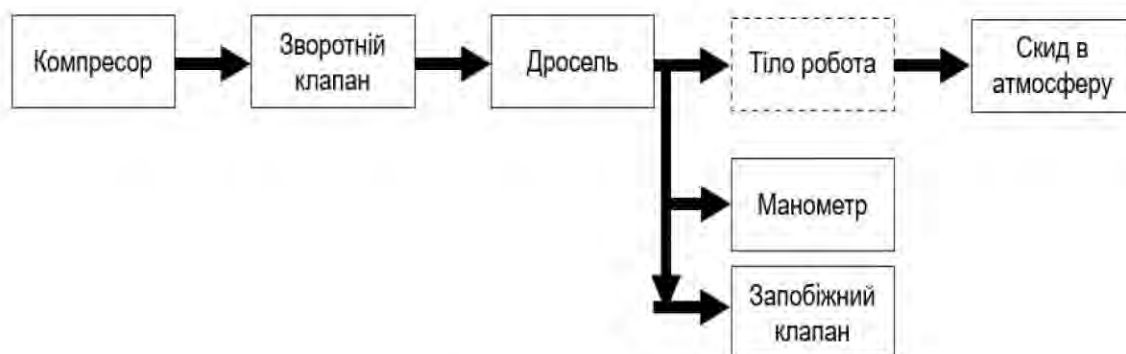


Рисунок 4.4. – Схема пневматичного приводу

## 4.3 Розрахунок тіла робота на порив

В зв'язку з тим, що тіло робота виконано з тонкого матеріалу, та постійно підвергається тиску та силам тертя при пресуванні виконуються розрахунки міцності матеріалу з якого він виготовлений на порив.

Розрахунок тиску на порив поліетиленового рукава.

Таблиця 4.1 – Основні характеристики матеріалів

№№ п/п	Назва	Величина	Од. вим.
1	2	3	4
	1. Рукав (плівка ПЕ)		

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4
1	Товщина плівки	0,0001	М
2	Діаметр рукава	0,05	м
3	Довжина рукава (максимальна для розрахунків)	2	м
4	Межа міцності матеріалу	10	МПа

Рукав поліетиленовий.

Окружна напруга в тонкостінній циліндричній оболонці:

$$\sigma_{\theta} = \frac{P \cdot D}{2t}, \quad (4.1)$$

де:

$\sigma_{\theta}$  – окружна напруга, Па;

$P$  – внутрішній тиск, Па;

$D$  – внутрішній діаметр циліндра, м;

$t$  – товщина стінки, м.

З формули (4.1) отримуємо формулу для розрахунку тиску розрива:

$$P_{\text{розр}} = \frac{2t \cdot \sigma_{\text{проч}}}{D}, \quad (4.2)$$

де:

$P_{\text{розр}}$  – тиск розриву, Па;

$\sigma_{\text{проч}}$  – межа міцності матеріалу, Па.

За формулою (4.2) розраховуємо тиск розриву:


$$P_{\text{розр}} = \frac{2 \cdot 0,0001 \cdot 10 \cdot 10^6}{0,05} = 40000 \text{ Па}. \quad (4.3)$$

В зв'язку з тим що рукав виконано спаюванням і він має вздовж усієї довжини спайний шов, то перерахуємо тиск розриву з урахування послаблення по зварному шву:

$$P_p = k_{\text{шва}} \cdot P_{\text{розр}} = 0,7 \cdot 28000 \text{ Па}, \quad (4.4)$$

де  $k_{\text{шва}}$  – коефіцієнт міцності шва (зазвичай 0,7-0,8).

У зв'язку з тим що рукав загорнутий усередину, і виходить двошарова конструкція, де внутрішній шар рухається щодо зовнішнього під час надування, тиск між шарами створює прагнення розсунути їх. Але



між поліетиленовими шарами є коефіцієнт тертя (ковзання). Тому частина тиску "втрачається" на подолання тертя, і не весь перепад тиску йде на розтяг оболонки.

Силу тертя рукава о внутрішні стінки труби, через те що рукав залишається «прилиплим» (без значного руху), можна вважати незначною і такою, що не впливає на напругу в матеріалі.

Перерахуємо тиск розриву з урахування сил тертя в середині рукава, що утворюються під час сковзання шарів рукава один по одному під час його вивертання.

Ефективний тиск на оболонку:

$$P_{\text{еф}} = P_{\text{внутр}} - \tau_{\text{тр}}, \quad (4.5)$$

де  $P_{\text{еф}}$  – ефективний (діючий) тиск, Па;

$\tau_{\text{тр}}$  – дотична напруга (опір тертя), Па.

Вираз для дотичної напруги тертя.

Дотичну напругу можна записати як:

$$\tau_{\text{тр}} = \mu \cdot P_{\text{конт}}, \quad (4.6)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя між шарами ( $\mu = 0,25$ );

$P_{\text{конт}}$  – контактний тиск між шарами, Па.

Якщо прийняти, що  $P_{\text{конт}} \approx P_{\text{внутр}}$ , отримуємо:

$$\tau_{\text{тр}} = \mu \cdot P_{\text{внутр}}. \quad (4.7)$$

Тоді ефективний тиск:

$$P_{\text{еф}} = P_{\text{внутр}} \cdot (1 - \mu). \quad (4.8)$$

Умова розриву оболонки – розрив настає, коли ефективний тиск досягає межі міцності оболонки:

$$P_{\text{еф}} = P_{\text{розр}}. \quad (4.9)$$

Отже фактичний внутрішній тиск, при якому відбудеться розрив, буде:

$$P_{\text{внутр}} = \frac{P_{\text{розр}}}{(1 - \mu)} = \frac{28000}{(1 - 0,25)} = 37333 \text{ Па (або 0,4 атм)}. \quad (4.10)$$

#### 4.4 Математичне моделювання роботи пневматичної системи робота

Математичне моделювання «системи» згідно рис. 4.4 та розрахункових параметрів що наведені у попередньому розділі виконуємо засобами математичної програми MatLab. Вихідні дані для моделювання наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані для моделювання

Параметр	Значення
Максимальний вміст ємності (тіла робота)	40 л
Допустимий тиск	0,4 атм
Робочій тиск	0.36 атм
Час надування	≈120 с
Живлення	24 В
Продуктивність насоса/компресора	35 л/мин

Головне рівняння динаміки тиску.

Використовується спрощене ізотермічне рівняння:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{V}, \quad (4.11)$$

де  $Q_{in}$  – витрата повітря, що надходить від насоса, л/с;

$Q_{out}$  – витрата повітря через клапан, л/с;

$V$  – обсяг резервуара, л.

Формула для Integrator — Pressure:

$$P(t) = \int \frac{Q}{V}. \quad (4.12)$$

Значення InitialCondition = 0,10 атм, щоб уникнути порожнього старту.

Двопозиційне керування з гістерезисом:

$$f(P) = \int \begin{cases} 1, & P < P_{on} \\ 0, & P > P_{off} \end{cases}, \quad (4.13)$$

де  $P_{on} = 0,3$  – нижній поріг (запобігає часті включення);

$P_{off} = 0,36$  – нижній поріг 0,4 атм з запасом 10%.

Номінальна витрата компресора (Constant – Qpump):

$$35 \frac{\text{л}}{\text{хв}} = \frac{35}{60} = 0,583 \text{ л/с}. \quad (4.14)$$

Формула для Product – PumpFlowRaw:

$$Q_{pump} = Q_{pump,nom} \cdot f(t), \quad (4.15)$$

де  $Q_{pump,nom} = 0,583$  л/с.

Суть: насос або подає номінальну витрату, або ні.

Обмеження витрати для плавного надування.

Блок Saturation – ThrottleLimit (дросель).

Потрібно досягнути 0,36 атм за 2 хв. За результатами моделювання отримано  $Q_{target} = 5,44$  л/хв. Переводимо:

$$Q_{target} = \frac{5,44}{60} = 0,0906 \text{ л/с}. \quad (4.16)$$

Інерція пневмонії та клапана.

Формула для блока Transfer Function – ThrottleSmooth:

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1}, \quad (4.17)$$

де  $\tau s = 0,4$ .

Умова відкриття запобіжного клапана.

Формула для Relational Operator – ReliefCheck:

$$Relief = \int \begin{cases} 1, & P > 0,38 \\ 0, & P < 0,38 \end{cases} \quad (4.18)$$

Інтенсивність протікання через відкритий клапан.

Формула для Gain – ReliefFlow:

$$Q_{out} = k_{relief} \cdot Relief = 0,2 \text{ л/с}. \quad (4.19)$$

Реальна витрата, що впливає на тиск.

Формула для Sum – FlowSum:

$$Q = Q_{in} - Q_{out}. \quad (4.20)$$

Формула для Gain – FlowToPressure:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{Q}{V} = \frac{1}{40} = 0,025. \quad (4.21)$$

Математична модель пневматичної системи роботи робота наведена на рисунку 4.5.

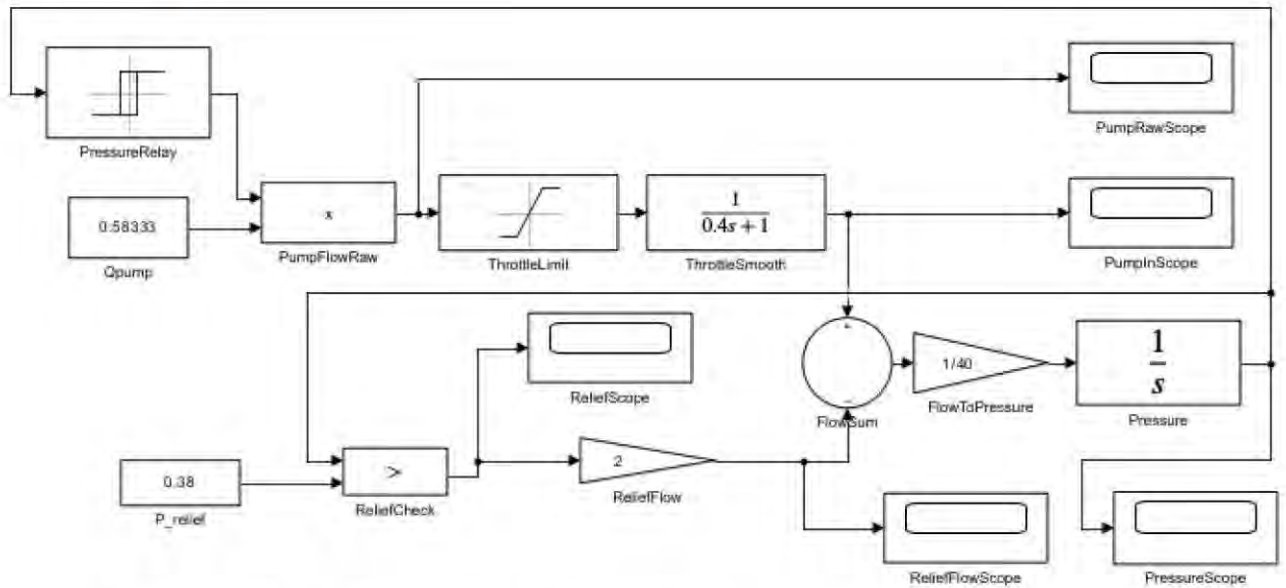


Рисунок 4.5 – Схема структурна математичної моделі роботи пневматичної системи робота

За результатами проведеного розрахунку та математичного моделювання, були побудовані графіки перехідного процесу зміни тиску в роботі (рис. 4.6) витрати повітря після компресора (рис. 4.7) та в самому роботі (рис. 4.8)

На осцилограмі (рис. 4.6) блок PressureScope (рис. 4.5), представлений перехідний процес зміни тиску в резервуарі об'ємом 40 л при включенні компресора з продуктивністю 35 л/хв та редуктора, що регулює тиск до 0,36 атм. Тиск  $P(t)$  зростає від початкового значення  $P_0$  до рівня, що встановився в околиці 0,36 атм, після чого стабілізується.

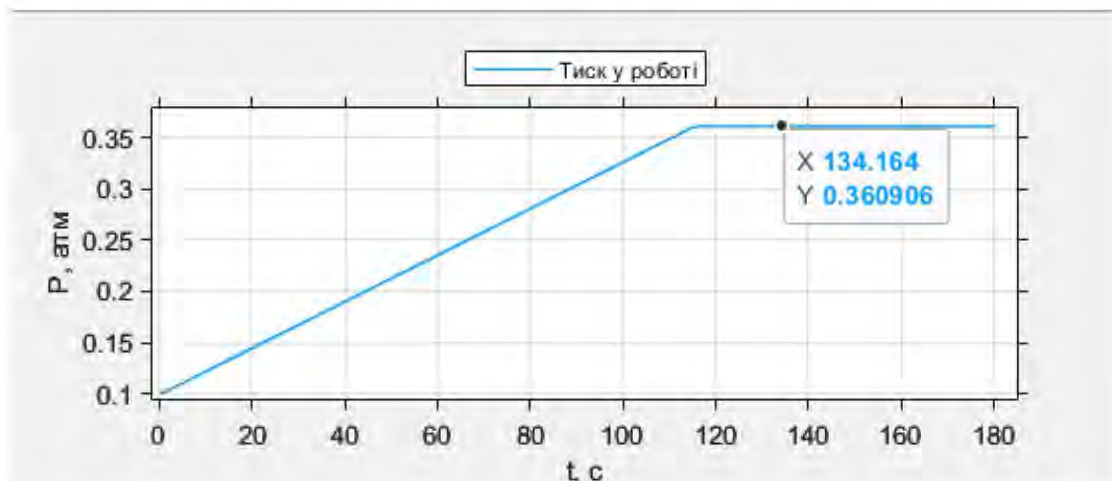


Рисунок 4.6 – Графік перехідного процесу зміни тиску повітря в резервуарі

На осцилограмі (рис. 4.7) PumpInScore (рис. 4.2) наведено перехідний процес за сумарною витратою повітря  $Q(t)$ , що надходить у резервуар робота за заданими умовами.

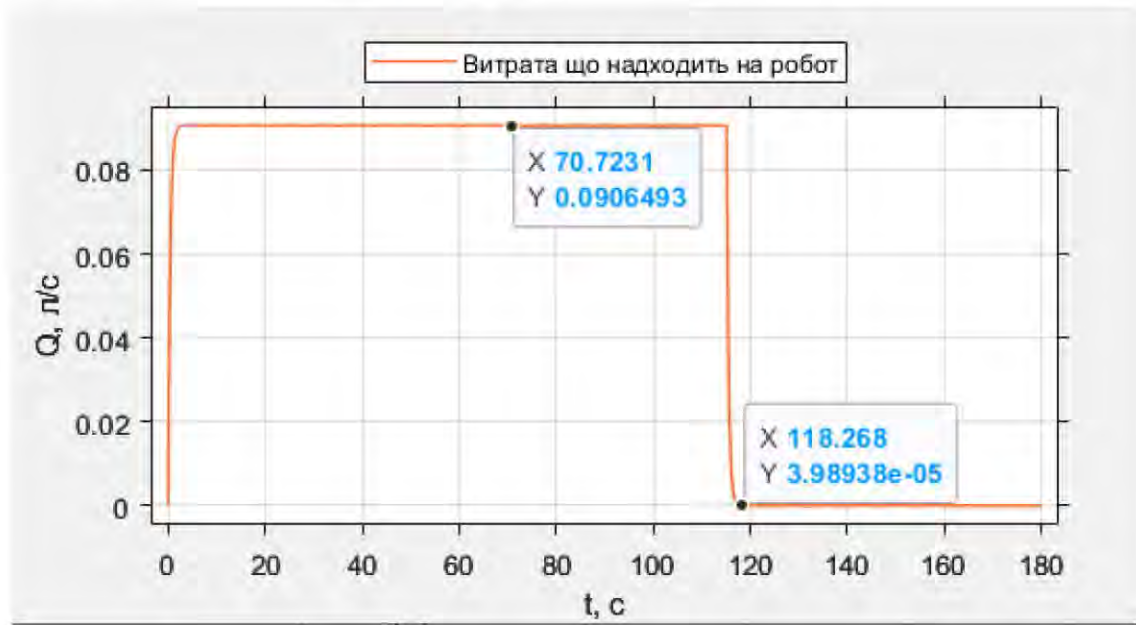


Рисунок 4.7 – Графік перехідного процесу зміни витрати повітря у роботі

На осцилограмі (рис. 4.8) PumpRawScore (рис. 4.2) наведено перехідний процес за сумарною витратою повітря  $Q(t)$ , що надходить у з компресора.

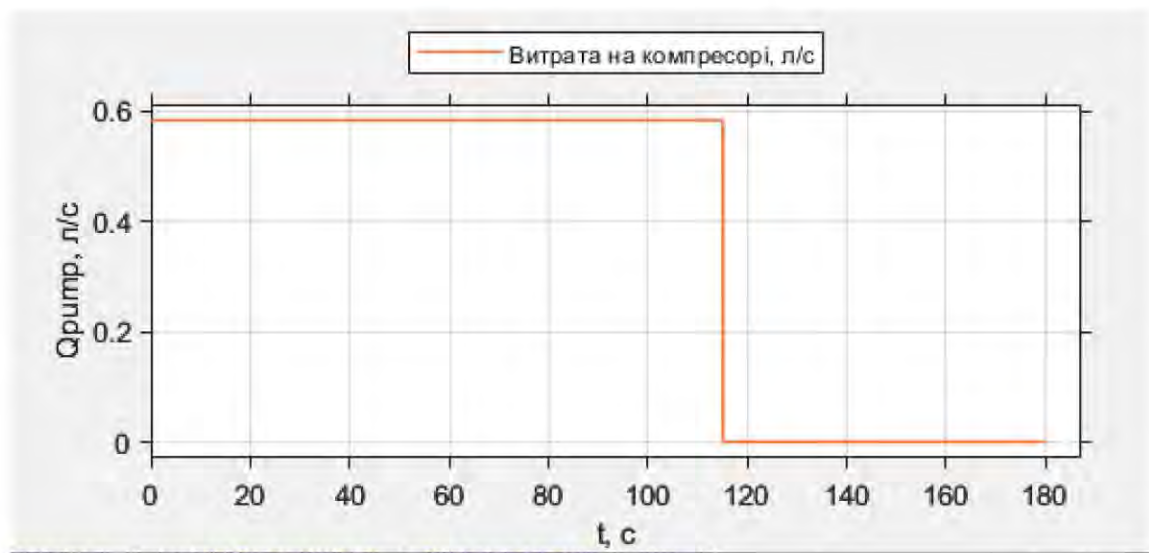


Рисунок 4.8 – Графік перехідного процесу зміни витрати повітря на компресорі

#### 4.5 Практична реалізація та оцінка ефективності удосконаленого методу контролю

Після проведення розрахунків і модулювань, а також після відбору відповідного обладнання було зібрано пробну модель робота змії.

Рукав (тіло) робота було виготовлене з поліетиленової плівки товщиною 100 мкм. Довжина робочого тіла становить 2 м, діаметр – 50 мм.

В якості відеокамери було використано камеру від існуючого ендоскопа.

Пневматичний привід було зібрано з:

а) компресор:

- тип - 24V Vacuum Pump 40LPM 12V№;
- напруга – 12/24 В;
- максимальний тиск – 1 атм;
- максимальна витрата повітря – 40 л/хв;

б) електронне реле тиску: Airtac Digital Pressure Switch 12–24V;

в) регулятор швидкості нагнітання: тип RE-02,G1/4.

Робоча версія пробної моделі робота змії наведена на рисунку 4.9.

В результаті було впровадження концепцію удосконаленого методу візуального контролю змійовика і таким чином вдалося реалізувати ендоскопічний метод з розробленою системою реалізує транспортування відеокамери ендоскопу в порожнину змійовика.



Рисунок 4.9 – Передня частина робота змії у дії

На рисунках 4.10 і 4.11 наведені дефекти які вдалося вияви в трубах.



4.10 – Утворення накипу на стінці труби

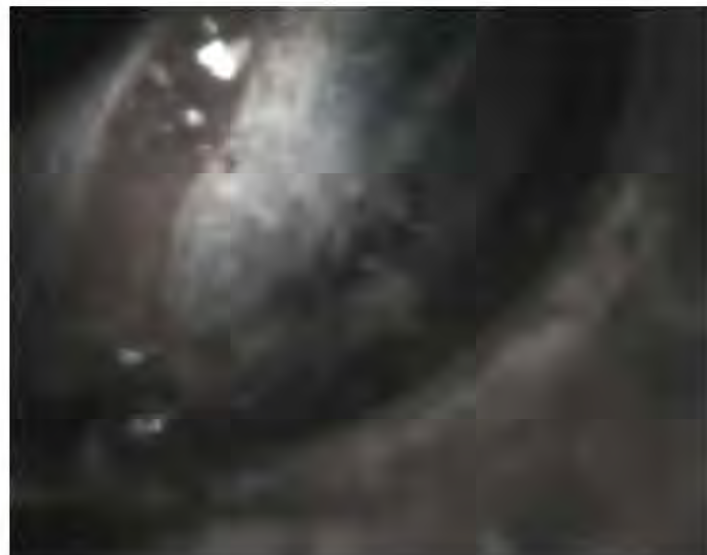


Рисунок 4.11 – Чужорідний предмет в порожнині труби

Суттєвою перевагою удосконаленого методу візуального контролю стану внутрішніх стінок зміювика холодильника для металургійного виробництва в комплексі з розробленою системою транспортування, а саме розробленим роботом змією, є те – що його можна використовувати не тільки в при обстеженні трубних елементів, але і в інших середовищах. Наприклад при обстеженні споруд, вентиляційних шахт, обстеженні завалів, тощо.



## 5 РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ, ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ РОБІТ

### 5.1 Техніко-економічне обґрунтування впровадження мехатронної системи візуального контролю

Економічна доцільність впровадження розробленої мехатронної системи візуального контролю визначається шляхом порівняння приведених витрат базового та проектного варіантів організації контролю технічного стану змійовика холодильника. Основним критерієм оцінювання є річний економічний ефект, що досягається внаслідок зменшення аварійних зупинок, скорочення простоїв обладнання та зниження витрат на ремонт.

#### 5.1.1 Розрахунок капітальних витрат

Загальні капітальні вкладення на впровадження мехатронної системи визначаються як сума витрат на окремі підсистеми:

$$K = K_{\text{п}} + K_{\text{с}} + K_{\text{н}}, \quad (5.1)$$

де  $K_{\text{м}}$  – витрати на пневматичну підсистему;

$K_{\text{с}}$  – витрати на сенсорну підсистему;

$K_{\text{н}}$  – витрати на монтаж і налагодження.

Таблиця 5.1 – Капітальні витрати на впровадження мехатронної системи

Стаття витрат	Вартість, грн
Пневматичний привід	32 000
Оптичні та допоміжні датчики	10 000
Монтаж і налагодження	20 000
<b>Разом</b>	<b>62 000</b>


#### 5.1.2 Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Річні експлуатаційні витрати включають амортизаційні відрахування, витрати на обслуговування та енергоспоживання. Амортизаційні відрахування визначаються за формулою:

$$A = \frac{K}{T_{\text{сп}}}, \quad (5.2)$$

де  $T_{\text{сп}}$  – нормативний термін служби системи, років.

При  $T_{\text{сп}} = 5$  років:


$$A = \frac{62000}{5} = 12400 \text{ грн/рік.} \quad (5.3)$$

Загальні річні експлуатаційні витрати визначаються:

$$C_{\text{експ}} = A + C_{\text{обс}}, \quad (5.4)$$

$$C_{\text{експ}} = 12400 + 6200 = 18600 \text{ грн/рік.} \quad (5.5)$$

### 5.1.3 Розрахунок річної економії витрат

Економія від зменшення витрат на ремонт змійовика визначається за формулою:

$$\Delta C_1 = (N_0 - N_1) \cdot C_{\text{рем}}, \quad (5.6)$$

де  $N_0$  і  $N_1$  – кількість аварій до і після впровадження системи;  
 $C_{\text{рем}}$  – середня вартість одного ремонту.

$$\Delta C_1 = (4 - 1) \cdot 234000 = 702000 \text{ грн.} \quad (5.7)$$

Економія від скорочення простоїв обладнання визначається:

$$\Delta C_2 = (T_0 - T_1) \cdot C_{\text{год}}, \quad (5.8)$$

де  $T_0$  і  $T_1$  – тривалість простою, год/рік;  
 $C_{\text{год}}$  – втрати за одну годину простою.

$$\Delta C_2 = (64 - 16) \cdot 20800 = 998400 \text{ грн.} \quad (5.9)$$

Загальна річна економія витрат:

$$\Delta C = \Delta C_1 + \Delta C_2 = 1700400 \text{ грн.} \quad (5.10)$$

### 5.1.4 Визначення економічного ефекту

Річний економічний ефект від впровадження мехатронної системи визначається за формулою:

$$E = \Delta C - C_{\text{експ}}, \quad (5.11)$$

$$E = 1700400 - 18600 = 1681800 \text{ грн/рік.} \quad (5.12)$$

### 5.1.5 Показники економічної ефективності

Коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень:

$$E_H = \frac{E}{K}, \quad (5.13)$$

$$E_H = \frac{1681800}{62000} = 27,1. \quad (5.14)$$

Оскільки нормативне значення  $E_{\text{норм}} = 0,15$ , умова економічної доцільності виконується.

Термін окупності капітальних вкладень:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_H} = 0,04 \text{ року}. \quad (5.15)$$

### 5.1.6 Узагальнююча таблиця економічної ефективності


Таблиця 5.2 – Основні економічні показники проекту

Показник	Значення
Капітальні витрати, грн	62000
Річна економія, грн	702000
Річний економічний ефект, грн	1700400
Коефіцієнт ефективності	27,1
Термін окупності, років	0,04

### 5.2 Охорона праці та безпека під час проведення діагностичних робіт

Проведення діагностичних робіт під час контролю технічного стану змійовиків у металургійному виробництві пов'язане з дією підвищено небезпечних і шкідливих виробничих факторів. До них належать високі температури обладнання, тиск у системах охолодження, наявність електричних установок, обмежений простір та складні умови доступу до об'єктів контролю. Тому забезпечення охорони праці є обов'язковою умовою виконання діагностичних робіт.

Перед початком контролю змійовиків необхідно провести організаційні заходи з безпеки праці: оформити наряд-допуск, виконати цільовий інструктаж персоналу та узгодити проведення робіт з оперативним персоналом цеху. До виконання діагностики допускаються лише працівники, які пройшли навчання з охорони праці та мають відповідну кваліфікацію.



Діагностичні роботи дозволяється виконувати лише після зупинки обладнання, зниження температури до безпечного рівня та повного скидання тиску в системі охолодження. Необхідно унеможливити раптовий пуск агрегатів шляхом блокування пускових пристроїв і знеструмлення електричних кіл, особливо у зонах індукційних та електродугових печей.

Під час застосування ендоскопічних та дистанційних засобів візуального контролю персонал повинен використовувати засоби індивідуального захисту: захисний одяг, каску, рукавиці, захисне взуття, а за потреби – діелектричні засоби.

Важливою умовою безпечного виконання робіт є дотримання ергономічних вимог до робочого місця оператора. Контроль повинен здійснюватися за достатнього освітлення, зручного розташування засобів керування та візуалізації, а також із дотриманням регламентованих перерв у роботі.



## ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі проведено аналіз технічного завдання та сучасних методів контролю стану теплообмінних елементів основними з яких є: ультразвукові методи контролю та візуально оптичні методи контролю. Встановлено що для контролю внутрішнього стану стінок змійовик підходить ендоскопічний метод, що є одним із різновидів ВМК.

Здійснено огляд конструкції та умов експлуатації змійовика холодильника та інших теплообмінних елементів у металургійному виробництві. Встановлено, що їхня експлуатація характеризується високими температурами, значними тепловими навантаженнями та безперервністю технологічних процесів.

Проаналізовано недоліки існуючих методів візуального контролю. Здійснено обґрунтування вибору та розроблена концепція удосконалення методу візуального контролю внутрішніх стінок змійовика. Ідеєю концепції є об'єднання ендоскопічного методу, який займає ключову позицію у ВМК, з використанням спеціального засобу доставки, пристрою або рухомого механізму, здатного транспортувати відеокамеру безпосередньо в глибину змійовика

Розроблено технічні рішення та модель системи візуального контролю, виконана практична реалізація розробленого методу та виконана його оцінка ефективності. Рішення базується на поєднанні ендоскопічного методу з розробленням системи яка реалізує транспортування відеокамери ендоскопу в порожнину змійовика. Суттєвою перевагою удосконаленого методу візуального контролю стану внутрішніх стінок змійовика холодильника для металургійного виробництва в комплексі з розробленою системою транспортування, а саме розробленим роботом змією, є те – що його можна використовувати не тільки в при обстеженні трубних елементів, але і в інших середовищах. Наприклад при обстеженні споруд, вентиляційних шахт, обстеженні завалів, тощо.

Прораховано і доведено техніко-економічне обґрунтування впровадження удосконаленого методу та розробленої системи візуального контролю. Який при незначних капітальних затрат дозволяє отримати значну економічну ефективність. Термін окупності капітальних вкладень на реалізацію методу становить 0,04 року. Проаналізовані умови при яких можуть відбуватися роботи з візуального контролю стану стінок змійовика та розроблені заходи щодо охорона праці та безпека під час проведення діагностичних робіт.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жаров В. С., Лялюк В. П., Дешко В. П. Технологія доменного виробництва : навч. посібник. Кривий Ріг : КГПІ, 1996. 352 с.
2. Fruehan, R. J. (Ed.). The Making, Shaping and Treating of Steel – Steelmaking and Refining Volume. 11th ed. Pittsburgh: AISE Steel Foundation, 1998. 1100 p.
3. The explosion of No. 5 Blast Furnace, Corus UK Ltd, Port Talbot. 8 November 2001. URL: <https://www.hse.gov.uk/pubns/web34.pdf>.
4. Індукційні печі: Навчальний посібник для студентів ВНЗ./ Козлов Г.О., Тополов В.Л., - Нікополь: НТ НМетАУ, 2008. 32 с.
5. Geerdes M., Chaigneau K. Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction. 4nd ed. Amsterdam: IOS Press, 2020.
6. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни "Сучасні методи моделювання та неруйнівний контроль" для здобувачів вищої освіти (другого магістерського) рівня зі спеціальності 104 – Фізика та астрономія. Ч.1. / Набережна О.О., Буря О.І. Кам'янське: ДДТУ, 2017.
7. Рішан О.Й. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: Курс лекцій для студентів спеціальностей: 7.092501 "Автоматизоване управління технологічними процесами" та 7.092502 "Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва" ден. та заочн. форм. навчан. К.: НУХТ, 2007. –162 с.
8. Білокур І.П. Дефектологія и неруйнівний контроль .– Київ: Вища шк., 1990. 207с.
9. Hellier, C. Handbook of Nondestructive Evaluation. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2013.
10. Coil type heat exchangers: principles and applications. – United Cooling Tower. – URL: <https://www.unitedcoolingtower.com/coil-type-heat-exchanger/>
11. Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник / [П. І. Стоєв, С. В. Литовченко, І. О. Гірка, В. Т. Грицина]. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. – 216 с.
12. В.І. Похмурський, М.С. Хома Корозійна втома металів та сплавів. Львів. Сполом. 2008. 300с.
13. ТУ У 14-96-016-98. Плити холодильні доменних печей.
14. ТУ У 305-0016876-001-95. Плити холодильні доменних печей.
15. Методичні вказівки до комп'ютерного практикуму по дисципліні "Цифрові системи керування й обробки інформації" (для студентів спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології») / Уклад. О. О. Сердюк. Краматорськ: ДДМА, 2018. 87 с.
16. Методичні вказівки до виконання контрольної роботи з дисципліни "Автоматизований електропривод" (для студентів спеціальності 7.092501) /Сост. О.В. Суботін. Краматорськ: ДДМА, 2006. 32 с.