

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

ТЕМА РОБОТИ

«МОДЕРНІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗАПАЛЮВАЛЬНО-ЗАХИСНИХ ПРИСТРОЇВ»

Здобувача вищої освіти
Бондаренка Юрія Олександровича
Освітня програма
«Автоматизоване управління
технологічними процесами»
(Спеціальність 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка»)

(підпис)

Науковий керівник:
к.т.н., доцент, Ківа І.Л.

(підпис)

Національна шкала _____
Кількість балів _____
Оцінка: ECTS _____

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри

Наталія ОМЕЦІНСЬКА

« ____ » _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Бондаренку Юрію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Модернізація автоматизованої системи запалювально-захисних пристроїв
керівник роботи: к.т.н., доцент, Ківа І.Л.
затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:
від « 2 » жовтня 2025 р. № 116
2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи: 5 грудня 2025р
3. Вихідні дані до роботи: Технічні дані системи розпалу та контролю полум'я промислового котлоагрегата, що працює на газі та мазуті, з використанням сучасних запалювальних пристроїв Hegwein і фотодатчиків полум'я DURAG, із забезпеченням резервного контролю та відповідності вимогам промислової безпеки. Номінальні параметри приймаються згідно з діючими нормами та технічною документацією підприємства.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Вступ. Теоретичний розділ. Дослідницько-аналітичний розділ. Проектно-рекомендаційний розділ. Охорона праці та навколишнього середовища. Загальні висновки по роботі. Список використаних джерел.
5. Перелік графічного матеріалу: графічний матеріал виконаний у вигляді мультимедійної презентації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	к.т.н., доцент, Ківа І.Л.		
2	к.т.н., доцент, Ківа І.Л.		
3	к.т.н., доцент, Ківа І.Л.		
4	к.т.н., доцент, Ківа І.Л.		

7. Дата видачі завдання 3 жовтня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи		Термін виконання етапів роботи	Заключний документ етапу
1	Вибір теми магістерської роботи, призначення керівника		до 08.09.2025	Затвердження переліку тем магістерських робіт та наукових керівників
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану магістерської роботи		до 15.09.2025	Список літературних (інформаційних) джерел, план роботи
3	Визначення об'єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми магістерського дослідження		до 22.09.2025	Текст вступу
4	Написання тексту магістерської роботи відповідно до її структури:		23.09.2025 – 10.11.2024	Текст розділів
	4.1	I розділ	23.09.2025 – 05.10.2025	
	4.2	II розділ	06.10.2025 – 20.10.2025	
	4.3	III розділ	21.10.2025 – 03.11.2025	
	4.4	IV розділ	04.11.2025 – 10.11.2025	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення		11.11.2025 – 14.11.2025	Роздатковий матеріал, презентація
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків		15.11.2025 – 21.11.2025	Список літературних джерел
7	Оформлення та попередній захист магістерської роботи		24.11.2025 – 28.11.2025	Магістерська робота, рішення кафедри про допуск до захисту
8	Внесення коректив та кінцеве редагування магістерської роботи		01.12.2025 – 05.12.2025	Магістерська робота
9	Реєстрація магістерських робіт на кафедрі		до 05.12.2025	Магістерська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт
10	Захист магістерської роботи		15.12.2025 – 26.12.2025	Рішення Екзаменаційної комісії про захист

АНОТАЦІЯ

Бондаренко Ю. О. Модернізація автоматизованої системи запалювально-захисних пристроїв– Рукопис.

Кваліфікаційна магістерська робота за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2025 рік.

Ця робота присвячена розробці та впровадженню модернізованої системи розпалу й контролю полум'я промислового котлоагрегата шляхом заміни застарілого обладнання (електродних запальників, систем Факел-2/3 та блоків БКП) на сучасні високонадійні пристрої DURAG та Hegwein. У роботі проаналізовано принципи горіння газу й мазуту, особливості формування факела, фізичні процеси детекції та роль автоматизованих систем безпеки у технологічних режимах котлів. Показано недоліки старих систем, їх обмежену чутливість, відсутність самодіагностики й високу ймовірність хибних спрацювань.

Запропонована модернізація передбачає впровадження спектрального фотодатчика DURAG, мікрофакельного запальника Hegwein та резервної системи контролю на базі фоторезисторів і контролера Simatic S7-1200, що забезпечує подвійне підтвердження наявності полум'я та підвищує відмовостійкість системи. Розроблено логіку розпалу, зупинки та аварійного відключення котла, а також алгоритми роботи у режимі деградації при виході з ладу основного датчика. Особливу увагу приділено вимогам охорони праці під час монтажу в пожежо- та вибухонебезпечних умовах, а також техніці безпеки при встановленні обладнання DURAG і Hegwein.

Ключові слова: розпал, полум'я, DURAG, Hegwein, фотодетектор, фоторезистор, котлоагрегат, автоматика, безпека, модернізація.

ABSTRACT

Bondarenko Yu. O. Modernization of the automated system of ignition and protection devices – Manuscript.

Qualifying master's thesis on specialty 174 " Automation, computer-integrated technologies and robotics". – V.I. Vernadskyi Taurida National University, Kyiv, 2025.

This work is devoted to the development and implementation of a modernized ignition and flame-control system for an industrial boiler unit by replacing outdated equipment (electrode igniters, Fakel-2/3 detectors, and BKP blocks) with high-reliability devices manufactured by DURAG and Hegwein. The work analyzes the physics of gas and fuel-oil combustion, flame formation processes, spectral detection principles, and the role of automated safety systems in boiler operation. The study highlights the limitations of obsolete ignition equipment, including low sensitivity, lack of self-diagnostics, and a high probability of false triggers.

The proposed modernization includes the integration of a DURAG spectral flame detector, a Hegwein microflame gas igniter, and a redundant flame-control system based on photoresistors and a Simatic S7-1200 controller. This configuration ensures double confirmation of flame presence and significantly increases the operational reliability of the boiler. The project develops ignition, shutdown, and emergency protection algorithms, as well as degraded-mode operation for cases when the primary DURAG sensor fails. Special attention is paid to occupational safety requirements during installation in fire- and explosion-hazardous environments, and to the safe handling of DURAG and Hegwein equipment during mounting and maintenance.

Keywords: combustion, flame, DURAG, Hegwein, photodetector, photoresistor, boiler unit, automation, safety, modernization.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ	10
1.1 Новітні запальовально-захисні пристрої	10
1.2 Загальні принципи системи розпалу	19
1.3 Застаріле обладнання системи розпалу котлів.	23
1.4 Висновки до розділу 1.....	43
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНИЦЬКО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	46
2.1 Роль запальовально-захисних пристроїв у теплоенергетиці.	46
2.2 Необхідність модернізації старої системи.	49
2.3 Технологічні процеси системи розпалу	66
2.4 Висновки до розділу 2.....	82
РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ	85
3.1 Недоліки системи DURAG.	85
3.2 Аварійна система контролю наявності полум'я.	87
3.3 Фізика горіння та детекції.	94
3.4 Алгоритм розпалу і зупину котла.....	105
3.5 Висновки до розділу 3.....	115
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	118
4.1 Техніка безпеки та охорона монтажі запальників HEGWEIN.....	118
4.2 Техніка безпеки та охорона монтажі системи DURAG.	121
4.3 Техніка безпеки та охорона праці при роботах у вибухонебезпечних зонах.	124
4.4 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	127
4.5 Висновки до розділу 4.....	130
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	132
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	135

ВСТУП

Забезпечення безпечної та стабільної роботи теплотехнічного обладнання є одним із ключових завдань сучасної енергетики. Умови експлуатації промислових котлоагрегатів ставлять високі вимоги до надійності систем розпалу, контролю полум'я та технологічних міжблокувань, оскільки будь-яке відхилення в роботі цих елементів може призвести до аварійної зупинки, втрати теплогенерації або виникнення небезпечних ситуацій. На фоні загального старіння енергетичної інфраструктури України та зростання вимог до екологічності й промислової безпеки модернізація систем розпалу набуває особливої актуальності. Необхідність переходу від застарілих електродних запальників, фотодетекторів Факел-2/3 та блоків БКП до сучасних високоточних систем зумовлена як моральною зношеністю обладнання, так і технологічними ризиками, що виникають у процесах розпалювання та стабілізації полум'я.

У центрі модернізації розглядається комплексний підхід на основі використання передових технологічних рішень фірм DURAG і Hegwein. Система DURAG забезпечує спектральний аналіз полум'я в ультрафіолетовому та інфрачервоному діапазонах, що гарантує високу чутливість, селективність і достовірність контролю горіння. Газові мікрофакельні запальники Hegwein забезпечують гарантоване та повторюване запалювання у широкому діапазоні технологічних режимів, що значно підвищує надійність роботи котлоагрегата. Інтеграція цих рішень дозволяє досягти оптимального балансу між безпекою, точністю контролю й технологічною гнучкістю.

Особливе значення в роботі приділяється фізиці процесів горіння, аналізу турбулентних потоків, властивостей газового та мазутного полум'я, а також механізмам його спектральної детекції. Саме розуміння фізичних процесів у топці дозволяє пояснити обмеження застарілих систем та обґрунтувати доцільність впровадження сучасних засобів контролю. У роботі також

розглянуто технологічні процеси розпалювання, зупинки та аварійного відключення котла, сформовано алгоритми роботи міжблокувань і детально проаналізовано небезпечні фактори, пов'язані з відсутністю полум'я або хибнодетекцією.

Окремим елементом проекту є створення резервної системи контролю полум'я на базі фоторезисторів та контролера Simatic S7-1200, що виконує дублювання спектрального датчика DURAG та забезпечує режим деградованої роботи у випадку відмови основного каналу. Такий підхід підвищує відмовостійкість системи розпалу та дає можливість запобігти технологічним зупинкам, зменшуючи ризики аварій та підвищуючи стабільність теплового процесу.

Значна увага приділяється питанням охорони праці під час монтажу та експлуатації обладнання у пожежо- і вибухонебезпечних середовищах. Правильна організація робіт, дотримання вимог вибухозахисту, використання спеціалізованих інструментів, засобів індивідуального захисту та контроль атмосфери є невід'ємною частиною безпечної експлуатації модернізованої системи.

Реалізація проекту вимагає комплексного технічного підходу, аналізу сучасних технологій, інтеграції обладнання різних виробників та всебічного врахування як інженерних, так і експлуатаційних аспектів. Результатом такої модернізації є підвищення надійності систем розпалювання, зменшення аварійних зупинок, зростання енергоефективності та відповідність сучасним нормам промислової безпеки.

Об'єкт дослідження: система розпалу і контролю полум'я котлоагрегата.

Предмет дослідження: технологічні та апаратні рішення модернізації системи розпалу на базі обладнання DURAG і Hegwein з використанням резервної системи детекції.

Методи дослідження: аналіз літературних джерел, фізичне моделювання процесів горіння, дослідження характеристик фотодетекції, аналіз надійності та побудова алгоритмів автоматизації.

Практична цінність: модернізація системи розпалу підвищує безпеку котлоагрегата, зменшує ймовірність аварійних зупинок, покращує енергоефективність та забезпечує відповідність сучасним стандартам експлуатації.

Наукова новизна: запропоновано комплексний підхід до підвищення надійності системи контролю полум'я шляхом інтеграції спектрального та фоторезистивного каналів детекції, а також реалізації режиму деградованої роботи на базі ПЛК.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Новітні запалювально-захисні пристрої

Сучасний етап розвитку енергетики характеризується підвищеними вимогами до надійності, безпеки та ефективності експлуатації котельного обладнання, що працює на газовому та рідкому паливі. Теплоелектроцентралі, промислові теплогенератори й котельні системно переходять до модернізованих схем керування та автоматизації, адже морально і фізично застарілі системи розпалу та контролю полум'я стають критичним фактором ризику, здатним призвести до аварій, позапланових простоїв та значних економічних втрат. Значна частина паливної автоматики на існуючих об'єктах була розроблена десятиліття тому і не відповідає сучасним вимогам безпеки, що регламентуються актуальними міжнародними стандартами. Зношені системи типу Факел-2, Факел-3, БКП-2Р, БЗР та аналогічні конструкції, Рисунки 1.1,1.2,1.3, хоч і продемонстрували свою надійність у минулому, але технологічно та конструктивно не відповідають сучасним принципам безпечної експлуатації теплотехнічних установок, оскільки не забезпечують достатнього рівня діагностики стану та відмовостійкості.



Рис 1.1 Блок БКП

Виведення з експлуатації застарілих систем розпалювання та впровадження сучасних рішень, таких як пальникові модулі Hegwein та детектори полум'я DURAG, є не лише питанням технічного розвитку, а й безпековою необхідністю. Сучасне обладнання оснащується інтелектуальними алгоритмами діагностики, електронними системами самоконтролю, спектральними каналами виявлення полум'я та можливістю інтеграції в автоматизовані системи управління технологічними процесами. Це дозволяє істотно підвищити точність контролю, скоротити час розпалу, мінімізувати ризики вибухових ситуацій і виключити випадки фальшивого підтвердження факела. На фоні підвищення вартості енергоресурсів та зростання вимог до екологічної безпеки впровадження точних і стабільних систем контролю полум'я стає ключовим чинником підвищення ефективності виробництва [16].

Однак, навіть використання сучасних високотехнологічних фотодетекторів не виключає можливості їх відмови під впливом високих температур, ударних теплових навантажень, оптичного засмічення, вібрації та тривалого впливу ультрафіолетового випромінювання. У випадку відмови основного каналу контролю полум'я обладнання повинно переходити в аварійний режим. Проте не завжди допустимо повністю припинити роботу технологічної установки, особливо якщо йдеться про об'єкти критичної інфраструктури, такі як ТЕЦ або центральні теплопостачальні вузли. У такій ситуації актуальним стає питання створення резервних механізмів підтвердження наявності факела, що забезпечать тимчасову відмовостійкість системи до моменту відновлення основного каналу. Це стосується не лише підвищення технологічної надійності, але й забезпечення безперервності енергопостачання споживачів.

Актуальність роботи також підсилюється необхідністю інтеграції резервних схем з існуючими системами автоматизації, без порушення вимог до безпеки та без зниження рівня SIL. Розробка простої, відмовостійкої, технологічно доступної аварійної системи підтвердження полум'я на основі

фоторезистивних сенсорів, з реалізацією логіки через промисловий контролер та захистом датчиків від перегріву, дозволяє підвищити загальну надійність процесу розпалу та забезпечити стабільну роботу котельної установки навіть у випадку відмови основного детектору. Враховуючи глобальні тенденції цифровізації промисловості та перехід до адаптивних, діагностованих систем керування, запропонований підхід повністю відповідає стратегічним напрямкам розвитку теплоенергетики і дає змогу підвищити технічний рівень експлуатації обладнання з мінімальними витратами.

Компанія DURAG є одним із провідних світових виробників промислових систем контролю та управління процесами горіння, технологічного полум'я та пов'язаних з ним параметрів. Продукція DURAG використовується на теплоенергетичних та промислових об'єктах, включаючи теплові електростанції, високотемпературні печі металургійної промисловості, установки спалювання в нафтохімічній та газопереробній галузі, котельні великої потужності, сміттєспалювальні комплекси та інші енерготехнологічні системи. Основною особливістю рішень DURAG є їх орієнтація на безпечну, безвідмовну та автоматизовану роботу в умовах агресивних середовищ, високих температур, підвищеної запиленості та вібрацій, де традиційні методи контролю і безпеки не забезпечують необхідного рівня надійності.

Системи DURAG історично формувалися як рішення для моніторингу і контролю процесів згоряння. Компанія спеціалізується на датчиках полум'я, ультрафіолетових та інфрачервоних сенсорах контролю горіння, інтелектуальних блоках обробки сигналів, а також системах запалювання і контролю факельних установок. Основний принцип побудови обладнання полягає у застосуванні стійких до перешкод каналів детектування, ізоляції логічних та силових траєкторій, високочутливої електроніки із захистом від зовнішніх завад, а також резервування каналів діагностичного контролю. Це робить апаратуру DURAG ключовим компонентом систем промислової

безпеки, де від правильного і швидкого розпізнавання полум'я залежить безпечна робота технологічної установки [25].

На практиці продукція DURAG охоплює декілька напрямків, серед яких найбільш поширеним є контроль наявності полум'я. Для цього використовуються високочутливі сенсорні головки, здатні розрізняти характер спектрального випромінювання залежно від типу палива. Наприклад, ультрафіолетові канали більш ефективні при детекції газового полум'я, тоді як інфрачервоні – при спалюванні рідкого палива або вугілля. Деякі сучасні моделі комбінують ці технології, що дозволяє досягти підвищеної чутливості в умовах змінного складу палива або нестабільної роботи форсунок. Сенсори здатні працювати в умовах високої температури, при значному рівні запиленості або димності, а система обробки сигналу здійснює фільтрацію перешкод і визначає лише характерне для горіння випромінювання.

Окремою особливістю є система самодіагностики. Усі пристрої DURAG мають вбудовані канали контролю працездатності та здатні виявляти зниження чутливості сенсора, пошкодження кабельної лінії, деградацію оптики, а також блокувати роботу пальника в разі порушення нормальної роботи. Це дозволяє запобігати аваріям на ранній стадії та забезпечує роботу обладнання у відповідності до міжнародних стандартів безпеки. Логіка роботи налаштована таким чином, щоб будь-яка сумнівна сигналізація трактувалася як потенційна небезпека з переходом системи в безпечний стан (fail-safe).

Продукція DURAG також включає в себе спеціалізовані блоки керування полум'ям. Це не лише сенсори, але і процесорні модулі зі схемами аналізу сигналу, виконанням алгоритмів контролю, журналюванням подій та передачею даних на системи автоматизації. Використовується модульна архітектура, що дозволяє гнучко інтегрувати обладнання у системи керування різного рівня – від локальних шаф управління пальником до комплексних DCS/SCADA-комплексів. Системи DURAG підтримують

промислові протоколи зв'язку, що полегшує їхню інтеграцію у сучасну інфраструктуру автоматизації.

Широко застосовуються також системи непрямого контролю параметрів згоряння, такі як аналіз газів, температури, димності, іскроутворення та інші показники. Компанія пропонує рішення для моніторингу пилогазових потоків, параметрів димових газів і викидів, що дозволяє реалізувати концепцію екологічно чистого спалювання із мінімальними викидами шкідливих речовин. У технологічних установках високих вимог до екології ці системи дозволяють не тільки контролювати стан полум'я, але й активно керувати режимами подачі повітря та палива з метою досягнення максимально сталого та економічного процесу згоряння.

Особливу увагу у філософії DURAG приділено роботі у важких умовах. У промисловій експлуатації обладнання часто зазнає впливу теплових ударів, забруднень, агресивного середовища, а також динамічних навантажень від пульсації факела і турбулентних потоків газу. Відповідно, конструктив систем передбачає міцні корпуси, термостійкі матеріали, захищені кабельні вводи, вибухозахисні виконання, а також оптичні системи промивання або продувки повітрям, які запобігають забрудненню оптичного каналу. Такі рішення дозволяють застосовувати обладнання навіть у важких умовах коксохімічних виробництв, цементних печей, котлів високого тиску і газофакельних енергетичних установок.

Таким чином, продукція DURAG представляє собою високотехнологічні системи, призначені для комплексного забезпечення безпеки та контролю процесів горіння. Вони дозволяють автоматизувати запуск і роботу пальників, забезпечувати контроль стабільності полум'я, здійснювати діагностику та попереджати аварії, а також підвищують енергоефективність виробництва. Саме завдяки поєднанню інженерної надійності, глибокого розуміння фізики згоряння та високого рівня автоматизації обладнання DURAG вважається однією з найбільш передових систем контролю полум'я та процесів горіння у промисловості. У багатьох

випадках його застосування є обов'язковою вимогою для забезпечення відповідності міжнародним стандартам у сфері промислової безпеки та охорони довкілля [33].

Компанія Hegwein є спеціалізованим виробником промислових систем запалювання газу і рідкого палива, що проектується для роботи в умовах високої теплової напруги, інтенсивного теплового випромінювання, ударних навантажень і змінного складу горючого середовища. Будучи частиною DURAG Group, Hegwein зберігає власну технологічну нішу, зосереджену саме на стартових етапах процесу горіння — ініціації полум'я, стабілізації факела і забезпеченні гарантованого розпалу навіть у найскладніших технологічних сценаріях, де будь-яка затримка або відмова може призвести до аварійної ситуації. Обладнання Hegwein використовується в енергетичних котлах великих електростанцій, у високотемпературних печах металургії та нафтопереробки, у системах факельного спалювання, у промислових сушильних установках і на технологічних лініях, де необхідний безпечний, керований і стабільний старт горіння.

Основна концепція обладнання Hegwein полягає в тому, що запалювання промислового пальника має відбуватися незалежно від коливань параметрів середовища, наявності забруднень, зміни структури повітряно-паливної суміші та впливу сторонніх факторів. З цією метою запальники Hegwein поєднують високу енергетичну концентрацію іскрового імпульсу, правильну геометрію факела запалювання, оптимізовану форму подачі повітря, а також застосовують спеціалізовані матеріали, здатні витримувати пряме теплове випромінювання від основного пальника. Конструкція запальника передбачає можливість довготривалої роботи в зоні високих температур, частих термічних циклів і наявності агресивних продуктів згорання, що робить його істотно відмінним від побутових і навіть стандартних промислових електродних рішень.

Головною перевагою Hegwein є реалізація стабільного факела розпалу, який з одного боку має достатню енергію та температуру для ініціації

згоряння основного палива, а з іншого — залишається контрольованим і безпечним в автоматичному режимі. За рахунок точного дозування газу і повітря всередині корпусу запальника формується стійке полум'я, яке зберігає необхідні характеристики у широкому діапазоні тисків і температур. Це особливо важливо у великих котлах і печах, де газова суміш формується у турбулентних потоках і де звичайні електродні системи мають схильність до зриву полум'я або нестабільного запалювання при несприятливих умовах.

Електрична частина запальників Hegwein відрізняється високою енергоємністю іскрового розряду, використанням спеціальних трансформаторів і системою електричної ізоляції, яка гарантує безпеку персоналу та обладнання. Пристрій забезпечує повторні іскрові імпульси у випадку первинного зриву спалаху, підтримуючи задану частоту і потужність розряду без перегріву і деградації електродів. Відпрацьована конструкція електродного вузла мінімізує контакт робочої частини з продуктами горіння, збільшуючи довговічність. Окрім того, передбачена можливість ревізії електродів та їхньої заміни без демонтажу всього пальника, що є важливим з точки зору експлуатаційної доступності [47].

Механічна частина системи має посилену конструкцію, виконану із жаростійких сталей, легованих сплавів та керамічних ізоляторів, що забезпечують тривалу роботу навіть у зонах розігріву понад тисячу градусів. Особливу увагу приділено герметичності вузлів, стійкості до високого тиску і відмовостійкості у присутності конденсатів або частинок механічних домішок, які можуть потрапляти на елементи пальника під час тривалого простою системи або в умовах експлуатації у важких середовищах. Конструкція дозволяє як ручний, так і автоматичний контроль подачі газу запальника, інтеграцію з блоками контролю полум'я і використання різних сценаріїв пуску, включно з режимами попередньої продувки та захисного блокування у випадку відсутності підтвердження полум'я.

Важливою особливістю виробів Hegwein є інтеграція із системами контролю полум'я DURAG або іншими сертифікованими системами

моніторингу, що дозволяє в автоматичному режимі підтверджувати факт наявності або відсутності горіння. Використання незалежного датчика полум'я в поєднанні із запальником забезпечує повний цикл безпечного запуску: ініціацію іскри, стабілізацію запального факела, перевірку присутності полум'я і команду на відкриття основної газової арматури лише після підтвердження стабільного горіння. У разі невдалого запалювання система негайно вимикає подачу газу, виконує продувку і повторює послідовність або переходить у режим аварійного блокування.

Слід відзначити і той факт, що Hegwein створює рішення не тільки для стандартних пальників, але й для спеціалізованих умов, включно з запалюванням у печах спалювання відходів, де газові суміші мають непередбачуваний склад, наявність агресивних компонентів та плаваючий коефіцієнт надлишку повітря. У таких середовищах електродні системи часто деградують, а стандартні пальники не здатні забезпечити гарантоване займання. Hegwein же реалізує поєднання іскрового та факельного підходів, створюючи локальний стійкий факел, який у змінних умовах забезпечує повторюваний і контрольований запуск великого пальника.

В цілому, обладнання Hegwein є ключовим компонентом сучасних високонадійних енерготехнологічних комплексів, де запуск горіння не допускає компромісів і має бути гарантованим при будь-яких умовах. Енергоефективність, термостійкість, автоматизація, системний контроль, стабільність полум'я і захист від аварійних ситуацій — усе це визначає місце продукції Hegwein у промисловій теплотехніці як еталонного рішення для задач розпалу і підготовки полум'я. Саме завдяки такій філософії продукція Hegwein стала одним із стандартів для галузей, де безпечний старт горіння є критичною умовою експлуатації установки, а відмова системи розпалу може призвести до технологічної аварії або вибуху.

1.2 Загальні принципи системи розпалу

Системи розпалу в промислових установках є ключовим елементом технологічного циклу спалювання газу або рідкого палива та забезпечують безпечний і надійний запуск основного пальника. У сучасних енергетичних комплексах, котлах великої потужності, печах та термічних агрегатах безвідмовна робота системи розпалу виступає критично важливою умовою для всього процесу, оскільки саме початкова фаза займання визначає подальшу стабільність горіння, рівень вибухозахисту і можливість роботи обладнання в автоматичному режимі. Принципи побудови таких систем базуються на глибокому розумінні фізики горіння, динаміки повітряно-паливних сумішей, безпекових стандартів та вимог до безперервної роботи промислових об'єктів, де кожна відмова може привести до значних економічних втрат або навіть аварійної ситуації.

Будь-яка система розпалу має виконувати декілька фундаментальних функцій. Насамперед, вона повинна створити точкове джерело високої температури, достатньої для ініціювання хімічної реакції горіння між паливом і повітрям. Традиційно для цього застосовуються два основні методи: іскровий електричний розряд, який забезпечує миттєвий локальний нагрів газової суміші, та факельний запал, при якому формується самостійний стабільний запальний факел із власним паливо-повітряним трактом. Обидва підходи базуються на здатності створити початкове ядро полум'я, яке далі передається на основний потік палива і забезпечує перехід горіння у стійкий режим. Вибір між ними визначається потужністю установки, умовами експлуатації, параметрами середовища та вимогами до надійності [39].

Надійний розпал можливий лише у разі забезпечення відповідної концентрації палива і повітря у зоні займання. Якщо суміш є надто бідною або надто збагаченою паливом, процес не відбудеться, навіть за наявності потужного джерела займання. Тому системи розпалу тісно пов'язані із

системою керування повітрям і газом, а також із процедурами підготовки камери до розпалу. Ключовим моментом є попередня продувка топки, що забезпечує видалення залишків неперегорілої газової фази, вибухонебезпечних продуктів або пилогазової суміші. Продувка виконується відповідно до норм повітряного обміну, і лише після досягнення безпечної концентрації кисню і газу система дозволяє подачу запального палива.

Фізика процесу розпалу передбачає формування запалювального ядра, яке повинно перевищити критичну температуру займання суміші та утримуватися достатньо довго, щоб горіння стало самопідтримуваним. У промислових умовах факел розпалу має справу з турбулентними потоками газу, локальними рециркуляційними зонами, значним градієнтом швидкостей і високою тепловою інерційністю конструкцій. При наявності великої кількості повітря в зоні пальника існує ризик здування початкового факела або його зриву, що вимагає спеціальних рішень для стабілізації полум'я. Саме тому сучасні системи розпалу застосовують регульовану подачу первинного повітря, оптимізовану геометрію запального пальника та використання спеціальних стабілізаторів потоку, які формують локальну рециркуляційну зону зниженої швидкості. У такій зоні полум'я отримує можливість укорінитися та поширитися на основний факел.

Ключовим елементом сучасних систем розпалу є система контролю полум'я. Вона працює у тісній взаємодії з логікою безпеки установки. Наявність полум'я повинна бути підтверджена чітким сигналом з датчика, що здатен розрізнити саме фактичне горіння від паразитних або фонових сигналів. Для цього використовуються оптичні датчики УФ- та ІЧ-спектру, Рисунок 1.4, технічні характеристики представлені у Таблиці 1.1, іонізаційні електроди або комбіновані рішення. Промисловий рівень безпеки вимагає, щоб будь-яке сумнівне або нестабільне показання сприймалося системою як відсутність полум'я, що веде до негайного перекриття подачі газу. Затримки у діагностиці можуть призвести до накопичення вибухонебезпечної суміші та

подальшого вибуху, тому реакція системи повинна бути миттєвою і гарантованою.



Рис 1.4 Оптичний датчик DURAG

Таблиця 1.1.

Технічні характеристики оптичного датчика DURAG

Параметр / властивість	Характеристика
Робочий режим	Переривчастий, безперервний, режим тривалої роботи без постійного контролю
Спектральний діапазон	Ультрафіолетовий (UV), видимий (VIS) або інфрачервоний (IR), залежно від моделі
Поле зору (кут)	Близько 6°
Діапазон робочих температур	Від -20 °C до +60 °C (стандартне виконання)
Ступінь захисту корпусу	IP65 або IP67
Варіанти підключення	Кабельне або штекерне з'єднання; можливість монтажу у візирну трубу
Види сумісного палива	Газ, мазут, вугілля, деревина, інші види органічного палива
Наявність самодіагностики	Передбачена (при роботі зі спеціальним блоком керування)
Галузі застосування	Промислові котли, печі, пальникові пристрої, установки спалювання газу, мазуту, твердого палива
Тип контролю полум'я	Фотоелектричний ультрафіолетовий/інфрачервоний контроль

Оскільки запалювання у великих установках здійснюється в умовах високих температур, забруднень і вібрацій, конструкція запальних пристроїв

повинна забезпечувати довговічність, ремонтпридатність та стійкість до корозійних і механічних факторів. Матеріали вибираються з урахуванням тривалої роботи у зоні дії відкритого полум'я, прогріву металу до пластичних температур, наявності агресивних газів і можливості теплових ударів при циклічному запуску. Усі елементи — від електродів і сопел до корпусів і кабельних вводів — мають бути екрановані, захищені і розраховані на багаторічний ресурс без втрати характеристик.

Організаційно і логічно система розпалу включає послідовність операцій, що чітко регламентовані. Спочатку відбувається перевірка готовності системи, перевірка тиску газу і наявності повітряного потоку. Потім камера продувається, після чого подається запальне паливо і включається іскрова або факельна система. Після появи стабільного полум'я датчик підтверджує горіння, і лише тоді система відкриває основний газовий клапан. Якщо протягом заданого часу полум'я не підтверджено, система блокує процес, перекриває газ, повторює продувку і формує аварійний сигнал. У випадку гасіння полум'я під час розпалу або вже після входу в режим система негайно виконує відключення, що властиво концепції безпечного відмовного режиму [28].

Говорячи про сучасні тенденції, системи розпалу еволюціонують у напрямках цифровізації, самодіагностики та підвищення рівня функціональної безпеки. Інтелектуальні контролери отримують дані від декількох каналів датчиків, аналізують характеристики полум'я, фільтрують паразитні сигнали і можуть класифікувати типи збоїв. Це дозволяє запобігти хибним спрацьовуванням та забезпечити стабільність у складних умовах. Одночасно збільшується частка обладнання, сертифікованого за стандартами SIL, що підтверджує відповідність функціональній безпеці в критичних застосуваннях. Окрім того, пропонується інтеграція технологій дистанційного моніторингу та предиктивного обслуговування, коли система здатна завчасно сигналізувати про деградацію електродів, засмічення каналів повітря або зниження чутливості фотодатчика.

Таким чином, загальні принципи роботи систем розпалу в промислових умовах формуються на основі поєднання термодинамічних законів, процесів тепломасообміну, хімічної кінетики та строгих вимог промислової безпеки. Їхнє завдання полягає не просто у створенні іскри або полум'я, а у забезпеченні контрольованого запуску енерготехнологічного процесу з можливістю автоматичного підтвердження, контролю і захисту на кожному етапі. У сучасних умовах такі системи виступають невід'ємною частиною промислової автоматики, задаючи стандарт надійності, повторюваності та безпеки при роботі з горючими середовищами.

1.3 Застаріле обладнання системи розпалу котлів.

Датчик полум'я типу «Факел-2» належить до категорії промислових приладів для виявлення та контролю наявності полум'я у топкових камерах, газових пальниках та теплотехнічних агрегатах різного призначення. Його застосування поширене у промислових котельнях, теплогенераторних установках, сушильних апаратах, технологічних печах малої та середньої потужності, а також у газових пальникових системах, де потрібен порівняно недорогий і достатньо надійний спосіб підтвердження факту горіння. У своїй основі «Факел-2» є фотоелектричним сенсором, що реагує на світлове випромінювання полум'я, переважно у видимому та близькому спектральному діапазоні. Завдяки використанню світлочутливого елемента, цей прилад визначає наявність або відсутність процесу горіння шляхом аналізу характеру світлового сигналу, який утворюється при згорянні газового палива.

Фізичний принцип роботи «Факел-2» полягає у фіксації зміни світлового потоку, який надходить на світлоприймач. Під час горіння газу утворюється інтенсивне електромагнітне випромінювання, що має характерні пульсації та спектральну структуру. Датчик сприймає частину цього випромінювання, і перетворює його у електричний сигнал, який після обробки інтерпретується як підтвердження наявності стабільного полум'я.

На відміну від складніших ультрафіолетових або комбінованих датчиків, «Факел-2» працює у простішому принциповому діапазоні, що визначає його функціональні можливості і обмеження. Система аналізу світлового сигналу виконує базову фільтрацію перешкод, проте при відсутності спеціальних спектральних фільтрів чутливість датчика залежить від умов освітлення, чистоти оптичного каналу, наявності сторонніх джерел світла або відблисків у камері згоряння.

Важливою особливістю роботи «Факел-2» є його конструктивна простота і невисока вартість, що обумовлює широке застосування, особливо у вітчизняних енергетичних та промислових системах, де існує потреба у недорогому контролі полум'я. Прилад має порівняно простий оптичний вузол, захисний кожух, світлочутливий елемент та вихідний каскад формування сигналу. Вихід датчика, як правило, представляє собою електричний сигнал дискретного або аналогоподібного характеру, що слугує командою для системи автоматки пальника щодо підтвердження або відсутності горіння. У промисловій практиці датчик інтегрується до систем релейного захисту або до простих регуляторів і блоків керування, що не потребують складної логіки сигналів чи цифрових інтерфейсів.

Експлуатаційні властивості «Факел-2» багато в чому визначаються умовами його встановлення. Прилад потрібно орієнтувати безпосередньо на зону горіння, що забезпечує пряме надходження випромінювання від факела на фоточутливий елемент. Це означає, що оптичний канал повинен бути захищений від забруднення сажею, пилом і продуктами конденсації. У реальних умовах на поверхні оглядового вікна часто накопичуються нашарування, які знижують чутливість датчика та можуть призвести до хибного спрацювання або відсутності сигналу про наявність полум'я. Саме тому технічні регламенти вимагають регулярного обслуговування, очищення оптики та перевірки працездатності сенсора. Це відрізняє даний пристрій від сучасніших систем, що мають автоматичне продування оптичної зони або електронну самодіагностику [15].

Ще одною характерною властивістю «Факел-2» є залежність його роботи від спектрального складу полум'я. Оскільки датчик сприймає видиме випромінювання, він працює коректно при спалюванні природного газу або рідкого палива з характерним стабільним факелом. Однак в умовах, де застосовується ультрачистий газ або суміші з низькою яскравістю горіння, прилад може втратити стабільність або не розпізнати слабкопомітний факел. Також проблема виникає у випадках, коли в топці присутні сторонні джерела світла, наприклад, гарячі поверхні або розпечений шлак. У таких ситуаціях датчик може формувати хибнопозитивні сигнали, вважаючи, що полум'я присутнє. Це обмежує його використання в середовищах із високою тепловіддачею та сильно розвиненою системою випромінювання, характерною для великих промислових печей і котлів високого тиску.

Наявність цих обмежень пояснює, чому у складних технологічних процесах прилади типу «Факел-2» поступово замінюються більш просунутими системами детекції полум'я, заснованими на комбінованому аналізі УФ- і ІЧ-спектрів, цифровій обробці сигналу, алгоритмах виявлення характерних коливань факела та автоматичній перевірці працездатності. Попри це, у своєму сегменті «Факел-2» залишається робочим і широко застосовуваним рішенням, особливо там, де умови відносно стабільні, а бюджет модернізації обмежений.

З інженерної точки зору «Факел-2» доцільно розглядати як базовий етап розвитку систем захисту горіння. Він дає змогу реалізувати функцію підтвердження полум'я, але вимагає більш ретельного обслуговування, уважного позиціонування, а також періодичної перевірки оператором. Це контрастує з обладнанням класу DURAG, де контроль полум'я та самодіагностика реалізовані на значно вищому рівні, і саме такий перехід від простого фотодатчика до професійної системи моніторингу і становить суть модернізації, що виконується у даному дипломному проєкті.

Таким чином, «Факел-2» є типовим представником фотоелектричних датчиків старшого покоління для підтвердження наявності полум'я у газових

установках. Його головні переваги полягають у простоті, доступності та надійності в умовах правильно організованого процесу згоряння. Водночас обмеження, пов'язані із спектральною селективністю, відсутністю глибокої фільтрації шумів та нестачею вбудованих функцій діагностики, визначають необхідність заміни такого обладнання на сучасніших рівнях промислової автоматизації, де безпека, функціональна інтегрованість і контроль стану системи мають принципове значення.

«Факел-3»

Датчик полум'я «Факел-3» є логічним продовженням і розширенням лінійки фотоелектричних приладів серії «Факел», призначених для контролю наявності полум'я у камерах горіння, газових і рідкопаливних пальниках, котлах і промислових теплогенераторах. У порівнянні з попередньою версією «Факел-2», версія «Факел-3» характеризується підвищеною стійкістю до несприятливих умов експлуатації, більшою діагностичною спроможністю і кращими можливостями інтеграції з автоматичними системами управління. Завдяки цьому «Факел-3» застосовується вже не лише у спрощених чи побутових системах, але й у більш серйозних технологічних установках, де контроль полум'я має підвищені вимоги до надійності [2].

Основний принцип роботи «Факел-3» все так же базується на аналізі спектрального випромінювання полум'я, але в ньому застосовані вдосконалені фотоелементи та оптичний тракт із кращою селективністю. Це дозволяє точніше розрізнити характерне для горіння випромінювання від фонових чи паразитних джерел світла, що особливо важливо в промислових умовах, де наявні значні теплові випромінювання, розпечені поверхні, відблиски або частинки пилу, які можуть впливати на сигнал. У «Факел-3» передбачено оптимізоване розташування світлоприймача, можлива наявність змінної діафрагми чи фільтра, а також покращена електроніка, яка дозволяє застосовувати глибшу фільтрацію сигналу, компенсацію температурних змін та мінімізацію впливу завад.

Конструктивно «Факел-3» передбачає корпус із жаростійкого матеріалу, підвищений ступінь захисту оптичного каналу, можливість монтажу у важких умовах — підвищена температура, підвищена вологість, наявність агресивних газів чи пилогазової суміші. Часто система передбачає вбудований штуцер для продувки повітрям або інший механізм очищення оптики, оскільки саме стан оптичного вікна суттєво впливає на роботу датчика. Такий підхід дозволяє зменшити частоту обслуговування і підвищити стабільність сигналу на довготривалій експлуатації.

У роботі «Факел-3» велика увага приділена самодіагностиці. Прилад може мати вбудований вихід для сигналу “діагностика”, який інформує систему керування про погіршення чутливості, забруднення оптики або відхилення параметрів роботи. Це дозволяє реалізувати більш просунуту стратегію роботи монтажу: технічне обслуговування за станом, а не за фіксованим графіком, підвищуючи надійність установки і зменшуючи непотрібні витрати. У випадках, коли датчик виявляє, що оптичний канал не відповідає нормі (наприклад, через накопичення сажі або конденсату), система може перекласти роботу у резервний канал або активувати попереджувальну сигналізацію.

З точки зору інтеграції «Факел-3» призначено для роботи з різними типами систем автоматики пальників і горілок. Він має вихідний сигнал, сумісний із традиційними системами керування, а також може бути адаптований до цифрових контролерів. Датчик підходить для підключення у схемах за принципом “підтвердити наявність полум’я перед відкриттям основного клапана”, або “підтримувати контур контролю полум’я” протягом всієї роботи пальника. У модернізаційних проєктах прилад «Факел-3» може бути використаний як первинний канал детекції, або як резервний чи дублюючий канал у парі з більш складними системами контролю [9].

Однак, незважаючи на вдосконалення, «Факел-3» все ще має обмеження, притаманні фотоелектричним датчикам. Його робота може бути ускладнена при надмірному запиленню, високій температурі навколишнього

середовища, при наявності значної кількості відблисків чи теплового випромінювання від конструкцій, що не мають прямого відношення до факела. В таких умовах важливе правильне налаштування геометрії монтажу, напрямку спостереження, забезпечення чистоти оглядового вікна, адекватного освітлення та відсутності конкуруючих джерел світла. У цьому сенсі «Факел-3» підходить для більш жорстких умов порівняно з «Факел-2», але він все ще не забезпечує такого рівня універсальності і захищеності, як сучасні комбіновані УФ/ГЧ системи з цифровою обробкою.

Важливо також розглянути, що застосування «Факел-3» може бути виправданим у випадках, коли бюджет модернізації обмежений, але вимоги до надійності вже значно вищі, ніж у старих систем. Якщо установка функціонує в умовах помірної температури, з допустимим ступенем запиленості, і знаходиться під регулярним технічним обслуговуванням, «Факел-3» може служити як удосконалена заміна «Факел-2». Проте, для промислових систем із великими потужностями, жорсткими умовами навколишнього середовища та високими вимогами до функціональної безпеки, навіть «Факел-3» слід розглядати як тимчасове рішення, передумову до впровадження систем класу DURAG або аналогічних.

Таким чином, «Факел-3» представляє проміжну ланку між базовими фотоелектричними датчиками і високотехнологічними системами моніторингу горіння. Він поєднує підвищену стійкість конструкції, кращу оптику і самодіагностику, що забезпечує значний крок уперед у надійності. Водночас користувач повинен усвідомлювати його межі і враховувати умови монтажу, експлуатаційного середовища та технічного обслуговування. У контексті модернізації, де ставиться завдання гарантувати безпечний та стабільний розпал, «Факел-3» може бути використаний як рішення, але якщо є можливість — краще планувати перехід на сучасні системи контролю полум'я з більшою резервуванням і діагностичними можливостями.

У конструкції датчика полум'я типу «Факел-2» ключовим елементом, що здійснює первинне перетворення світлового випромінювання у

електричний сигнал, є фоторезистор. Цей компонент являє собою напівпровідниковий матеріал із властивістю змінювати електричний опір залежно від інтенсивності падаючого на нього світла. Фоторезистор, як правило, виготовлений на основі сульфїду кадмію або споріднених сполук, чутливих до спектрального діапазону видимого і частково ближнього інфрачервоного діапазону, що відповідає характерному випромінюванню газового полум'я. При відсутності світла опір елемента є високим, і через нього протікає слабкий струм; під впливом світлового потоку опір зменшується на порядки, що дозволяє електронній схемі фіксувати факт наявності випромінювання.

Фоторезистор у складі системи «Факел-2» виконує роль первинного фотоперетворювача, сигнал з якого далі подається на підсилювально-пороговий каскад, де він обробляється і перетворюється на дискретний сигнал підтвердження полум'я. Модульність такого підходу є базовою для простих систем контролю горіння: мінімум деталей, простий принцип дії, низька вартість і висока надійність у разі чистої оптики та стабільних умов горіння. Проте саме фоторезистор визначає і обмеження пристрою: його спектральна селективність обмежена, реакція на інтенсивність світла є нелінійною, а час реакції залежить від температури навколишнього середовища. Такі елементи чутливі до перегріву, старіння матеріалу, фотодеградації та впливу забруднень на поверхні захисного скла.

У промислових умовах фоторезисторний фотоприймач «Факел-2» працює у зоні підвищених температур і запиленості. Впродовж часу оптичне вікно поступово забруднюється частинками сажі, конденсатами або продуктами неповного згорання, що призводить до зменшення інтенсивності світлового потоку, який досягає фоторезистора. Це спричиняє втрату чутливості або появу помилкових відключень. У ряді випадків навпаки, розпечені елементи топки, металеві поверхні з високою температурною емісією чи зовнішні джерела світла можуть провокувати хибне підтвердження факту горіння. Тому конструктивна простота водночас

виступає і перевагою, і обмеженням: фоторезисторний контроль добре працює за стабільних умов, але складно адаптується до змінного технологічного середовища [19].

На відміну від свого попередника, первинний перетворювач у складі системи «Факел-3» побудований за більш вдосконаленою схемою, і хоча він також може використовувати фоточутливі напівпровідникові елементи, конструкція передбачає покращену спектральну селекцію, стабілізовані параметри роботи та вищу завадостійкість. Первинний перетворювач «Факел-3» орієнтований на точніше виділення саме тих спектральних компонентів, які характерні для плазми газового полум'я, і на придушення сигналів від нагрітих стінок камери горіння або паразитних відбиттів.

Важливо відмітити, що перетворювач у «Факел-3» є не просто фоторезистором із покращеним виконанням. Як правило, в ньому використовується фотодіод або фототранзистор, чутливий до конкретного спектру, а також електронні вузли попереднього підсилення та фільтрації сигналів. Це дозволяє мінімізувати вплив змін освітленості, температури і старіння оптики на результуючий сигнал. Первинний перетворювач у такій системі не лише фіксує зміну освітленості, а й оцінює характер старіння або деградації каналу. У поєднанні з додатковими схемами контролю постійного струму і шумозахисту це робить сигнал більш стабільним і передбачуваним. У порівнянні з фоторезистором, фотодіод або фототранзистор, застосований у більш сучасних конструкціях, має менший час реакції, кращу повторюваність параметрів та більшу спектральну вибірковість. Це означає, що «Факел-3» здатний надійніше працювати у середовищі з коливаннями світлового фону, у тому числі в умовах інтенсивного випромінювання нагрітих елементів печі. Установка такого датчика вимагає більш ретельної електронної обробки сигналу, але натомість забезпечує кращу відповідність вимогам автоматизованих систем захисту. Важливим також є той факт, що первинний перетворювач «Факел-3» у більшості випадків має діагностичний

канал або внутрішню схему контролю, що дозволяє виявляти стан забруднення та вихід за межі робочого діапазону.

Таким чином, фоторезистор у системі «Факел-2» є прикладом класичної, простої й недорогої технології контролю полум'я, добре придатної для базових задач і стабільних умов. Натомість первинний перетворювач у системі «Факел-3» представляє собою більш складне рішення, де сенсорний елемент має кращі параметри, а електронна обробка сигналу дозволяє підвищити точність, довговічність і надійність роботи. Обидві технології виконують однакову функцію — підтвердження наявності полум'я — але знаходяться на різних етапах еволюції систем промислової безпеки. Саме це обґрунтовує перехід на сучасні детектори, зокрема на комплексні системи класу DURAG, у проєктах модернізації, де вимоги до надійності та сертифікації безпеки значно вищі.

Необхідність заміни приладів контролю полум'я типу «Факел-2» та «Факел-3» на сучасні системи детекції, такі як обладнання DURAG, обумовлена цілою низкою технологічних, експлуатаційних та безпекових факторів, які визначають рівень надійності виробничих процесів і відповідність сучасним нормативним вимогам. З розвитком промислових стандартів, автоматизації та технологій безпеки стало очевидним, що класичні фотоелектричні сенсори, будучи достатньо ефективними для невеликих та стабільних установок, обмежені у своїх можливостях, коли мова йде про відповідальне обладнання, складні режими горіння, високий рівень запиленості, змінну теплову обстановку та вимоги до безперервної автоматичної роботи без операторського втручання.

Основою проблеми є те, що у приладах типу «Факел-2» і навіть у покращеному «Факел-3» первинний принцип детекції ґрунтується на фіксації видимого випромінювання факела. Це означає, що система сприймає саме світловий потік, а не сам факт горіння як термохімічного процесу. При сприятливих умовах така методика працює успішно, однак у промислових камерах згорання існує ряд факторів, які спотворюють або маскують

світловий сигнал: наявність розпечених металевих поверхонь, що випромінюють у видимому та інфрачервоному діапазонах; забруднення оптичного скла продуктами згорання; зміна факела залежно від тиску або складу газу; сторонні відблиски; поглинання світла пилогазовою сумішшю. Крім того, фоторезистивні та фотодіодні елементи мають обмеження по діапазону температур, чутливі до деградації та потребують регулярного очищення оптичних поверхонь [23].

У той час, як ці прилади були прийнятними у системах старого покоління, сучасні стандарти безпеки та автоматизації вимагають, щоб кожна операція горіння мала незалежне, достовірне й беззаперечне підтвердження наявності полум'я. Це обумовлено тим, що навіть короткочасна подача газу у відсутності фактичного горіння може створити вибухонебезпечну суміш, яка при подальшому запалюванні спричинить вибух, механічні пошкодження і ризик для персоналу. У системах, де необхідна висока категорія безпеки, такі ризики неприпустимі, і тому обладнання має бути здатним не лише фіксувати полум'я, але й проводити власну діагностику, самоконтроль, перевірку каналу та сигналізувати про будь-яке відхилення у роботі.

Системи DURAG побудовані таким чином, щоб забезпечувати контроль полум'я на основі аналізу чітко визначених спектральних компонентів, що характерні для горіння, включаючи ультрафіолетову та інфрачервону область. На відміну від фотоелементів загального спектру, застосованих у «Факел-2» і «Факел-3», датчики DURAG здатні відрізнити саме спектр активного полум'я, а не просто яскравість сцени. Це дає фундаментальну перевагу у складних середовищах, де камера згорання світиться через нагрів стінок, а не через хімічну реакцію горіння. Таким чином, система DURAG забезпечує справжню детекцію процесу згорання, а не його візуальних ознак.

Крім спектральної вибіркості, обладнання DURAG має вбудовані алгоритми самодіагностики, тестування чутливості, контроль стану фотоприймального каналу, температурну компенсацію та реєстрацію подій.

Це дає змогу не лише фіксувати відсутність полум'я, а й прогнозувати можливі відмови і повідомляти систему керування про необхідність технічного втручання. Таким чином, оператор не просто знає, що горіння відсутнє — він заздалегідь отримує інформацію про деградацію феритових фільтрів, забруднення оптики, зміни характеристик сенсора або потенційні електричні несправності. У старих системах цього принципово неможливо досягти.

Сучасні вимоги нормативної бази також спрямовані на застосування обладнання з відповідною сертифікацією SIL, ATEX, IECEx та іншими міжнародними стандартами. Прилади сімейства «Факел» не забезпечують такого рівня відповідності. У критичних установках, особливо в енергетиці, хімічній та нафтопереробній галузях, відсутність сертифікованої системи контролю полум'я фактично блокує можливість отримання дозволу на експлуатацію технологічної лінії. Натомість DURAG має сертифікацію для застосування у вибухонебезпечних середовищах та на об'єктах підвищеної безпеки.

Ще одним вагомим аспектом є інтеграція в сучасні системи управління. В той час, як «Факел-2» та «Факел-3» здебільшого передають бінарний сигнал «є полум'я / немає полум'я», сучасні системи DURAG надають можливість цифрової комунікації, параметризації, ведення журналу подій, перевірки каналу, дистанційного контролю та взаємодії з PLC-системами. У рамках сучасного підходу до цифровізації та Industry 4.0 ці можливості не є розкішшю, а стають базовою вимогою для складних технологічних комплексів.

У сукупності всі ці фактори визначають чітку технічну необхідність заміни обладнання типу «Факел-2» та «Факел-3» на сучасні системи DURAG. Така модернізація забезпечує підвищення рівня безпеки, попередження аварійних ситуацій, зниження ризику вибухів, зменшення залежності від людського фактору, зниження експлуатаційних витрат і збільшення загального ресурсу системи. Таким чином, модернізація не є лише бажаною

або рекомендованою — вона стає стратегічною вимогою для відповідальних об'єктів, де йдеться про експлуатаційну безперервність і дотримання норм промислової безпеки.

Застарілі системи електродного розпалу з використанням автомобільної свічки [35].

У ряді вітчизняних і застарілих промислових теплотехнічних установок для ініціювання горіння природного газу або зріджених вуглеводневих палив застосовуються примітивні системи електродного розпалу, Рисунок 1.5, що базуються на використанні стандартних автомобільних свічок запалювання та побутових або узгоджених трансформаторів запалювання. В основі такого підходу лежить перенесення автомобільної концепції іскрового займання на промислову топку: для створення первинного ядра полум'я здійснюється електричний розряд між електродами свічки, який повинен запалити газоповітряну суміш у зоні подачі палива.

Ця система була характерною для ранніх газових пальників, локальних теплогенераторів малої продуктивності та промислових установок, де автоматизація обмежувалася мінімальним набором засобів. Головною перевагою такого рішення була низька вартість і доступність компонентів: автомобільна свічка, стандартний високовольтний кабель, трансформатор підвищеної напруги і примітивна схема керування розрядом. На момент свого широкого поширення, коли вимоги безпеки були менш жорсткими, така система забезпечувала достатній рівень функціональності. Однак із розвитком промислових стандартів, підвищенням вимог до вибухозахисту та необхідності стабільної роботи в автоматичному режимі без участі оператора, подібні рішення однозначно відносяться до морально та технологічно застарілих.

Електродний запал із застосуванням автомобільної свічки працює на принципі імпульсної іскри, яка виникає при пробі повітряного проміжку між центральним і боковим електродами. Цей пробій вимагає наявності достатнього електричного потенціалу, правильного зазору і чистих

контактних поверхонь. У промислових умовах ці параметри швидко виходять з норми. Одним із ключових факторів є забруднення робочої частини свічки продуктами згоряння, відкладення сажі, окислів, нагару та частинок палива. Замикання забрудненим шаром, порушення зазору між електродами, перегрів ізоляторів, адгезія пилу та продуктів термічного розкладу призводять до нестабільності іскрового розряду або повної його відсутності. У машинах і двигунах ці явища компенсуються регулярністю технічного обслуговування, доступом до вузла, порівняно невисокою температурою навколишнього середовища та фіксованою геометрією камери згоряння. Натомість у промислових пальникових системах свічка знаходиться в надзвичайно агресивному середовищі: висока температура, коливання складу газу, вологість, турбулентність потоків і наявність твердих частинок.

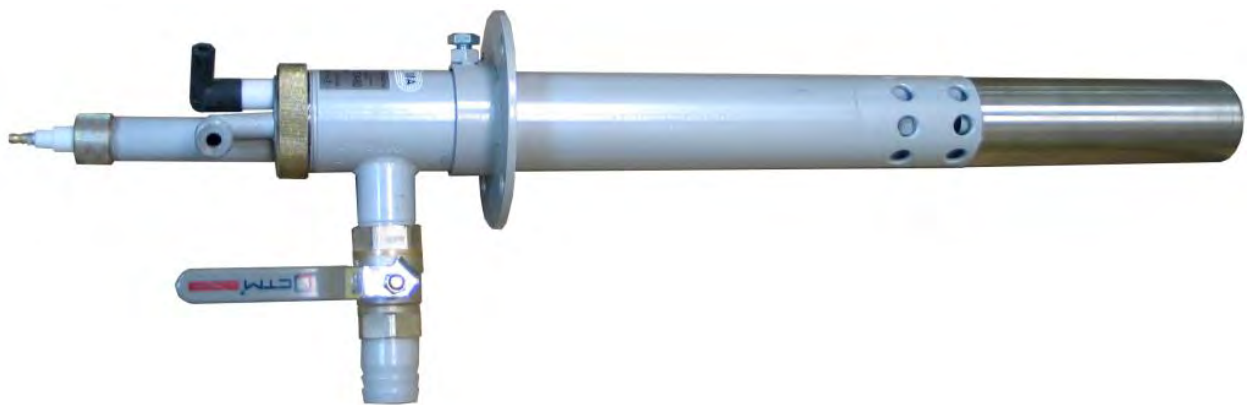


Рис 1.5 Запальник зі свічкою



Рис 1.6 Електродний запальник

Іншим обмеженням класичної електродної системи є відсутність власного факела запалювання. Автомобільна свічка дає лише іскру, яка повинна безпосередньо запалити газ. Якщо газовий потік має високу

швидкість, якщо у зоні запалювання є інтенсивний повітряний перепад, якщо газова суміш має нестабільний склад або низьку температуру, іскра може не створити стійкого ядра полум'я, або полум'я зривається в перші мілісекунди горіння. У таких умовах вихід пальника на режим ускладнюється, і навіть короточасна затримка виявлення полум'я веде до накопичення вибухонебезпечної суміші. Таким чином, фізична відмінність від справжніх промислових запальників полягає у відсутності стабілізованого пускового факела [43].

Додаткову проблему становить сама конструкція автомобільної свічки, яка не призначена для тривалого теплового навантаження у відкритому полум'ї. У двигуні внутрішнього згорання свічка охолоджується корпусом головки блока циліндрів, температурний режим контрольований і циклічний. У промисловому пальнику електроди працюють в умовах тривалого високотемпературного впливу, і тепло відводиться набагато гірше. Це призводить до прискореного старіння електродів, розтріскування керамічного ізолятора, деградації контактів та порушення герметизації. Часто після кількох циклів розпалювання і вимикання агрегату свічка втрачає стабільність, і система потребує ручного втручання.

Ще один принциповий недолік таких систем — їхня відсутність системної інтеграції із засобами контролю полум'я. Старі схеми передбачали елементарну логіку: подача газу, іскра, очікування та перевірка полум'я за допомогою світлочутливого елемента або взагалі без нього. У випадку несправності оператор міг вручну перекривати газ або повторювати запуск. У сучасних умовах така схема неприйнятна. Промислова автоматика вимагає взаємоблокування із датчиками полум'я, логіки аварійного відключення, наявності продувки і незалежного підтвердження горіння. Свічка як елемент конструкції не забезпечує взаємодії з цими системами на належному рівні. Таким чином, використання автомобільної свічки як засобу розпалювання у промислових пальниках є типовим прикладом тимчасового або кустарного рішення, яке не відповідає сучасним нормам безпеки. В сучасній енергетиці

та промислових технологіях подібні системи вважаються морально застарілими, оскільки вони не гарантують стабільності, потребують частого технічного втручання, не мають резервування, не підтримують автоматизований контроль стану і не забезпечують функціональну безпеку відповідно до нормативних вимог. Їх заміна на спеціалізовані промислові запальники, такі як системи Hegwein, є не лише кроком у модернізації устаткування, але й фактором, що визначає можливість безпечної, безперервної та економічної експлуатації технологічного процесу.

Застарілі електродні запальники, Рисунок 1.6, що традиційно застосовувалися у низці промислових газових пальників, мають низку суттєвих конструктивних недоліків, серед яких найбільш характерним і критичним є застосування крихкого керамічного ізолятора. У конструкції таких запальників іскра формується між центральним електродом та корпусом пальника, причому центральний електрод ізолюваний від металевої оболонки саме керамічною втулкою. Цей елемент працює в зоні інтенсивного теплового та механічного навантаження: на нього діє висока температура факела, теплові цикли розширення й охолодження, перепади тиску, агресивні продукти згорання та вібраційні навантаження. У результаті ізолятор стає головним слабким вузлом всієї системи запалювання.

Керамічний ізолятор у подібних запальниках в умовах реальної експлуатації поступово деградує. При тривалому впливі високої температури він втрачає міцність, з'являються мікротріщини, які далі збільшуються під дією термічного розширення та механічних напруг. У середовищі з наявністю пилу, хімічно активних газів і сажеутворення додатково відбувається проникнення дрібних частинок у структуру мікротріщин, що прискорює руйнування. Зовні цей процес часто непомітний до моменту появи електричного пробоя.

Коли структура ізолятора порушується, високовольтний імпульс, замість формування іскри між електродами у зоні факела, починає прориватись шляхом найменшого опору — у напрямку корпусу. Це явище,

відоме як «пробій на масу» або «пробій на корпус», призводить до повної втрати функції запалювання. Оскільки електрична енергія імпульсу витрачається на пробиття тріщини у кераміці, корона розряду іскри не потрапляє у простір газової суміші, і горіння не ініціюється. Ситуація погіршується тим, що пробій може носити інтермітуючий характер: при різному тепловому навантаженні пробій то проявляється, то зникає, що робить систему ненадійною та непередбачуваною [49].

Коли в умовах промислової експлуатації електродний запальник втрачає здатність стабільно створювати іскру у зоні подачі газу, оператор стикається з серйозною небезпекою. Якщо газ починає надходити, але фактичного займання не відбувається, у камері накопичується вибухонебезпечна суміш. За відсутності миттєвого спрацювання системи контролю полум'я це створює ризик пізнього запалення — фактичного вибуху у топці або пальниковому каналі. Навіть якщо система блокує подачу газу, запальник із дефектним ізолятором змушує зупинити установку, виконувати технічне втручання, заміну, охолодження та повторний запуск — що різко збільшує простій та витрати на обслуговування.

Додатковим ускладненням є те, що кераміка таких ізоляторів крихка не лише до температурних впливів, але й до механічних факторів. При монтажі, демонтажі, випадковому ударі інструментом або навіть надмірному зусиллі під час затягування накидної гайки відбувається розтріскування ізоляційної втулки. Унаслідок цього навіть новий запальник може швидко вийти з ладу. У промислових котельних та печах, де доступ до пальника обмежений, а демонтаж вузлів проводиться у важких умовах, ризик механічного ушкодження зростає.

Особливо небезпечним є те, що більшість таких застарілих запальників не мають системи самоконтролю і не формують сигнал аварії саме по дефекту ізолятора. Оператор бачить лише факт відсутності запалення, тоді як реальна причина криється у внутрішньому пробіі. На практиці це веде до випадкових і часто небезпечних спроб повторного запуску, збільшення

кількості циклів підпалу, перегріву та перенавантаження трансформатора запалювання, а також до непланових простоїв. У результаті обладнання втрачає експлуатаційну надійність, зростає ризик аварії, а трудомісткість технічного обслуговування суттєво збільшується.

Таким чином, слабкість керамічного ізолятора, його схильність до термодеструкції, утворення мікротріщин та пробоїв на корпус є однією з головних причин, чому електродні системи запалювання з елементами автомобільного типу не відповідають сучасним вимогам до безпеки та надійності промислових теплотехнічних агрегатів. Цей конструктивний фактор сам по собі виправдовує перехід на спеціалізоване промислове обладнання, таке як запальники Hegwein, які мають іншу логіку формування факела, інші матеріали, інтегровані системи охолодження та механічний ресурс, розрахований на довготривалу роботу у високотемпературному середовищі.

Блоки контролю полум'я типу БКП-2Р та БКП-3 відносяться до покоління вітчизняних приладів, які призначалися для контролю роботи газових пальників та підтвердження наявності полум'я шляхом прийому і обробки сигналу від фотоелектричних датчиків, таких як «Факел-2» та «Факел-3». Ці пристрої історично застосовувалися у системах автоматизації котлів середньої та малої потужності, на промислових і комунальних об'єктах, а також у теплотехнічних агрегатах радянського та пострадянського періоду. Основною функцією таких блоків була логічна обробка сигналу з фотоприймача та формування команд на подачу або припинення подачі газу в пальник у випадку Confirm/No-Confirm горіння. Системи БКП забезпечували мінімально необхідний рівень безпеки у перших автоматизованих схемах газових пальників, однак на сьогодні вони вважаються морально та технічно застарілими.

У своїй основі робота БКП-2Р/БКП-3 базується на простому принципі порогового контролю змін електричного сигналу від фотоелемента. Електроніка блоку аналізує рівень струму, що генерується фотоприймачем у

відповідь на випромінювання полум'я, і порівнює його з заданим мінімальним рівнем («порогом полум'я»). При перевищенні цього рівня система трактує ситуацію як наявність факела і дозволяє роботу газової арматури, при падінні — формує команду на блокування. Проте така схема визначення є одноканальною та примітивною за логікою; вона не враховує структуру сигналу, частотні характеристики мерехтіння факела, спектральний склад випромінювання і не виконує відокремлення реального полум'я від паразитних джерел світла. В результаті БКП системи здатні як пропустити ситуацію загасання, так і спровокувати хибне аварійне відключення через нестабільність фотосигналу або зовнішні фактори [31].

Однією з найбільш суттєвих проблем старих блоків є відсутність повноцінної самодіагностики. Прилади цього класу не контролюють стан власних елементів, не визначають деградацію фотодатчика, втрату чутливості, зниження прозорості оптичного тракту, несправність кабельної лінії або пробій у проводці. В умовах промислової експлуатації, де електричний шум, вібрація, забруднення, перепади температур та старіння елементів є нормою, така відсутність діагностичної функції означає, що система факельно-захисної автоматики працює фактично «всліпу», доки відмова не стане аварійною. На практиці це призводить до ситуацій, коли блок продовжує «бачити полум'я» навіть тоді, коли в реальності воно відсутнє, або навпаки — не дозволяє запуск через паразитні сигнали та електричний шум, особливо в старих установках із зношеною проводкою та заземленням.

Ще однією причиною зниження надійності таких систем є використання елементної бази минулого покоління. У схемах БКП-2Р та БКП-3 застосовувалися дискретні транзисторні каскади та порогові порівнювачі з мінімальним рівнем фільтрації. При тривалій експлуатації це створює ризик дрейфу параметрів, зміни порогів спрацьовування, нестабільності при живленні та залежності від температурного режиму. Система втрачає точність розпізнавання реального факела, реагує на шум

або, навпаки, пропускає ситуацію, коли горіння припинилося. У сучасних термічних установках, де робота пальника повинна бути повністю автоматизованою та гарантовано безпечною, подібні допуски є неприйнятними.

Суттєвим обмеженням БКП-серій є їхня неспроможність повноцінно брати участь у інтегрованому циклі пуску, продувки, запалювання та стабілізації факела. Вони не виконують логічного контролю взаємозв'язків між етапами запуску, не аналізують часові інтервали між появою і зникненням полум'я, не відслідковують повторюваність і частоту згасань. Усі критичні для безпеки дії базуються на простому сигналі датчика без комплексної перевірки стану системи. Це кардинально відрізняється від сучасних контролерів горіння на кшталт DURAG, які мають багатоступеневу валідацію, цифрову обробку сигналу, алгоритми самотестування, інтеграцію з системами автоматики і ведення журналу подій.

Окремо слід зазначити залежність старих БКП від ручної експлуатації. Вони розраховані на те, що оператор буде періодично перевіряти працездатність системи, слідкувати за чистотою оглядових вікон факела, контролювати стан проводки та відновлювати працездатність після відмов. Сучасні ж стандарти безпеки передбачають мінімальну участь людини у процесах запуску і безперервного контролю, що є об'єктивною вимогою для складних технологічних об'єктів.

З огляду на все вищевикладене, автоматичні блоки контролю полум'я БКП-2Р та БКП-3 можна вважати морально застарілими технічними рішеннями, які відповідають технологічним можливостям своєї епохи, але не забезпечують рівня безпеки та функціональності, що диктується сучасними нормативами та практикою промислової експлуатації. Їх застосування у відповідальних об'єктах створює потенційні експлуатаційні та аварійні ризики, особливо в умовах змінних режимів горіння та старіння обладнання. Модернізація таких систем шляхом впровадження сучасних мікропроцесорних контролерів горіння, зокрема рішень класу DURAG, є

необхідним етапом для забезпечення безпечної, стабільної і автоматизованої роботи теплотехнічних установок нового покоління.

У більшості застарілих схем автоматики системи БКП-2Р та БКП-3 застосовувалися виключно як блоки контролю полум'я основного газового пальника, тоді як сам процес розпалу запальника залишався майже без контролю або мав лише мінімально спрощений контроль у вигляді наявності іскри чи механічної фіксації режиму. У таких реалізаціях датчики типу «Факел-2» або «Факел-3» не здійснювали моніторингу факела запальника; їх поле зору орієнтувалося безпосередньо на камеру горіння основного пальника, і завданням було підтвердити тільки факт появи та наявності великого факела. Запалювання, відповідно, виконувалося електродним свічковим вузлом з усіма притаманними йому обмеженнями, а контроль процесу запалювання як такого був відсутній [22].

Подібна архітектура автоматики характерна для старих котельних агрегатів, де паливна арматура мала значно нижчу ступінь модернізації, а логіка безпеки була побудована на мінімально необхідному наборі міжблокувань. Запальник розглядався як допоміжний елемент, а його полум'я — як проміжний технологічний етап, що мав лише створити умови для розпалу основного факела. При цьому система не мала гарантованого підтвердження того, що запальник насправді зайнявся й стабільно горить. Якщо з певних причин запальник не запалювався або полум'я відривалося, БКП не фіксував цього факту, оскільки сенсор контролював виключно основну камеру. Газ подавався далі, і установка продовжувала процедуру запуску, що створювало потенційно вибухонебезпечну ситуацію: пальникова камера наповнювалася паливною сумішшю без реального осередку запалення.

На практиці це означало, що система була «сліпою» саме в найбільш відповідальний момент — у фазі формування початкового факела. В умовах промислових теплотехнічних агрегатів, де турбулентність потоків, відрив полум'я та нестабільність суміші є реальними факторами, відсутність

контролю саме за полум'ям запальника створює критичний ризик затримки запалення або так званого вибухового займання, коли накопичений газ раптово спалахує з ударною хвилею. З огляду на це такі системи не можуть відповідати сучасним вимогам функціональної безпеки, адже контроль лише основного факела не забезпечує цілісності алгоритму нагляду за процесом горіння.

Саме тому переходи на сучасні рішення, де полум'я запальника так само перебуває під контролем і підтверджується окремим сенсором або інтегрованою системою моніторингу (як у комплексах Hegwein + DURAG), є принциповим кроком підвищення безпеки. Сучасні системи не вважають запалювання завершеним доти, доки факт горіння допоміжного факела не буде однозначно зафіксований, і тільки після цього дозволяється подача газу на основний пальник. Такий підхід практично усуває ризик неконтрольованого накопичення газової суміші та вибухового займання, гарантуючи безпечну та стабільну роботу обладнання відповідно до сучасних стандартів галузі.

1.4 Висновки до розділу 1.

Аналіз сучасних тенденцій у галузі промислових систем розпалювання, порівняння обладнання DURAG і Hegwein із застарілими електродними та свічковими запальниками, а також огляд роботи фотодетекторів типу Факел-2 і Факел-3 дозволяє зробити однозначний висновок про необхідність їхнього повного технічного оновлення. Сучасні теплотехнічні установки працюють у умовах підвищених вимог до безпеки, екологічності та стабільності горіння, і тому старі системи контролю полум'я вже не відповідають реаліям експлуатації котлоагрегатів. Електродні та автомобільно-свічкові запальники морально і фізично застаріли через низьку механічну міцність ізоляторів, часті пробої на корпус, невисоку надійність і обмежений ресурс. Їхня робота супроводжується неконтрольованими коливаннями якості іскри, нестабільністю формування запального факела та підвищеним ризиком

відмови у найкритичніший момент — під час запуску або повторного розпалу після згасання полум'я. В умовах сучасної ТЕЦ така непередбачуваність є неприпустимою.

У свою чергу фотодетектори Факел-2 і Факел-3, хоч і були колись стандартом у системах контролю полум'я, на даний час не забезпечують належного рівня селективності та достовірності. Їхні оптичні чутливі елементи деградують, мають занадто низьку спектральну роздільність, погано відрізняють реальне полум'я від паразитного світіння розжарених поверхонь топки, а їхні аналогові схеми не здатні ефективно фільтрувати випадкові коливання світлового потоку. Крім того, ці прилади не мають розвиненої системи самодіагностики та не дозволяють виявити критичний стан до появи аварії. У результаті експлуатація на їхній основі створює підвищений ризик як хибнопозитивних, так і хибнонегативних спрацювань, що безпосередньо впливає на безпеку розпалювання та основного горіння.

На кардинально іншому рівні знаходиться обладнання DURAG і запальники Hegwein, які розроблені відповідно до сучасних міжнародних стандартів безпеки та безвідмовності. DURAG застосовує спектральні методи аналізу полум'я, розпізнає характерну частотну структуру, відокремлює горіння від шумових факторів і має інтегровану систему самодіагностики, здатну виявляти деградацію оптичного каналу, внутрішніх схем та порушення цілісності кабельних ліній. У свою чергу мікрофакельні запальники Hegwein забезпечують стабільне займання, контроль тиску і подачі газу, гарантовану іскру, а їхня конструкція позбавлена недоліків електродних і свічкових систем. Синергія цих двох технологій створює якісно новий рівень надійності системи розпалювання.

Узагальнюючи результати аналізу, можна стверджувати, що заміна застарілого обладнання на комплекс DURAG + Hegwein не є лише модернізацією, а фактично необхідним кроком для забезпечення відповідності котлоагрегата сучасним нормам промислової безпеки, надійності та екологічності. Впровадження нових систем дозволить

мінімізувати ризики хибного контролю полум'я, усунути слабкі місця запальників старого типу, підвищити ефективність пускових операцій та забезпечити стійкість горіння у широкому діапазоні режимів. Результатом стане підвищення загального ресурсу обладнання, зменшення кількості аварійних ситуацій та підвищення безперебійності роботи теплоенергетичної установки, що є ключовим завданням під час модернізації технологічного процесу.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНИЦЬКО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Роль запалювально-захисних пристроїв у теплоенергетиці.

Запалювально-захисні пристрої (ЗЗП) у складі автоматизованих систем теплових електричних станцій відіграють стратегічну роль, забезпечуючи не тільки гарантований запуск процесу спалювання палива, а й постійну підтримку безпечного стану топкових пристроїв, газопальникового обладнання та суміжних технологічних систем. У структурі сучасної теплової енергетики ЗЗП являють собою один із фундаментальних елементів технологічної безпеки, оскільки вони забезпечують контроль найкритичнішої фази — моменту переходу від неактивної стадії до активного процесу горіння, коли в об'ємі топки або камери змішування може бути присутня потенційно вибухонебезпечна паливно-повітряна суміш. Ця фаза, попри її відносно коротку тривалість, є найбільш відповідальною і визначальною для подальшого стабільного та безпечного функціонування котлоагрегату.

ЗЗП виконує роль технологічного бар'єру між допустимою та аварійною робочою зоною, контролюючи три ключові чинники: можливість подачі палива, підтвердження факту полум'я та момент миттєвого відключення палива при втраті горіння. Іншими словами, ЗЗП є органом, який ухвалює рішення щодо дозволу горіння, засноване на результатах моніторингу факела, стану допоміжних систем та алгоритмічних умов безпеки. На відміну від загальних систем автоматики, які керують режимами навантаження, тепловими потоками або системами подачі повітря, запалювально-захисний пристрій виконує спеціалізовану функцію винятково з точки зору безпеки, незалежно від режимів навантаження та команд оператора. Це положення принципово, оскільки логіка ЗЗП має пріоритет над будь-якими іншими командами управління: при виявленні нестандартного стану система завжди переходить у режим безпечної зупинки [13].

Особливістю застосування ЗЗП на ТЕЦ є те, що установка працює в умовах великих об'ємів топкового простору, значних розмірів пальників і

складної динаміки потоків. Під час пуску котлоагрегату газ або мазут подається з низькою швидкістю для утворення стабільної запальної суміші; у цей момент система повинна впевнено розпізнати момент займання та підтвердити наявність стійкого полум'я. Будь-яке затримання, недостатня інтенсивність іскрового розряду, відрив факела або невірне тлумачення сигналу від сенсора можуть призвести до небезпечної ситуації накопичення палива у топці з подальшим вибуховим займанням. Отже, реакція ЗЗП має бути миттєвою, логічно обґрунтованою та автоматичною, без залежності від рішень персоналу.

ЗЗП на ТЕЦ інтегрується із системою продувки топки та газових трактів. Будь-який запуск або повторний запуск здійснюється лише за умови попереднього видалення залишків незгорілого палива та створення інертного газового середовища. ЗЗП контролює часові інтервали продувки, фіксує параметри тяги та наявність повітря. Тільки після підтвердження цих умов видається дозвіл на формування іскри і подачу газу на запальник. Далі ЗЗП супроводжує запалювання, аналізуючи сигнал від детектора полум'я запальника, і лише після підтвердження стабільного допоміжного факела система дозволяє подачу палива на основний пальник. Тобто ЗЗП фактично контролює весь технологічний маршрут від холодного стану до появи основного факела.

Важливо підкреслити, що роль ЗЗП не обмежується фазою пуску. Він забезпечує безперервний контроль наявності полум'я протягом усієї роботи котла. Втрата полум'я, що може бути спричинена порушенням паливоподачі, збоєм у системі подачі повітря, різким зниженням тиску газу або механічним відривом факела, повинна бути миттєво зафіксована ЗЗП. При цьому пристрій протягом мілісекунд формує команду на закриття паливної арматури і зупинку пального. Час реакції є критичним параметром: навіть короткий проміжок неконтрольованої подачі газу може спричинити формування вибухонебезпечної суміші, здатної через інерцію згорання вибухнути при подальшій спробі відновлення горіння. Саме тому ЗЗП

застосовує принцип fail-safe — будь-яка невизначеність, сумнів, перешкода у прийомі сигналу або відхилення від нормальності інтерпретується як аварія з негайним перекриттям палива.

Особлива вимога до ЗЗП на ТЕЦ — наявність автономності. Навіть у складі загального автоматизованого комплексу системи керування котлом, ЗЗП функціонує як незалежний модуль безпеки, який має свою внутрішню логіку, виконавчі блокування і резервування. Оскільки енергетичні установки часто є безперервними об'єктами з високою інерційністю теплових процесів, система безпеки не може залежати від загальних алгоритмів SCADA або програмованих контролерів загальної автоматики. Вона повинна мати власну діагностику, тестування ланцюгів, аналіз стану кабельних мереж і постійний контроль справності датчиків полум'я та запального вузла. Така структура є стандартом у високонадійних енергетичних системах і входить до складу концепції SIL (Safety Integrity Level).

Слід також зазначити, що ЗЗП виконує роль операційного «арбітра», який координує взаємодію між допоміжними та основними пальниками, контролює їхній режим роботи при зміні навантаження і при переході на резервні паливні системи. При переведенні котла з газу на мазут або при роботі у комбінованих режимах саме ЗЗП визначає правильність послідовності операцій і забезпечує гарантоване підтвердження горіння у кожному контурі. Там, де старі системи дозволяли ручні втручання і перезапуски без всебічної перевірки, сучасний ЗЗП виключає суб'єктивність і гарантує суворе дотримання алгоритму безпеки.

Отже, роль запалювально-захисних пристроїв у автоматизації ТЕЦ полягає у забезпеченні найважливішого аспекту — безпечного керованого переходу паливної системи з неактивного стану у активний стан горіння, а також у стійкому контролі вогневого процесу протягом усього циклу роботи котла. Саме через важливість цієї функції ЗЗП можна розглядати як «нервову систему безпеки» теплової енергетики, без якої неможливо досягнути ні стабільності, ні ефективності, ні відповідності сучасним нормам промислової

експлуатації. Заміна застарілих елементів ЗЗП на сучасні рішення, такі як DURAG, є не просто модернізацією обладнання; це оновлення самої філософії безпеки, яке переводить енергоблок у категорію технологічного середовища нового покоління з підвищеним рівнем захищеності та надійності.

2.2 Необхідність модернізації старої системи.

У міру розвитку теплотехнічних комплексів та підвищення вимог до функціональної безпеки промислових енергетичних установок стає очевидним, що традиційні системи розпалу та контролю полум'я, побудовані на базі електродних запальників автомобільного типу та датчиків серії «Факел» у поєднанні з блоками БКП-2Р/БКП-3, більше не здатні забезпечити необхідний рівень надійності, точності й передбачуваності. Сучасна теплова енергетика та автоматизовані системи управління вимагають засобів, що відповідають критеріям безпеки рівня SIL, мають вбудовану діагностику, здатні працювати в умовах змінного режиму горіння та гарантують підтвердження як процесу займання, так і стабільного горіння основного палика. Особливо критичним є той факт, що старі системи демонструють нестабільність саме в ключові моменти — під час запуску, при коливаннях тиску газу, при нестабільності тяги або наявності вологи і пилу, коли будь-яке зниження інтенсивності факела або зрив полум'я може призвести до накопичення газоповітряної суміші в топці та виникнення вибуху. Саме ці фактори обумовлюють потребу в переході на комплексні рішення на базі Hegwein як системи розпалу та DURAG як системи контролю полум'я [4].

Запальники Hegwein принципово відрізняються від свічкових електродних рішень тим, що формують власний стабілізований запальний факел, який не лише створює іскру, а й забезпечує сталий полум'яний осередок, достатній для гарантованого підпалу основного палива. Це критично важливо, оскільки старий підхід із використанням автомобільної свічки покладається лише на імпульсну іскру, тоді як при наявності

турбулентних потоків та варіативних умов процесу запалювання такої енергії недостатньо. Рішення Hegwein забезпечують не тільки потужний імпульс запалювання, але і підтримуваний міні-пальник, що працює в автоматичному режимі, тим самим усуваючи розрив між фазами підпалу та виходу пальника на режим. Це означає, що запалювання стає стабільним, контрольованим і відтворюваним, без необхідності множинних повторних запусків, без згасань запальника, без перегріву електродів і без ризику утворення неконтрольованої газової суміші.

У свою чергу системи DURAG реалізують принципово інший підхід до контролю полум'я, ніж прилади серії «Факел». Якщо останні реагують на видиме світло й фактично працюють як прості фотоприймачі, схильні до впливу відблисків, розпечених поверхонь, забруднень та обмеженого динамічного діапазону, то обладнання DURAG застосовує спектрально-селективну детекцію у діапазонах УФ та ІЧ випромінювання, що дозволяє однозначно ідентифікувати саме хімічне горіння, а не просто яскравий об'єкт у полі зору. Це забезпечує чітке розрізнення реального факела та паразитного теплового випромінювання, а також дозволяє контролювати як фазу горіння підпалювального факела, так і основного пальника. Окрім цього, на відміну від простих фотодатчиків, системи DURAG мають вбудовані алгоритми самодіагностики, температурну компенсацію, системи контролю стану оптики та логіку внутрішнього тестування, що унеможлиблює «німий пробій» чи хибне підтвердження горіння в момент, коли полум'я в реальності відсутнє.

Ключовою відмінністю є також і філософія експлуатації. Старі системи розраховували на регулярну участь персоналу: огляд, чистку, контроль роботи свічки, періодичне втручання при збої. Теплоенергетика минулого допускала залежність безпеки від людського фактора. Сучасні ж вимоги автоматизації і стандарти охорони праці вимагають, щоб система могла самостійно оцінювати свій стан, сигналізувати про потенційні відмови до їхнього прояву та автоматично відключати пальник при будь-яких сумнівах

щодо коректності процесу горіння. Hegwein та DURAG розроблені саме для таких умов: вони створюють комплексну систему запалювання й контролю, яка не просто фіксує наявність полум'я, а активно керує запуском, перевіряє кожен етап, контролює стабільність факела та формує захисну реакцію при будь-якому відхиленні.

Порівняння старої системи з новою демонструє принципову різницю в рівнях технологічної культури. Автомобільна свічка та БКП — це мінімальна автоматика, що фіксує лише факт горіння у відносно сприятливих умовах. Hegwein і DURAG — це промислові рішення, розроблені для безперервної роботи у високотемпературних середовищах, при змінному навантаженні, у запилених та агресивних газових об'ємах, при зниженому тиску палива та коливаннях тяги. В умовах ТЕЦ та великих котелень таке обладнання перестане бути «модернізацією з метою покращення», а стане базовою умовою доступу до сучасного рівня безпеки [11].

Таким чином, заміна застарілих систем запалювання і контролю полум'я на комплексне рішення DURAG + Hegwein є не лише технічним удосконаленням, але й критично необхідним кроком для переходу від експлуатаційної моделі, що залежить від постійного втручання персоналу, до моделі превентивної безпеки з автоматичним управлінням, діагностикою та прогнозуванням стану обладнання. Це дозволяє суттєво знизити ризики аварій, скоротити простой обладнання, збільшити ресурс роботи паливкової системи, забезпечити стабільність процесу горіння та відповідність сучасним стандартам промислової безпеки і нормативам контролю технологічних процесів у теплоенергетиці.

Алгоритм роботи модернізованої системи запалювання, побудованої на базі запального вузла Hegwein та системи контролю полум'я DURAG, є послідовністю взаємопов'язаних технологічних етапів, спрямованих на забезпечення гарантованого формування та стабілізації полум'я, а також на виключення будь-якої можливості накопичення вибухонебезпечної газоповітряної суміші в топковому просторі. Керування системою

здійснюється модулем автоматики, який забезпечує виконання усіх міжблокувань, перевірку дозволяючих умов, контроль моменту займання, подальшу перевірку стійкості горіння та, у випадку необхідності, аварійне припинення подачі палива з одночасною продувкою топки.

Процес запуску починається із діагностичної фази, протягом якої система виконує перевірку справності елементів, у тому числі цілісності лінії живлення запального пальника, стану електричної мережі високовольтного імпульсного перетворювача, працездатності відсікаючих та регулювальних клапанів газопостачання, наявності тиску та коректності положення органів газорегулюючого обладнання. Одночасно контролюється стан системи подачі повітря, тиск у повітряному тракті, наявність тяги та коректність положення заслінок і шиберів. Якщо хоча б один параметр виходить за межі допустимих значень, алгоритм блокує запуск і формує сигнал несправності. Після підтвердження початкових умов автоматика переходить до етапу попередньої продувки топки. Метою цієї операції є повне видалення залишкових горючих газів або пароподібних фракцій, які могли накопичитися у робочому об'ємі топки після попередньої зупинки або внаслідок нещільностей арматури. Система забезпечує подачу повітря на заданому рівні та витримує регламентований час продувки, контролюючи параметри по тиску, тязі та стану повітряних каналів. Завершення продувки є необхідною умовою для допуску до наступної фази.

Після продувки автоматика дозволяє увімкнення системи запалювання Hegwein. В цей момент запускається високовольтний генератор і формується іскровий імпульс у зоні робочої головки запальника. Одночасно відкривається запальний газовий клапан, і у пальникову головку подається газ у строго дозованій кількості, достатній для утворення стабільного допоміжного факела, але недостатній для створення ризику детонації. Особливість запальника Hegwein полягає в тому, що він забезпечує не тільки електричну іскру, але й керовану стабілізовану подачу палива, завдяки чому формується власний пусковий факел, який здатен горіти незалежно від

режиму основного пальника. На цьому етапі саме якість та енергоємність запального факела визначають здатність системи успішно перейти до подачі основного газу.

У процесі запалювання полум'я запальника контролюється системою DURAG, яка у реальному часі оцінює спектральну структуру випромінювання та перевіряє, що джерелом світла є саме фактичне горіння, а не паразитне теплове випромінювання чи сторонній оптичний шум. Лише після того, як система реєструє стабільне полум'я запальника протягом встановленого часовим регламентом періоду, автоматика дозволяє відкриття основного газового клапана та початок процесу розпалювання головного пальника. При цьому контролюється швидкість нарощування факела, стабільність полум'я, характер його обтікання та тепловий відгук [18].

У разі успішного розпалу основного факела запальник продовжує роботу протягом періоду стабілізації полум'я, після чого автоматика може або знизити його потужність до режиму чергового підтримання, або повністю вимкнути, залежно від прийнятої на об'єкті філософії безпеки. У випадку короткочасного згасання основного полум'я, система може, за умовами безпеки, здійснити повторний запуск без повного циклу продувки, використовуючи все той же запальний вузол.

Якщо ж на будь-якому етапі розпалу або стабілізації система DURAG фіксує відсутність полум'я або нестабільність спалахів, автоматика негайно перекриває подачу газу як на запальник, так і на основний пальник, переходячи до аварійного алгоритму, що передбачає повторну продувку топки для видалення паливної суміші. Далі система або переходить у режим блокування, або виконує чергову спробу розпалу згідно із програмними налаштуваннями безпеки. Принцип fail-safe тут реалізовано у повній мірі: будь-яке сумнівне значення або порушення послідовності дій призводить до безумовного припинення подачі палива.

Таким чином, алгоритм роботи модернізованої системи на базі DURAG та Hegwein забезпечує безперервний контроль кожного етапу процесу

запалення: від перевірки вихідних умов, продувки, формування стабільного запального факела, ідентифікації реального полум'я із застосуванням спектральної селективності, подачі палива на основний пальник, до автоматичного захисту у випадку найменшої аномалії. Подібна архітектура дозволяє повністю виключити неконтрольоване накопичення газу, звести до мінімуму залежність від людського фактора, ліквідувати ризики пізнього займання й вибуху та перевести роботу теплотехнічного обладнання у категорію високої технологічної надійності і промислової безпеки.

Іонізаційний метод контролю полум'я є одним із найбільш надійних і перевірених способів визначення факту горіння газоповітряної суміші в системах теплотехнічного обладнання. Основою цього методу є фізичний процес утворення електропровідного середовища у зоні полум'я як результату хімічної дисоціації молекул пального газу і продуктів його згоряння під дією високої температури. У нормальних умовах газоповітряна суміш є діелектриком, тобто електричний струм через неї не проходить. Проте у зоні горіння, де відбувається інтенсивний тепловий розклад молекул, формується плазмове середовище, яке містить значну кількість позитивних і негативних іонів, електронів та радикалів активованих молекул. Сам факт появи й існування такої іонізованої області й становить фізичну основу іонізаційного способу контролю полум'я.

У практичній реалізації іонізаційного методу використовується електродний датчик, розташований безпосередньо в зоні полум'я або на межі його стабільного факела. Електрод ізольований від корпусу пальника, а між ним і корпусом подається низьковольтна напруга (зазвичай у межах 80–220 В змінного або постійного струму з обмеженим струмом). Коли факел присутній, плазма полум'я стає провідним середовищем, замикаючи електричне коло і створюючи струм іонізації, який, хоча й має дуже малу величину (порядку мікроампер), є достатнім для того, щоб електронна схема могла його розпізнати. Таким чином система автоматично відрізняє стан

«полум'я є» від «полум'я немає» шляхом аналізу величини іонізаційного струму.

Важливо відзначити, що поведінка струму іонізації має нелінійний характер і значною мірою залежить від складу паливної суміші, температури факела, тиску, наявності сторонніх домішок та геометрії пальника. Це обумовлює вимогу до точного розташування контролюючого електрода, стабільної ізоляції, правильного підбору матеріалу електродного стрижня та забезпечення надійного контакту із масою пальника. При порушенні цих умов величина іонізаційного струму може знижуватися до рівня, нижчого порогового, що призводить до помилкових відключень автоматики або нестабільності в роботі системи. Особливу увагу приділяють електричній ізоляції електрода: будь-яке займостіння або пробій ізолятора зменшує інтегральну чутливість системи та може перервати детекцію полум'я.

Однією з головних переваг іонізаційного методу є його здатність контролювати саме факт хімічної реакції горіння, а не лише світлові або теплові ефекти процесу. На відміну від фотоелектричних датчиків, які реагують на інтенсивність і спектральні характеристики випромінювання, іонізаційний контроль безпосередньо вимірює електропровідність іонізованої газової фази. Це означає, що система невразлива до сліплення від розпечених поверхонь камери згорання, до впливу зовнішнього освітлення, пилу, диму або оптичних перешкод. Також іонізаційний контроль дозволяє впевнено розпізнавати слабе полум'я на етапі запуску, що особливо важливо для низькопотужних пальників і фазових переходів запалювання [29].

Разом з тим, іонізаційний метод має і свої обмеження. Його використання є ефективним переважно для газових палив, оскільки саме вони забезпечують достатній рівень утворення заряджених частинок у зоні горіння. Для котлів, що працюють на рідкому паливі або твердому вуглеводневому паливі, цей метод поступається за точністю методам оптичного контролю, зокрема комбінованим UV/IR детекторам. Крім того, електрод іонізації має обмежений термін роботи через контактування з

високотемпературним факелом, почорніння поверхні та поступову деградацію ізоляційного шару, що вимагає періодичного технічного обслуговування.

У сучасних системах безпеки іонізаційний метод часто застосовується як резервний або як допоміжний канал підтвердження полум'я разом із фотоелектронними або спектрально-селективними датчиками. Зокрема, у системах високої відповідальності передбачають кілька незалежних каналів детекції з метою виключення хибних рішень автоматики у випадку несправності одного з вузлів. Іонізаційний контроль, будучи найпростішим з точки зору фізичної реалізації, залишається важливим інструментом технологічної безпеки, але його ефективність і сфера застосування значною мірою визначаються типом палива і конфігурацією пальника.

У контексті модернізації пальникових систем із впровадженням обладнання DURAG і Hegwein роль іонізаційного методу розглядається як допоміжна й історично значуща, оскільки сучасні системи спектрального аналізу полум'я забезпечують точнішу, стабільнішу і відмовостійку роботу, що відповідає вимогам SIL-сертифікації. Встановлення цих систем на котел зображено на Рисунку 2.1. Однак глибоке розуміння принципів іонізаційного контролю залишається необхідним для повноцінної експлуатації та технічного аналізу теплотехнічного обладнання, а також для оцінки переваг сучасних методів у порівнянні з класичними схемами безпеки.



Рис 2.1 Система DURAG+HEGWEIN на котлі

Ультрафіолетові та інфрачервоні методи детекції полум'я є найбільш розвиненими та технологічно досконалими підходами до контролю процесу горіння у сучасних системах промислової автоматики. Вони базуються на аналізі електромагнітного випромінювання, яке генерується в зоні факела внаслідок складних фізико-хімічних процесів, що супроводжують згорання газового чи рідкого палива. У процесі горіння відбувається розрив хімічних зв'язків, утворення активних радикалів, іонізація частинок та перехід молекул у збуджений енергетичний стан. Повернення до стабільного рівня супроводжується випромінюванням енергії у широкому спектральному діапазоні від ультрафіолетового (УФ) до дальнього інфрачервоного (ІЧ). Саме ці властивості дають можливість використовувати спектральний аналіз як інструмент точного визначення наявності полум'я.

Ультрафіолетовий контроль базується на фіксації короткохвильового випромінювання, переважно у діапазоні 180–260 нм, яке виникає у результаті термохімічних реакцій утворення та руйнування активних частинок, зокрема радикалів OH^* , CH^* , C_2^* . УФ-випромінювання є характерною ознакою саме полум'яного горіння; практично жоден зовнішній тепловий процес (такі як нагріті стінки топки або інфрачервона емісія гарячих поверхонь) не здатен створити еквівалентний за частотою та інтенсивністю спектральний сигнал. Це забезпечує одну з ключових переваг УФ-методу — здатність однозначно відрізнити полум'я від сторонніх джерел тепла, що особливо важливо у великих топках із значним рівнем випромінювання з навколишніх поверхонь. Детектори цього типу мають високу швидкодію, реагують на появу або зникнення факела в межах мілісекунд, що робить їх незамінними в системах високого рівня безпеки. При цьому конструкція УФ-сенсора передбачає застосування чутливих фотокатодних матеріалів із високою вибірковістю, а внутрішні схеми обладнання містять електронні фільтри та функції самоконтролю для запобігання спрацьовуванню через шум або перешкоди. Інфрачервоні детектори працюють у діапазоні довжин хвиль 1–5 мкм, де випромінювання пов'язане з тепловими процесами, вібраційними станами

молекул та коливальними спектрами CO_2 і H_2O — продуктів згорання. Саме поява характерної для цих молекул спектральної сигнатури в ІЧ-області дозволяє визначити факт горіння, зображений на Рисунку 2.2. ІЧ-метод є особливо ефективним для палива з високою тепловіддачею і яскравим факелом, зокрема природного газу, мазуту та дизельного палива. На відміну від УФ-методу, який фокусується на процесі хімічної активації частинок, ІЧ-контроль визначає наявність термохімічного випромінювання та газових продуктів згорання. Такий підхід забезпечує стійку роботу навіть у присутності пилу, часткового затуманення оптичного каналу або задимленості, що часто властиве котлам великої потужності та промисловим печам.

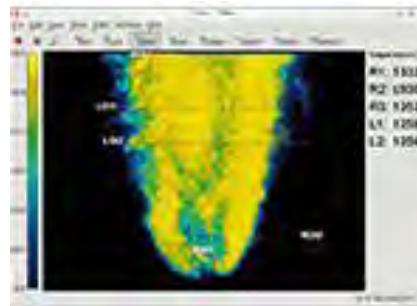


Рис 2.2 Згорання газів у топці котла

Комбіновані УФ/ІЧ детектори поєднують переваги обох методів і дозволяють виключити вірогідність хибних спрацювань, оскільки аналізують спектральні компоненти в декількох діапазонах одночасно, відфільтровуючи як теплову емісію гарячих поверхонь, так і фонові перешкоди [37]. Застосування змішаної логіки дозволяє побудувати систему, здатну працювати в широкому діапазоні режимів пального — від мінімального розпалювального факела до повної потужності з великим факельним фронтом і сильним тепловим випромінюванням. Саме такі технології використовуються в обладнанні DURAG, яке передбачає глибоку спектральну селекцію, аналіз частотних характеристик мерехтіння, внутрішню самодіагностику та адаптивну фільтрацію сигналів.

На практиці УФ та ІЧ детекція значно перевершують традиційні фоторезистивні системи контролю полум'я за точністю, швидкістю, нечутливістю до оптичних перешкод і здатністю відокремлювати полум'я від паразитних джерел випромінювання. Вони здатні працювати в умовах високого ступеня забруднення топки, коливання складу палива, змін тяги, а також на об'єктах зі значним тепловим напруженням, де класичні фотоелектричні датчики та прості системи контролю втрачали достовірність або видавали хибні команди. Крім того, УФ/ІЧ технології відповідають міжнародним стандартам безпеки та сертифікації SIL, що є принциповим фактором для ТЕЦ, промислових печей та енергетичних котлів.

Таким чином, ультрафіолетовий і інфрачервоний методи контролю полум'я є результатом еволюції засобів безпеки з акцентом на точність, відмовостійкість і здатність працювати у найскладніших режимах горіння. Вони забезпечують не просто фіксацію факту займання, а комплексне високоточне розпізнавання умов горіння, що дозволяє підтримувати безпечну роботу пальникових систем, оперативно реагувати на відхилення та виключати будь-який сценарій неконтрольованого нагромадження газу або пізнього займання. У сучасних енергетичних установках ці методи стали стандартом, визначаючи новий рівень технологічної культури та безпеки промислового теплогенеруючого обладнання.

Фотодатчик системи DURAG є високотехнологічним спектрально-селективним сенсором, призначеним для надійного визначення наявності полум'я в промислових газових та комбінованих пальникових установках. На відміну від традиційних фотоелектричних датчиків, що працюють у видимому діапазоні і фактично реагують лише на інтенсивність світлового випромінювання, фотодатчики DURAG реалізують принципово інший підхід, заснований на одночасному аналізі ультрафіолетової та інфрачервоної складових спектру факела. Це дозволяє їм розрізняти саме фізико-хімічний процес горіння, а не просто наявність світлових або теплових сигналів у полі зору.

Основою роботи фотодатчика DURAG є властивість полум'я генерувати характерне спектральне випромінювання, зокрема короткохвильову УФ-компоненту, обумовлену хімічною активацією радикалів, та інфрачервоне випромінювання, пов'язане з вібраційними переходами продуктів згорання, насамперед CO_2 та H_2O . Датчик не лише фіксує ці компоненти, але й здійснює постійний аналіз співвідношення між ними, частотних характеристик мерехтіння факела, інтенсивності спектру та динаміки зміни сигналу. Таким чином формуються комплексні критерії достовірної ідентифікації факела, що виключає можливість хибного сигналу при наявності розпечених поверхонь, відбиттів, іскор запальника або випадкового світіння сторонніх джерел [45].

Поєднання УФ та ІЧ каналів дозволяє фотодатчику DURAG забезпечувати контроль горіння навіть у складних умовах, таких як пилогазові середовища, висока яскравість випромінювання футерівки котла, присутність розжарених металевих елементів та нестабільні турбулентні потоки. Водночас висока швидкодія детектора забезпечує негайну реакцію на втрату полум'я або зсув факельного фронту, що критично важливо для систем безпеки, працюючих у режимі реального часу.

Особливістю фотодатчиків DURAG є наявність внутрішньої інтелектуальної електроніки із функціями самотестування, моніторингу чутливості, контролю чистоти оптичного тракту і діагностики власного стану. Вони здатні виявляти деградацію приймального елемента, забруднення оптичного вікна, нестабільність підсилювальних каскадів та інші параметри, які могли би призвести до помилкового підтвердження полум'я. У традиційних фотоелектричних датчиках серії «Факел» або у схемах іонізаційного контролю таких функцій не існувало, що створювало ризики латентних відмов і неконтрольованих сценаріїв. DURAG же застосовує підхід fail-safe, при якому будь-яка невизначеність тракту автоматично інтерпретується як відсутність підтвердження полум'я.

Порівняння з іонізаційним методом демонструє, що хоча струм іонізації є надійним показником для газового горіння, він пов'язаний із необхідністю фізичного контакту електрода з зоною полум'я, що обмежує його застосування при високих теплових навантаженнях, на великих пальниках і в середовищах із сильним забрудненням. Крім того, іонізаційний контроль не може бути використаний у випадках горіння рідкого палива або при роботі з пиловугільними факелами. У той же час фотодетектори DURAG універсальні по відношенню до типу палива і здатні контролювати як газові, так і рідкопаливні, а також комбіновані пальники, що робить їх універсальним рішенням для ТЕЦ.

Фактично фотодатчик DURAG можна розглядати як еволюційний перехід від пасивного фотоелектричного контролю до активного інтелектуального аналізу процесу горіння. Вони не просто «бачать світло», а розуміють поведінку полум'я в часі та спектрі, відрізняють стабільне горіння від випадкових спалахів і здатні безпомилково визначити момент згасання в умовах, коли класичні фотосистеми або іонізаційні електроди втрачають чутливість.

Саме завдяки цим властивостям системи DURAG об'єктивно є найкращим вибором при модернізації пальникового обладнання, особливо у складі комплексу із запальними пристроями Hegwein, які забезпечують стабільний та гарантований факел підпалу. Разом ці системи формують замкнений контур безпеки, у якому кожен етап запуску, підтримки горіння та аварійного реагування перебуває під автоматичним контролем, а детектор полум'я DURAG виступає ключовим “сенсорним органом” усієї системи, забезпечуючи необхідний рівень промислової безпеки відповідно до сучасних міжнародних стандартів.

Запальний пристрій Hegwein являє собою високонадійний промисловий вузол, призначений для ініціювання горіння у газових та комбінованих пальникових системах шляхом створення стабільного, самопідтримуваного факела запалювання. На відміну від традиційних

електродних запальників, що формують лише короткочасний високовольтний іскровий імпульс, запальвачі Hegwein поєднують дві функції — генерування іскри та одержання стійкого мікрофакела, який здатен горіти протягом усього часу, необхідного для гарантованого підпалу основного пальника. Це робить їх принципово відмінними за конструкцією, надійністю та експлуатаційними характеристиками.

Конструктивно запальник Hegwein, Риунок 2.3, Характеритики наведені у Таблиці 2.1, складається з декількох ключових вузлів: корпусу з високотемпературною ізоляцією, соплової головки, високовольтного електродного вузла, каналу подачі запального газу, системи охолодження та монтажного фланця, що забезпечує правильне позиціонування у пальниковому каналі. Корпус виготовляється з термостійких матеріалів, здатних тривалий час працювати при високих температурах топкових газів і прямому впливі факела. Внутрішній електродний вузол виконаний із використанням жаростійких металевих елементів та керамічних ізоляторів підвищеної механічної міцності, що суттєво відрізняє його від стандартних свічкових рішень, які традиційно використовувалися у старих пальникових системах.



Рис 2.3 Запальник HEGWEIN

Таблиця 2.1.

Технічні характеристики HEGWEIN

Параметр / властивість	Характеристика
Теплова потужність	Від приблизно 2 кВт до 10 МВт (залежно від моделі)
Зовнішній діаметр трубки	Від 15 мм до 160 мм
Довжина запальної трубки	Від 240 мм до 18 000 мм (також можливе індивідуальне виконання)
Використовуване паливо	Природний газ, пропан, бутан, коксовий газ
Тип роботи	Переривчастий або безперервний (постійний факел)
Наявність контролю полум'я	Іонізаційний електрод або можливість встановлення оптичного датчика
Конструктивні елементи	Модульна конструкція, можливість заміни вузлів, інтегрований трансформатор запалювання
Умови експлуатації	Промислові котли, топки, печі, пальникові пристрої великої потужності
Система безпеки	Доступні варіанти у вибухозахищеному виконанні; сумісність із системами SIL2 та SIL3
Максимальна теплопродуктивність установки	Підходить для пальників і котлів великої потужності до 10 МВт

Подача газу до соплової частини запальника виконується через спеціалізований канал, що забезпечує оптимізовану витрату палива і необхідний ступінь турбулізації для стабілізації полум'я. Пускова іскра, що формується високовольтним генератором, підпалює газовий потік в зоні

сопла і створює коротку, але високотемпературну зону горіння, яка швидко переходить у режим самостійного полум'я малого розміру. Геометрія вихідного сопла Hegwein спроектована таким чином, щоб забезпечити утворення факела з високою стійкістю до зриву, навіть у випадках сильного повітряного потоку з боку основного пальника або при коливаннях тяги у топковому тракті.

Запальники Hegwein часто обладнуються системою повітряного охолодження, яка подає невеликий об'єм стисненого повітря в зону розміщення електродів і сопла, тим самим запобігаючи перегріву, зменшуючи нагароутворення та продовжуючи ресурс роботи запального вузла. У ряді моделей передбачено також механізм відведення запальника з топки після завершення розпалювання, що дозволяє застосовувати їх у надпотужних пальниках із екстремальними тепловими навантаженнями. Завдяки цьому конструкція Hegwein має значно більшу довговічність та стабільність у порівнянні з простими електродними запальниками.

Функціонально запальник Hegwein працює в автоматичному режимі, отримуючи сигнали від системи управління пальником. Послідовність його роботи передбачає подачу живлення на високовольтний блок, відкриття запального газового клапана, формування іскри, стабілізацію полум'я та подальше підтвердження полум'я системою контролю, такою як DURAG. Лише після отримання сигналу підтвердження запального факела автоматична система керування дозволяє подачу газу на основний пальник. Це принципово відрізняє Hegwein від застарілих імпульсно-іскрових систем, де запалювання виконувалося короткочасно без гарантії наявності стійкого осередку полум'я.

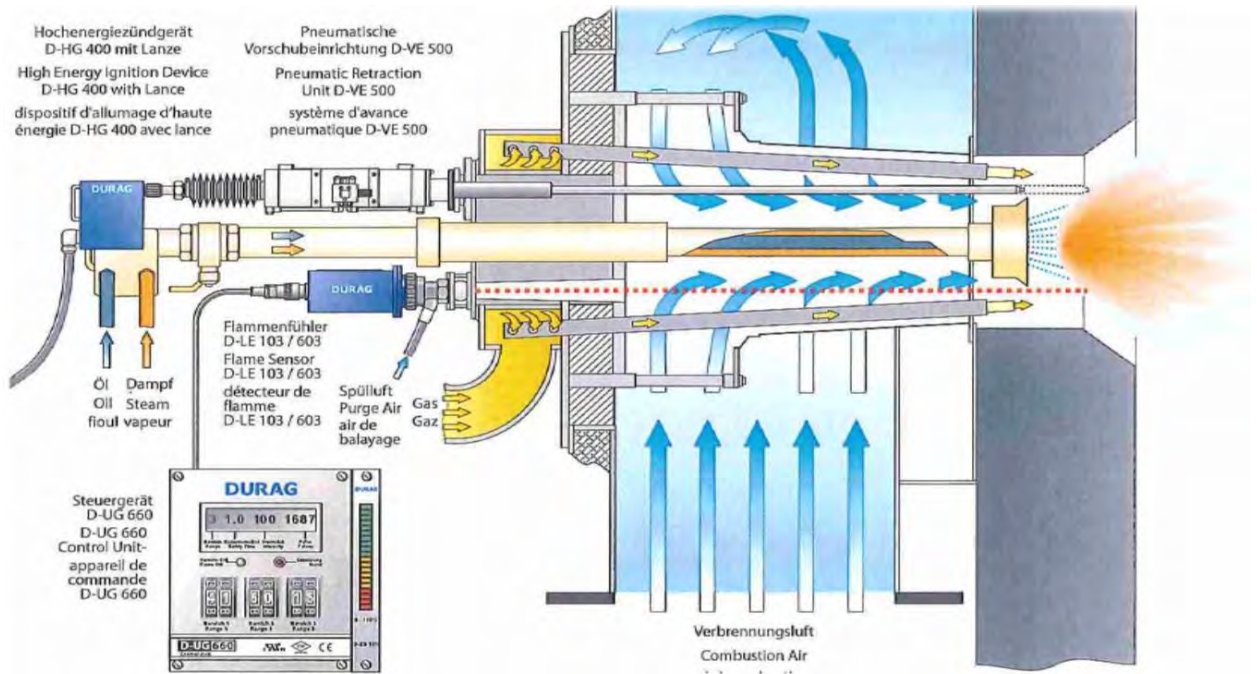


Рис 2.4 Hegwein у складі комплексних систем безпеки

Важливим аспектом є те, що запальники Hegwein розроблені таким чином, щоб працювати у складі комплексних систем безпеки з багаторівневою перевіркою функцій, включаючи контроль тиску газу, контроль наявності повітря, функцію продувки, системи блокування повторного розпалювання та циклічної перевірки стану запального тракту [41]. Завдяки цьому такі пристрої забезпечують відповідність вимогам сучасних нормативів EN 298, SIL та ATEX, а їх використання на ТЕЦ і в котельно-пальникових системах промислового призначення є стандартом високої культури безпеки, як на Рисунку 2.4.



Рис 2.5 Силова частина запальника Hegwein

Таким чином, запальник Hegwein є не просто засобом генерації іскри, а повноцінним автономним мікропальником, що створює стабільне полум'я, забезпечує контрольований перехід до режиму основного горіння та працює в інтеграції з інтелектуальними системами контролю полум'я, Рисунок 2.5. Його конструктивні переваги, висока термічна стійкість, адаптованість до автоматизованих схем керування та довговічність роблять його незамінним елементом сучасних систем розпалу на теплових енергетичних об'єктах. Використання таких пристроїв у складі модернізованої автоматики дозволяє істотно підвищити надійність процесу запалювання, скоротити ризики аварійних ситуацій та забезпечити стабільну і безпечну експлуатацію обладнання при будь-яких режимах роботи пальників.

2.3 Технологічні процеси системи розпалу

Перевірка газощільності перед розпалом запальника є однією з ключових процедур технологічної та вибухопожежної безпеки у системах спалювання газоподібного палива, особливо в умовах роботи теплотехнічного обладнання ТЕЦ, котелень та промислових печей. Ця операція є невід'ємним елементом алгоритму пуску та виконується з метою

гарантування того, що у внутрішніх порожнинах газової арматури, суміжних трубопроводах та пальниковому трактові не накопичилася вибухонебезпечна газоповітряна суміш, яка може запалитися у неконтрольований спосіб при появі іскри запальника або контактною взаємодією з гарячими поверхнями. Відсутність контролю за газощільністю до моменту подачі газу на запальник є одним із найнебезпечніших факторів, що потенційно призводить до спалаху, вибуху або руйнування пальникового обладнання.

Фізична сутність цієї вимоги полягає у тому, що газоподібне паливо, перебуваючи під надлишковим тиском у трубопроводах та запірній арматурі, може поступово проникати через негерметичності ущільнень, сідла клапанів або різьбових з'єднань навіть при номінально закритих органах відсікання. Якщо такий витік триває певний час, особливо після попередньої зупинки пальника, у внутрішньому об'ємі газової лінії, камері змішування або у зоні запальника може накопичитися газ, що після змішування із повітрям утворює вибухонебезпечну концентрацію. При запуску системи і подачі напруги на високовольтний запальник цей газ може спалахнути миттєво і неконтрольовано, що в реальних умовах призводить до гідродинамічного удару, розриву корпусу пальникової головки або проєкції полум'я у зворотному напрямку. Такі явища мають критичні наслідки для персоналу та обладнання [50].

Перевірка газощільності виконується шляхом послідовного керування клапанами газової траси та контролю падіння тиску у визначеному контрольному об'ємі. У типовому алгоритмі сучасної автоматики після припинення подачі газу обидва відсічні клапани (первинний та вторинний) повинні бути закриті, після чого відслідковується стабілізація тиску у проміжній зоні між ними. Якщо тиск у цьому об'ємі протягом визначеного нормативом часу залишається стабільним, система робить висновок про щільність тракту і дозволяє перехід до етапу продувки та запалювання. У випадку падіння тиску система фіксує негерметичність, блокує запуск, подає відповідний сигнал та вимагає обслуговування газової арматури. Цей

принцип максимально наближений до методів контролю, що застосовуються в газорозподільних системах високого класу безпеки.

У системах старого типу така перевірка або виконувалася оператором вручну, або не передбачалася взагалі, що значно підвищувало ймовірність аварійної ситуації. Багаторічний досвід експлуатації газового енергетичного обладнання показує, що навіть одиничний випадок неконтрольованого займання газу під впливом залишкового забруднення, іскри або гарячих фрагментів конструкції може призвести до катастрофічних наслідків. Саме тому сучасні норми безпеки EN 298, EN 746-2, ДСТУ та НПАОП чітко регламентують обов'язковість перевірки газощільності перед розпалом. Ця вимога також відповідно інтегрована у стандарти забезпечення функціональної безпеки SIL (IEC 61508/61511), де перевірка герметичності тракту розцінюється як одна з умов досягнення допустимого рівня залишкового ризику.

Слід підкреслити, що перевірка газощільності є невід'ємною частиною сучасних систем безпеки пальників Hegwein і контролерів DURAG. Вони мають не лише електричні та пневматичні міжблокування, а й алгоритми, які забезпечують повний цикл контролю герметичності перед подачею газу на запальник. Це дозволяє усунути людський фактор, мінімізувати залежність від операторського контролю та забезпечити стабільність безпекового циклу навіть у умовах безперервної експлуатації на об'єктах ТЕЦ. Автоматизований підхід дозволяє проводити перевірку кожного запуску, чого практично неможливо досягти при ручному обслуговуванні, особливо при багатократних пусках у режимах частих пусків-зупинок.

Таким чином, необхідність перевірки газощільності перед розпалом запальника обумовлена трьома фундаментальними факторами: фізичною природою газу як вибухонебезпечного середовища, вимогами нормативів і стандартів промислової безпеки та практикою експлуатації енергетичних об'єктів, що підтверджує незаперечний зв'язок між герметичністю газового тракту і безпечним пуском пальника. Ігнорування цього етапу було

характерним для устарілих систем, проте у сучасних умовах воно є неприпустимим. Впровадження автоматизованого контролю герметичності є ключовим чинником переходу до високонадійної та безпечної експлуатації газових технологічних комплексів, а модернізація старих систем розпалювання шляхом встановлення обладнання Hegwein і контролерів DURAG забезпечує повну реалізацію цієї вимоги на рівні промислового стандарту, порівняльна характеристика цих двох елементів показана у Таблиці 2.3.

Процедура продувки топки перед розпалом є однією з ключових операцій у технологічній послідовності пуску котлоагрегатів та пальникових систем газового і рідинного палива. Її головне призначення полягає у видаленні із топкового простору, газоходів і конвективних поверхонь будь-яких залишкових горючих газів, парів або продуктів неповного згоряння, які можуть утворити вибухонебезпечну суміш у разі контакту з джерелом займання. Наявність навіть незначного об'єму невидимого газоповітряного шару, насиченого метаном, пропаном, воднем або парами вуглеводневого палива, є критичним ризиком. При поєднанні із появою іскри чи гарячої поверхні цей шар може миттєво спалахнути, створюючи надзвичайно високу хвилю тиску, здатну зруйнувати пальникову систему, пошкодити топкову футерівку та створити загрозу для персоналу. Саме тому продувка перед розпалом вважається базовим і обов'язковим етапом, без якого пуск пальника є категорично забороненим [27].

На практиці продувка здійснюється шляхом подачі у топку повітря або суміші повітря і топкових газів із достатньою швидкістю для створення спрямованого потоку, що витісняє горючі гази у димовий тракт. Режим продувки визначається конструкцією котла, потужністю дуттєвих вентиляторів та аеродинамічними характеристиками топкового простору. Основний принцип полягає у забезпеченні такого об'єму повітряного промивання, який у 3–5 разів перевищує геометричний об'єм топки й прилеглих каналів. Це гарантує, що навіть у випадку нерівномірності руху

газових потоків чи застійних зон весь залишковий газ буде повністю витіснений та розсіяний до безпечної концентрації, яка нижча за нижню межу вибуховості.

У процесі продувки автоматика контролює декілька критичних параметрів: стабільність тяги, положення шиберів і заслінок, тиск у повітряному тракті, справність сигналізації та блокувань, а також відсутність подачі палива. Будь-яке відхилення від заданих умов приводить до автоматичного припинення процедури і блокування пуску. Особливо важливо, щоб вентилятори та димососи працювали у штатному режимі, оскільки недостатній повітряний потік або нестабільна тяга створюють умови для часткового перемішування газів і збереження вогнебезпечної концентрації. Саме тому продувка виконується автоматично, за регламентованою програмою, а керування процесом передається системі безпеки, що виключає помилки оператора.

Важливим аспектом є часовий регламент продувки. У традиційних системах ТЕЦ він становив від 30 секунд до кількох хвилин залежно від типу палива, потужності агрегату та стану повітропроводів. Сучасні стандарти безпеки EN 746-2 та EN 298 визначають необхідність дотримання мінімально гарантованого часу продувки, який обчислюється із фактичної кратності заміщення об'єму камери згоряння та газоходів. Це виключає можливість формального або скороченого продування, яке колись могло мати місце на старих системах при ручному керуванні. Автоматизовані пальникові блоки з контролерами типу DURAG, рисунок 2.6, його технічні характеристики представлені у Таблиці 2.2, та запальниками Hegwein інтегрують функцію примусової продувки, і запуск системи фізично неможливий, доки продувка не буде завершена в повному обсязі.



Рис 2.6 Контролер DURAG

Таблиця 2.2.

Технічні характеристики DURAG

Параметр	Значення
Напруга живлення	24 В DC або 230 В AC
Споживана потужність	4...12 Вт
Чутливість фотодатчика	0,1–1,8 мкВт/см ²
Максимальна дистанція детекції	до 9–12 м (у візирній трубі)
Час реакції на зникнення полум'я	0,2–0,5 с
Час реакції на появу полум'я	0,1–0,3 с
Робочий тиск візирної труби	до 10 бар

Матеріал корпусу	Нержавіюча сталь AISI 304/316
Термін служби фотодатчика	20 000–30 000 годин
Маса датчика	1,8–3,2 кг

Таблиця 2.3.

Порівняльна характеристика DURAG та Hegwein

Характеристика	DURAG (детекція полум'я)	HEGWEIN (запальник)
Час спрацювання	0,1–0,5 с	0,5–2 с
Робоча температура	–20...+60 °C	До +900 °C в зоні факела
Термін експлуатації	8–12 років	5–10 років
Система захисту	IP65–IP67	IP54–IP65
Живлення	24 В DC / 230 В AC	230 В AC
Стійкість до вібрацій	Висока	Середня
Принцип роботи	Оптична детекція	Іскрове запалювання

Обслуговування	Раз на 6–12 міс	Раз на 3–6 міс
Відстань до центру факела	1,5–3 м	0,1–0,3 м
Кут встановлення	3–10° до осі пальника	Прямо в зону розпалу
Максимальна довжина кабелю	до 50 м	до 30 м
Мінімальний радіус вигину кабелю	50 мм	40 мм
Потреба в охолодженні	За температур >60 °С	Постійне повітряне або водяне
Мінімальний тиск повітря для охолодження	—	30–80 л/хв

Продувка впливає не лише на вибухобезпечність. Вона також покращує умови запалювання, забезпечуючи чистоту топкової камери від залишків продуктів неповного згоряння та сажистих відкладень, що можуть впливати на формування факела. Частинки сажі, мікрокраплі незгорілого палива і локальні зони перегрітого газу є факторами нестабільності, які здатні призвести до слабкого, розшарованого або відривного полум'я. Відповідно, продувка створює рівномірний повітряний фон, що сприяє прогнозованому розпалу запального факела Hegwein та стабільній роботі системи контролю полум'я DURAG.

У порівнянні з застарілими технологіями, де продувка могла виконуватися вручну або сприйматися як необов'язкова, сучасний підхід передбачає повну автоматизацію і неможливість втручання оператора. Цей принцип відповідає філософії fail-safe: будь-яка відсутність підтвердження завершеної продувки блокує запуск палива. У системах старого типу подібні алгоритми були відсутні або виконувалися частково, що створювало потенційні сценарії накопичення газу в комунікаціях і топці, особливо при частих пусках чи незавершених циклах вимкнення. Встановлення сучасної автоматики із обов'язковою продувкою є прикладом переходу від експлуатаційної безпеки до стандартизованої технічної безпеки системи.

Отже, продувка топки перед запалюванням є критичним технологічним етапом, який не тільки усуває ризик вибуху при запуску системи, але й забезпечує оптимальні умови для стабільного формування полум'я, підвищує надійність роботи пального обладнання та продовжує його ресурс. Впровадження сучасних запальних систем Hegwein та спектральних детекторів DURAG автоматизує цю процедуру, роблячи її обов'язковою, контрольованою, документованою та незалежною від людського фактора. Саме це відрізняє сучасні системи безпеки від застарілих схем розпалу, у яких продувка могла залежати від дисципліни оператора або бути виконана неповністю. У комплексі з контролем газощільності та алгоритмом захисту ці заходи формують цілісну концепцію безпечного пуску і експлуатації котлоагрегата, що відповідає міжнародним та галузевим стандартам промислової безпеки.

Підпал парово-мазутної суміші характеризується суттєвими технологічними відмінностями від стандартного газового розпалу і вимагає спеціалізованого підходу з боку запалювально-захисних пристроїв. Мазут у поєднанні з паром формує дисперсну паливну фазу: дрібні краплі, аерозольні частки та парафінові компоненти утворюють суміш з повітрям, яка має своєрідну кінетику випаровування, запалюваності і кутів детонації. Цей режим зумовлює необхідність врахування тепло-масообмінних процесів

вкрай уважно — енергія підпалу повинна бути достатня не лише для ініціації горіння, але й для забезпечення стійкої самопідтримки процесу до моменту, коли палаючі частки перейдуть у режим повноцінного факела. Роль ЗЗП у такому контексті полягає у забезпеченні кількох взаємопов'язаних функцій: гарантування безпечної послідовності операцій, контролю параметрів підготовки паливно-повітряної суміші (температури та тиску пари, ступеня дисперсності мазуту), управлінні дозуванням палива, перевірці герметичності й відсутності невитрачених зон в топці, а також у надійному моніторингу самого моменту займання із застосуванням підходящих детекторів [21].

Перш за все, ЗЗП мають забезпечити коректну підготовку парово-мазутної суміші до моменту підпалу. Це включає контроль температури підігріву мазуту, що визначає його в'язкість і здатність до нормального розпилення, регулювання тиску подачі пари для утворення стабільної аерозольної фази, а також налаштування форсунок або розпилювачів на задану величину краплинності. Невірна підготовка веде до утворення великих крапель, які не випаровуються вчасно, створюють локальні холодні зони і можуть призводити до залипання або накопичення незгорілого палива на поверхнях. У цих умовах підпал може не розвинутиися або перейти в режим нерегулярного поверхневого горіння з високим утворенням диму і сажі. ЗЗП контролюють весь цикл підготовки і мають заблокувати подачу палива, якщо параметри підігріву чи тиску пари виходять за допустимі межі. Другий важливий аспект — послідовність операцій, яка повинна виключати наявність концентрацій палива у зонах, де виникає іскра або полум'я. ЗЗП керують попередньою продувкою, що для парово-мазутних сумішей має особливе значення, оскільки продувка повинна усунути як газоподібні залишки, так і важчі аерозолі з мертвих зон. Процедура продувки в таких установках часто супроводжується підвищеним об'ємом повітря і подовженим часовим інтервалом, контролюваним за показниками тиску і концентрації горючих речовин у відведених контрольних точках. ЗЗП

зчитують параметри димових газів, температуру багаття й інші індикатори, і лише після підтвердження безпечного стану допускають розпил палива і включення запальника.

Безпосередня ініціація займання парово-мазутної суміші також має власні специфічні вимоги до ЗЗП. Через необхідність забезпечити вплив достатньої енергії та місцевого температурного підйому до значень, що перевищують температуру спалаху краплин мазуту, запальний пристрій має генерувати або іскру значної енергії, або створювати сталий проміжний факел (наприклад, газову підпальну полум'я), що дозволить перейти від локального займання окремих аерозольних частинок до самопідтримуваного фронту горіння. Негwein-типові запальники у такому випадку мають перевагу, оскільки їхній мікрофакел здатен за короткий час підвищити локальну температуру і стабілізувати перехідний режим. ЗЗП повинні координувати роботу форсунок розпилення і запальника так, щоб інтенсивність розпилу і енергія запалу відповідали одне одному — надмірне розпилення при слабкому запалі може призвести до накопичення незгорілого мазуту, тоді як слабке розпилення із сильним запалом може не забезпечити потрібної площі контакту між паром/аерозолем і пламенем.

Моніторинг моменту підпалу в парово-мазутних умовах вимагає застосування детекторів, чутливих до спектральних і теплових характеристик цього типу горіння. Традиційні фоторезистивні датчики часто виявляються неефективними через глибоку задимленість та присутність сажі; іонізаційні методи можуть працювати, але їх чутливість змінюється внаслідок вологості й наявності дрібних крапель. Тому роль ЗЗП включає застосування комбінованих спектральних сенсорів (УФ/ІЧ), що здатні розрізнити характерні спектральні лінії продуктів згоряння та інтенсивність теплової емісії. Сучасні ЗЗП отримують сигнали від кількох незалежних каналів і застосовують логіку, згідно з якою позитивне підтвердження полум'я потребує узгодження даних кількох джерел, що значно знижує ризик хибних рішень в умовах зашумленого оптичного каналу. Додатково використовують

вимірювання температури в зоні розпилу, аналіз складу вихлопу (CO , CO_2 , O_2), а також контроль калорійності й густини аерозолу [5].

Не менш важливою є реакція ЗЗП на аномалії під час підпалу. У випадку виявлення нестандартного сигналу (висока задимленість, відсутність стабільного оптичного сигналу, падіння тиску пари або підйом в'язкості мазуту) автоматика повинна миттєво перекрити подачу палива, відключити запальний пристрій і запустити розширену процедуру продувки з метою евакуації залишків палива. Важливо, щоб ця реакція була апаратно-реалізована і не залежала від PLC чи загальної SCADA, тобто ЗЗП повинні мати власний «код безпеки», який гарантує виконання fail-safe операцій. Також повинні бути передбачені послідовні спроби перезапуску з обов'язковою перевіркою кожного етапу та обмеженням числа повторів, щоб уникнути циклу непланових підпалів.

З точки зору матеріально-технічної реалізації, ЗЗП у парово-мазутних системах включають спеціалізовані форсунки з підігрівом та системами обмеження розпилу, датчики температури й в'язкості мазуту, манометри пари й газів, спектральні детектори полум'я з системою самодіагностики, контролери герметичності й обладнання для продувки з регульованою швидкістю. Вся ця апаратура повинна бути вибрана з урахуванням корозійних та абразивних факторів, що супроводжують мазутні середовища, а також мати зручні засоби обслуговування для регулярної чистки й калібрування детекторів.

На рівні експлуатаційної політики роль ЗЗП також включає документовані процедури і тренінги для персоналу. Оператори повинні розуміти, що підпал парово-мазутної суміші — це не рутинна операція, а комплекс технічних дій із суворими умовами допуску. ЗЗП зобов'язані вести журнал кожного запуску, фіксувати параметри підігріву, часу продувки, склад і температуру вихлопу, спрацьовування діагностичних сигналів і причини блокувань. Такий підхід дозволяє аналізувати тенденції деградації обладнання і планувати профілактичні роботи, знижуючи ймовірність аварій.

Підсумовуючи, роль запалювально-захисних пристроїв при підпалі парово-мазутної суміші є центральною і багатогранною: вони забезпечують правильну підготовку палива, керують послідовністю технологічних операцій, координують роботу форсунок і запальника, здійснюють точний та надійний моніторинг моменту підпалу, миттєво реагують на аномалії і документують процес для подальшого аналізу. Від якості реалізації цих функцій безпосередньо залежить безпека експлуатації, екологічні показники і економічна ефективність установки, тому при модернізації паливних систем саме надійні і правильно спроектовані ЗЗП визначають можливість безпечної та стабільної роботи з парово-мазутними режимами.

Керування електромагнітними клапанами на підводі газу і мазута у модернізованій системі з DURAG реалізується як частина функцій керування паливом і контурів безпеки, де сам контролер горіння виступає «мозком» послідовності пуску, підтвердженням полум'я та виконавцем відмовобезпечного відключення палива. Логіка побудована так, щоб будь-який сумнів у стані полум'я, повітря, тиску, герметичності або послідовності етапів негайно призводив до знеструмлення котушок клапанів і механічного закриття подачі палива. Для газу типовим є двоклапанний вузол відсікання з проміжною камерою контролю герметичності (double block & bleed), де два серійні електромагнітні клапани відкриваються лише за наявності всіх дозволів, а проміжний дренажний відвід у спокої розвантажує міжклапанний об'єм у безпечний напрям. DURAG формує команди відкриття й контролює підтвердження положення через кінцеві вимикачі, а перед розпалом виконує перевірку щільності: обидва газові клапани закриті, проміжний об'єм під тиском ізолюється, аналізується падіння тиску у заданому інтервалі часу, і лише за відсутності витоків система переходить до продувки та етапу відкриття запального тракту. Уся ця послідовність реалізується апаратно-програмно в модулі DURAG із жорсткими таймінгами, що забезпечують відмовобезпечність незалежно від SCADA чи загального PLC.

Під час пуску керування клапанами газу підпорядковане алгоритму продувки й запалювання. Спершу контролер перевіряє стан повітряного тракту та тяги, потім запускає продувку, і лише після підтвердження її завершення подає напругу на котушку запального газового клапана. Відкриття виконується за принципом «енергізувати для відкриття», а відключення — через втрату живлення, що у природі електромагнітного клапана означає пружне повернення у закрите положення. Це важлива філософія fail-safe: будь-яка втрата живлення, обрив ланцюга, відмова реле, спрацювання захисту, або саме зникнення сигналу полум'я призводять до миттєвого закриття. Після підтвердження стабільного запального факела через фотодетектор DURAG дозується подача на основний газовий клапан; відкриття відбувається по контрольованому профілю часу, щоб уникнути гідродинамічного удару та різкого фронту факела [14]. У цей момент контролер відстежує швидкість зростання сигналу полум'я, тиск газу на вході, стан кінцевиків і інтерлоки від зовнішніх вимикачів тиску, а також температуру та стан повітря. Будь-який відхил від очікуваної динаміки зупиняє процес з одночасним закриттям обох газових клапанів і поверненням до продувки.

Особливості керування клапанами по мазуту додають ще один рівень міжблокувань, адже мазутний тракт включає підігрів, стабілізацію в'язкості, циркуляцію та, за потреби, парову або повітряну атомізацію. DURAG у складі пальникового комплексу взаємодіє з вузлом розпилу через керування електромагнітними клапанами низького або середнього тиску, що відсікають подачу мазуту до форсунки та керують рециркуляцією на колектор під час підготовки. Пусковий алгоритм не дозволяє відкрити лінійні мазутні клапани, доки не підтверджено готовність: досягнуто задану температуру підігріву, в'язкість у допустимому коридорі, стабільний тиск у живильній лінії, готова атомізація, завершена продувка топки та активний запальний факел із підтвердженим УФ/ІЧ-каналом. Після цього DURAG подає живлення на котушки послідовно: спершу відкривається клапан на лінії

атомізатора, формується стабільний струмінь розпилювача, далі з невеликою затримкою відкривається основний мазутний клапан на форсунку. Перехідний режим контролюється по оптичному каналу: інтенсивність і спектральна сигнатура полум'я повинні відповідати очікуваній картині для рідкопаливного факела. У разі «холодного факела», надмірної димності чи провалу полум'я керування котушками негайно знімається, клапани закриваються, і запускається розширена продувка топки.

З точки зору електрики, вихідні кола DURAG на котушки клапанів виконуються через проміжні реле або силові модулі з гальванічною розв'язкою, інколи через контактори для клапанів великої потужності, із живленням від незалежного джерела безпеки та постійним моніторингом цілісності кола. Стандартна топологія включає діагностику розриву та залипання контактів: контролер періодично перевіряє, чи відповідає фактичне положення клапана команді, використовуючи сигнали «клапан відкрито» і «клапан закрито» з кінцевих вимикачів або вбудованих позиційних датчиків. Невідповідність станів у відведений час розцінюється як небезпечний відказ, і система виводиться у блокування до з'ясування причин. Для вибухонебезпечних зон котушки застосовуються у вибухозахищеному виконанні з потрібним класом захисту, з обов'язковою перевіркою IP-ступеня, температурного класу і відповідності категорії середовища. Силові ланцюги оснащуються демпфувальними ланками (RC або діоди) для гасіння ЕРС самоіндукції, щоб не впливати на чутливу вимірювальну електроніку фотосенсорів.

Особливе місце займає функція «доказу закриття» і періодичних перевірок працездатності. Перед кожним запуском DURAG вимагає підтвердження, що всі паливні клапани перебувають у закритому стані, а при роботі — може виконувати короткі тестові імпульси або часткове ходкування (partial stroke) клапанів у технологічні вікна, якщо це допускає регламент, для виявлення прихованого залипання. Для газового DBB-вузла контроль герметичності міжклапанного простору виконується за манометричним

датчиком тиску: якщо при закритих V1 і V2 тиск падає нижче порога, вважається, що один з клапанів нещільний, і система не дає дозвіл на подачу газу. Аналогічно на мазуті відстежується падіння тиску у лінії при закритих електромагнітних клапанах; нестабільність трактування змушує автоматику блокувати запуск до усунення витоків або ремонту арматури.

Перемикання «газ ↔ мазут» організовується як взаємовиключні стани з жорсткими інтерлоками. DURAG не допускає одночасного відкриття газових і мазутних ліній на одну пальникову головку; переходи виконуються лише через безпечні проміжні стани: зниження навантаження, закриття активної паливної гілки, продувка, підтвердження готовності альтернативного палива, запуск запального факела, дозоване відкриття клапанів нового палива. Усі ці кроки супроводжуються підтвердженням по полум'ю, тискам, температурі, в'язкості та стану повітря. Будь-яка аномалія знімає живлення з котушок, і пальник переходить у безпечну зупинку [1].

Часова реакція на втрату полум'я є ключовою характеристикою. DURAG тримає виходи на клапани під контролем спектрального каналу; зникнення достовірного сигналу полум'я призводить до відключення електромагнітних клапанів у межах сотень мілісекунд, після чого схема запускає продувку і виконує блокування повторного запуску до закінчення регламентованої паузи. Для запобігання «пізньому займанню» в алгоритм закладено жорсткі таймери підтвердження: якщо після відкриття запального газового клапана і подачі іскри в заданий інтервал не зафіксовано стабільний факел, команду відкриття знімають і починають продувку. Такі ж принципи діють при нарощуванні потужності на мазуті: якщо оптична сигнатура не відповідає очікуваній для заданої витрати, лінія відключається, щоб не допустити накопичення незгорілого палива.

Конструктивно монтажні схеми передбачають рознесення силових кабелів котушок і сигнальних ліній датчиків, екранування та якісне заземлення, щоб імпульсні завади від клапанів не проникали у високочутливі входи фотодетекторів. Живлення котушок організовується від окремої гілки

із захисними автоматами та діагностикою напруги; падіння нижче порога фіксується як потенційний ризик неповного ходу клапана і викликає попередження або блокування залежно від режиму. Для підвищення ремонтпридатності вузли клапанів комплектуються візуальними індикаторами положення, ручними дублерами з пломбуванням і тестовими портами тиску для швидкої перевірки сервісом у присутності блокувальних ключів безпеки.

Таким чином, керування електромагнітними клапанами газу і мазуту в системі з DURAG — це не просто подача напруги на котушку за командою «відкрити/закрити». Це цілісна функція безпеки, що включає перевірку герметичності, підтвердження положення, контроль тиску і якості палива, синхронізацію з продувкою і запалюванням Hegwein, миттєву відмовобезпечну реакцію на зникнення полум'я, постійний самоконтроль кола та ведення повної подієвої історії. Такий підхід переводить арматуру з категорії «пасивний виконавчий орган» у категорію «активний елемент контуру безпеки», завдяки чому пальниковий агрегат відповідає сучасним вимогам промислової безпеки, стабільно працює у газових і рідкопаливних режимах і забезпечує прогнозовану поведінку при будь-яких відхиленнях технологічного процесу.

2.4 Висновки до розділу 2.

Дослідження ролі запалювально-захисних пристроїв (ЗЗП) у системах промислового спалювання палива показує, що саме ця група обладнання є одним із ключових елементів забезпечення безпечної, стабільної та прогнозованої роботи теплотехнічних агрегатів. У структурі будь-якої енергетичної установки запалювально-захисні пристрої виступають базовою ланкою логіки безпеки, оскільки саме вони визначають можливість або заборону подачі палива, забезпечують контроль наявності й стійкості полум'я, виконують аналіз параметрів горіння та здійснюють автоматичне відключення у разі відхилень. У сучасній енергетиці, де котли працюють у

жорстких режимах, а паливно-повітряні пропорції змінюються залежно від навантаження, значення ЗЗП важко переоцінити.

Розгляд технологічних процесів системи розпалу продемонстрував, що розпалювання не є ізольованою дією, а входить до комплексного ланцюга технологічних операцій, що включає продувку топки, перевірку тяги, контроль стану водно-циркуляційної системи, стабілізацію повітряних потоків, підготовку паливної арматури та верифікацію готовності обладнання до подачі палива. Саме ЗЗП здійснюють об'єднання цих параметрів у єдину логічну систему, де кожна умова є критичною. Відсутність або некоректність хоча б одного параметра має призводити до неможливості запуску — і це забезпечується на апаратно-логічному рівні. Таким чином ЗЗП виступають «бар'єром безпеки», що відокремлює штатну роботу котла від потенційно аварійних сценаріїв.

Проаналізовані технологічні процеси розпалу показали, що кожний етап — від формування запального факела до переходу на основне горіння — вимагає стабільності та регулярного підтвердження наявності полум'я. У цьому контексті система автоматичного контролю забезпечує виявлення навіть короткочасних збоїв у роботі пальника, а відсутність сигналу полум'я, незалежно від причини, автоматично переводить котлоагрегат у безпечний стан. Це принципове положення сучасних ЗЗП, що унеможлиблює подавання палива у необпалений об'єм та виключає ризики вибуху, спалаху або термічного перевантаження обладнання. Кожен технологічний процес розпалу нерозривно пов'язаний із міжблокуваннями: блокування на тязі, рівні води, тиску повітря, тиску газу, температурі запальника та працездатності датчика полум'я.

Тематика ролі ЗЗП у енергетиці також підкреслює їхній вплив на екологічні показники та енергетичну ефективність. Стабільний розпал та коректний контроль полум'я зменшують кількість незгорілих продуктів, підтримують оптимальне співвідношення газ–повітря, мінімізують утворення сажі й оксидів азоту та дозволяють уникнути режимів нестійкого горіння, що

знижують ККД агрегата. У результаті якісно виконані ЗЗП не лише забезпечують безпеку, але й напряду впливають на економічні показники роботи котла.

Узагальнюючи розглянуті аспекти можна стверджувати, що ЗЗП є центральним компонентом системи керування горінням. Вони визначають алгоритм розпалювання, відслідковують розвиток полум'я, запобігають нештатним ситуаціям, координують технологічні процеси та гарантують відповідність всіх етапів пуску міжнародним стандартам безпеки. Саме тому модернізація розпалювально-захисних пристроїв у сучасних енергетичних установках не є додатковою функціональною опцією, а категоричною вимогою, без виконання якої стабільна робота котлоагрегата вважається неможливою. Застосування сучасних ЗЗП, побудованих на базі високочутливих фотодетекторів, надійних запальників та інтелектуальної автоматики, значно підвищує рівень технологічної безпеки, забезпечує прогнозований режим горіння, зменшує аварійність та збільшує ресурс роботи устаткування. Це робить їх невід'ємним елементом сучасної енергетичної інфраструктури.

РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Недоліки системи DURAG.

Попри високу технологічність, надійність та широке застосування у промислових теплотехнічних установках, датчики контролю полум'я систем DURAG мають низку експлуатаційних особливостей і обмежень, які потребують врахування при проектуванні комплексів автоматизації та систем контролю безпеки. У практиці експлуатації ТЕЦ та великих котелень відмічається, що фотодетектори DURAG, які застосовують УФ/ІЧ спектральний аналіз, з часом піддаються природному фізичному зносу сенсорних елементів, деградації оптичних поверхонь, зміні чутливості фотоелектронних каскадів та накопиченню забруднень. Незважаючи на наявність функцій самодіагностики та компенсації зміни чутливості, ці процеси можуть призводити до поступового зниження достовірності сигналу полум'я, збільшення часу реакції та можливого виникнення хибно-негативних або хибно-позитивних сигналів.

Ультрафіолетові фотокатооди, на яких базується принцип роботи частини моделей DURAG, з часом втрачають свої первинні параметри внаслідок тривалого термічного впливу, періодичного потрапляння пилу, сажі та конденсатів, а також через природні процеси деградації матеріалу активного шару. Інфрачервоні датчики також піддаються старінню, хоч і в меншій мірі; критичним чинником є нагароутворення на оптичному вікні та відкладення мікрочастинок продуктів згоряння на внутрішніх поверхнях. Навіть при наявності очищення та профілактичних заходів, в умовах реальних котлоагрегатів і пуско-зупинних режимів поступове зниження оптичної прозорості каналу є неминучим. Внаслідок цього система може пізніше розпізнавати появу факела, давати нестабільні сигнали під час мінімального навантаження або переходних режимів і потенційно втратити здатність зафіксувати наявність супутнього порушення горіння на ранній стадії.

Ще однією експлуатаційною проблемою є температура та вібраційні навантаження. Під час тривалої роботи в умовах підвищених температур та пульсаційного теплового впливу можливе зниження ресурсу електронних компонентів і порушення калібрування внутрішніх схем. У середовищах із високим вмістом пилу, мазутної сажі або нестабільної тяги датчики можуть вимагати частішого обслуговування, ніж передбачено регламентом. Підвищення частоти технічних обслуговувань, у свою чергу, збільшує експлуатаційні витрати і ставить питання про можливість відмови в критичний момент, особливо у періоди пікового навантаження обладнання. Особливості логіки безпеки DURAG передбачають, що при будь-якому сумніві у достовірності сигналу система зобов'язана зупинити подачу палива. Цей принцип fail-safe є безумовною перевагою з точки зору безпеки, але в реальних умовах він може призводити до ситуацій, коли навіть тимчасова деградація або короткочасна нестабільність сигналу спричиняють аварійне відключення пальника. З одного боку, це виключає ризик пізнього займання та вибухонебезпечних ситуацій, з іншого — створює ризик неможливості запуску обладнання у випадку відмови єдиного каналу контролю. Подібні ситуації, коли фотодатчик виходить з ладу або подає нестабільний сигнал, можуть мати значний вплив на надійність роботи теплоенергетичного обладнання, особливо у режимах, де відмови призводять до втрати резерву теплопостачання або електричної потужності [12].

У зв'язку з цим виникає важливе інженерне питання: навіть при використанні високотехнологічних фотодетекторів, таких як DURAG, доцільно мати альтернативний або резервний механізм контролю наявності полум'я, який би функціонував у критичних ситуаціях і дозволяв забезпечити безпечне доведення процесу до завершення або гарантоване завершення циклу розпалу. Зокрема, у дипломному проекті формується ідея розробки простої, дублюючої системи контролю наявності факела, яка б активувалася у випадку виходу з ладу основного фотосенсора і дозволяла виконати розпал у відмовостійкому режимі без втрати рівня безпеки. Така система має бути

максимально конструктивно простою, технологічно доступною, енергетично невибагливою і не вимагати складного калібрування або спектрального аналізу, забезпечуючи базове підтвердження горіння на період до відновлення роботи основного датчика DURAG.

Потреба у створенні такої системи обумовлена не недосконалістю DURAG, а вимогами реальної експлуатації енергетичних об'єктів, де будь-яка одинична відмова критичного сенсора не повинна ставити під загрозу безперервність технологічного циклу. Пропозиція щодо створення резервного каналу контролю полум'я, орієнтованого на простоту, автономність та забезпечення базового рівня надійності, є логічним кроком у напрямку підвищення загальної відмовостійкості системи запалювання та обґрунтовується сучасними вимогами до промислової безпеки та безперервності енергопостачання.

3.2 Аварійна система контролю наявності полум'я.

У ході модернізації системи розпалювання та контролю полум'я з використанням обладнання DURAG було встановлено, що навіть за умови високої надійності та наявності апаратних механізмів діагностики фотодетектори з часом можуть втрачати чутливість або виходити з ладу у найвідповідальніший момент. Це поставить під загрозу не лише стабільність роботи теплотехнічного обладнання, а й безперервність технологічного циклу, особливо у системах, де забезпечення теплопостачання або технологічного процесу є критично важливим. У зв'язку з цим у рамках даного проекту запропоновано впровадження додаткового, резервного каналу контролю полум'я, який би функціонував у аварійних умовах при відмові основного фотодетектора DURAG. Розроблена концепція резервного каналу заснована на застосуванні двох фоторезисторних датчиків, що розміщуються відповідно на лінії огляду запальника та основного пальника й підключаються до програмованого логічного контролера SIMATIC S7-1200, Рисунок 3.1. Вказаний контролер виступає як проміжний елемент логіки

безпеки, сумісний із сигнальними каналами системи DURAG, та забезпечує незалежний аналіз стану факела у випадку втрати основного каналу.



Рис 3.1 Контролер SIMATIC S7-1200

Принцип роботи резервної системи полягає у створенні дублюючого оптичного каналу, заснованого на простому, але ефективному методі фіксації світлового випромінювання від полум'я. Перший фоторезистор орієнтується безпосередньо на зону розміщення запального факела, що дозволяє підтвердити стадію займання отралювального пальника. Другий датчик контролює факел основного пальника, що забезпечує незалежне підтвердження наявності стабільного горіння після подачі основного палива. Обидва датчики розміщуються у термостійких корпусах із світлоспрямовуючими тубусами для мінімізації впливу зовнішнього освітлення, відблисків від розжарених поверхонь та паразитних оптичних перешкод. Сигнал з фото резисторів, Рисунок 3.2, подається не безпосередньо на входи контролера, а через підсилювально-компараторний модуль з пороговим формуванням двійкового сигналу та оптоелектронною розв'язкою, що забезпечує надійну роботу і нечутливість до імпульсних завад та низькорівневих змін освітленості [30].



Рис 3.2 Екрановані фоторезистори

Особливістю запропонованої системи є те, що вона не замінює і не дублює повністю функції DURAG, а працює лише у строго визначених умовах, коли основний фотодетектор виходить з ладу або видає сигнал несправності. В нормальному режимі резервна оптична система пасивна й використовується лише для діагностики, однак при втраті сигналу від DURAG контролер переходить у спеціальний аварійний режим, який вимагає підтвердження оператора та перевірки всіх супутніх умов безпеки. У цьому режимі запалювання пальника здійснюється стандартним алгоритмом із залученням запального пристрою, проте на етапі підтвердження полум'я автоматична система орієнтується на сигнали з двох фоторезисторів. Спочатку контролер очікує появу світлового сигналу від датчика запального факела у заданий проміжок часу. Після його підтвердження дозволяється короткочасна та дозована подача паливної суміші на основний пальник, і другий датчик фіксує появу основного полум'я. Тільки у випадку послідовної реєстрації обох фаз горіння контролер видає дозвіл на подальше функціонування пальника. Запропонована система суворо обмежує можливість неконтрольованого повторного запуску й не допускає більш ніж кількох спроб розпалу без участі обслуговуючого персоналу. У випадку невдалого підтвердження полум'я лінія подачі палива негайно закривається, а топка проходить повний цикл продувки, що повністю відповідає вимогам безпеки до таких операцій [38]. Таким чином резервний канал не знижує

загальний рівень безпеки системи, не підмінює основні функції спектрального датчика, а лише дозволяє забезпечити контрольований і безпечний запуск обладнання у випадку тимчасової несправності основного пристрою. Більше того, реалізація такої схеми дозволяє скоротити тривалі простої обладнання, підвищити загальну відмовостійкість системи розпалювання й забезпечити гарантоване завершення технологічного циклу навіть при виході фотодетектора DURAG з ладу. Схема підключення фоторезисторів і контролера SIMATIC S7-1200, до комплексу DURAG+HEGWAIN та зв'язки з іншими схемами і системами показано на Рисунках 3.3, 3.4.

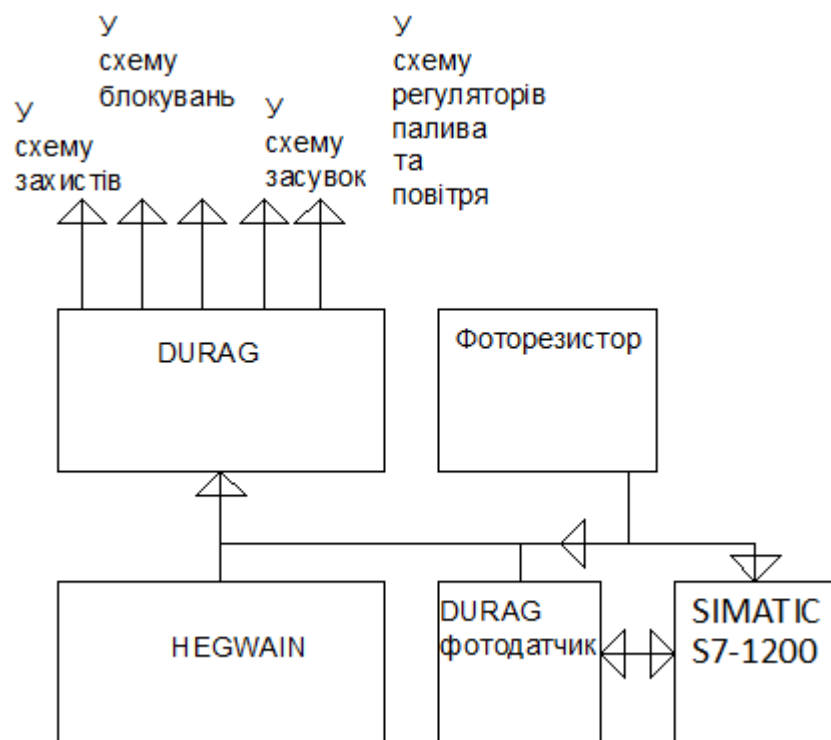


Рис 3.3 Схема підключення фоторезисторів і контролера SIMATIC S7-1200, до комплексу DURAG+HEGWAIN

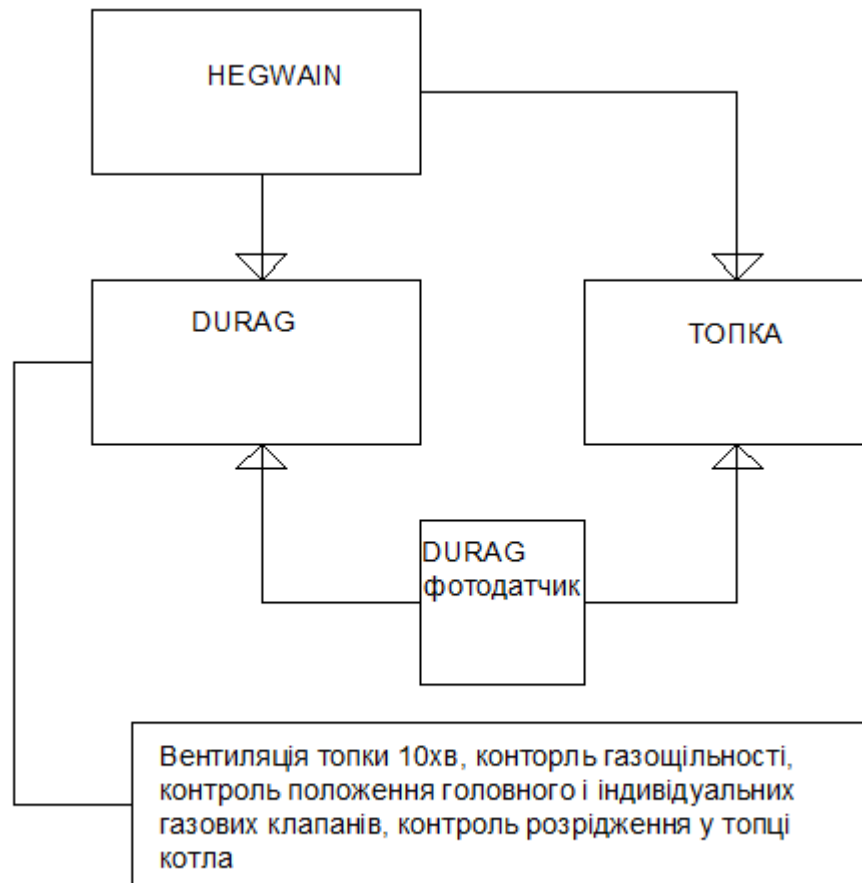


Рис 3.4 Зв'язок DURAG+HEGWEIN з іншими схемами та системами

Важливо підкреслити, що використання саме фоторезисторних датчиків у такій аварійній схемі обумовлене їх конструктивною простотою, дешевизною, надійністю та невибагливістю до обслуговування. На відміну від складних спектральних фотоприймачів, вони не потребують калібрування по довжинах хвиль, не містять високочутливих оптичних елементів і мають вищу стійкість до пилових середовищ та важких умов експлуатації. У той же час їх сигнал не використовується як постійний робочий канал, що дозволяє уникнути притаманних їм обмежень та підтримати загальний рівень безпеки системи.

Запропонована резервна схема є оптимальним поєднанням технологічної простоти та високої надійності. Вона дозволяє не лише забезпечити безпечний розпал у випадку відмови первинного фотодетектора,

але й надати оператору додаткову інформацію про характер розпалу, поведінку факела і ступінь стабільності процесу. У сукупності із системою DURAG та запальним пристроєм Hegwein вона формує трирівневу структуру контролю полум'я, у якій кожен рівень виконує власну функцію: базовий (спектральний аналіз), проміжний (PLC-логіка) та аварійний (оптична фоторезистивна дублююча система). Такий підхід повністю відповідає сучасним вимогам до промислової безпеки, підвищує технологічну стійкість системи та створює додатковий рівень страхівки без зниження стандартів SIL та вимог до надійності автоматики [44].

В умовах високотемпературного середовища топки, де теплові навантаження, інтенсивне випромінювання та конвективні потоки гарячих газів створюють екстремальні умови, особливу увагу необхідно приділити захисту резервних фоторезистивних датчиків, застосованих для аварійного контролю полум'я. Попри те, що ці датчики виконують допоміжну функцію та активуються лише у разі виходу з ладу основного спектрального сенсора, умови їх роботи залишаються надзвичайно складними. Без належного термічного захисту і стабілізації температури їх використання було б технічно неможливим через деградацію матеріалу світлочутливого елемента, спотворення характеристик та передчасний вихід з ладу.

Фоторезистор як елемент по своїй природі є чутливим до температурного впливу. При підвищенні температури електричний опір світлочутливої плівки знижується навіть за відсутності освітлення, що змінює порогові значення та може призвести до хибних спрацювань або втрати чутливості. Додатково, нагрівання понад допустимі межі викликає незворотні зміни структури матеріалу, прискорює старіння, спричиняє розтріскування покриття та погіршує оптичні властивості вікна датчика. У середовищі робочої топки температура легко перевищує 800–1200 °С, а теплове випромінювання здатне ушкодити елемент навіть при непрямому впливі, особливо у випадку, якщо датчик знаходиться в зоні прямої радіації від факела або розжарених футерованих поверхонь.

Для забезпечення стабільної роботи та захисту фоторезисторів запроваджується система примусового охолодження за допомогою подачі обдувного повітря. Принцип її роботи полягає у формуванні постійного ламінарного потоку холодного або слабонагрітого повітря, який проходить уздовж захисного корпусу датчика та зони оглядового каналу. Такий підхід виконує дві основні функції: відведення тепла від корпусу і чутливого елемента та створення повітряного бар'єру, який запобігає потраплянню у канал гарячих газів, сажі та продуктів згоряння. Цей бар'єр також запобігає відкладенням нагару на оглядовій поверхні та підтримує прозорість оптичного вікна датчика, що критично важливо для забезпечення стабільного сигналу.

Подавання охолоджуючого повітря здійснюється через окрему лінію з регульованим тиском, зазвичай від допоміжного дуттьового тракту або окремого пневмосистемного контуру. Об'єм подачі розраховується так, щоб забезпечити достатню кількість повітря для утворення стабільного захисного струменя, але при цьому не викликати турбулентного виносу полум'я або впливу на аеродинаміку головного пальника. Повітря подається через кільцевий канал, формуючи так звану "повітряну сорочку", унаслідок чого корпус датчика та чутливий елемент залишаються в межах робочого температурного діапазону. Для додаткового захисту канал огляду виконується у вигляді трубки з внутрішнім керамічним або металокерамічним облицюванням, що забезпечує теплостійкість і мінімізує нагрівання зовнішніх частин сенсора.

Також важливою функцією системи обдуву є запобігання перегріву перетворювача та електронних компонентів, розміщених поблизу датчика. Нагрівання кабельних та контактних вузлів може спричинити пошкодження ізоляції, зростання контактного опору, удари електричної дуги та деградацію з'єднань. Постійний потік охолоджуючого повітря забезпечує стабільність електричних характеристик, запобігає термічному пробою та гарантує

тривалий, гарантовано відпрацьований ресурс датчика у суворих умовах експлуатації.

Запровадження примусового охолодження резервних фоторезисторів також додає важливий експлуатаційний аспект — можливість безперервної роботи аварійної системи без необхідності її періодичного відключення або ручного обслуговування. Там, де відмова основної системи контролю полум'я може відбутися раптово, резервний канал повинен бути не лише доступним, а й повністю працездатним у будь-який момент. Наявність системи обдуву гарантує, що датчики перебувають у готовому стані та зберігають точність, стабільність та повторюваність сигналу протягом усього циклу роботи пального обладнання.

Отже, обдув фоторезисторів є не просто технічним доповненням, а невід'ємною частиною конструкції резервної системи контролю полум'я. Він забезпечує термічну стабільність, захист від деградації, підтримання чистоти оглядового каналу та підвищення загальної надійності системи. Без застосування активного охолодження резервні датчики не змогли б гарантувати коректну роботу у високотемпературному середовищі та не відповідали б вимогам до аварійного технічного резервування у критичних промислових установках.

Фізика горіння та детекції

3.3 Фізика горіння та детекції.

Фізичні процеси формування полум'я та його детекції відіграють ключову роль у забезпеченні безпечної та ефективної роботи паливних систем теплотехнічного обладнання. Горіння газоподібного чи рідкого палива у промислових пальниках є складним нерівноважним процесом, що включає ряд послідовних стадій: підготовку паливно-повітряної суміші, ініціювання реакції, розвиток фронту полум'я, стабілізацію горіння та підтримання стійких термодинамічних і хімічних умов. Від точності контролю кожного з цих етапів залежить не лише енергетична ефективність,

але і промислова безпека, оскільки будь-яке відхилення від стабільного режиму може призвести до погасання факела, відриву полум'я, неповного згоряння з утворенням чадного газу або небезпечного накопичення вибухонебезпечних сумішей [26].

Процес горіння газу, як правило, починається з дифузії молекул метану або іншого вуглеводневого компонента у кисень повітря та подальшого підвищення їх енергії до рівня, необхідного для розриву хімічних зв'язків. Джерелом ініціювання найчастіше виступає іскра або пілотний запальний факел. У зоні іскрового розряду утворюються радикали CH , OH та H , які запускають ланцюгові реакції. Далі формується первинне ядро полум'я, що поширюється з характерною швидкістю переднього фронту. Газові факели, залежно від співвідношення паливо/повітря, можуть утворювати дифузійне або попередньо змішане полум'я. У дифузійному режимі паливо та повітря змішуються безпосередньо у зоні горіння, тоді як у змішаному — суміш формується до запалювання. Реальні промислові пальники працюють у змішаному режимі з домінуванням дифузійних механізмів, що забезпечує рівномірність та стійкість факела.

Горіння мазуту має іншу природу, оскільки починається з етапів диспергування рідкого палива, випаровування крапель та утворення парогазової фази. Початкове тепло, що виділяється від запальника або гарячих поверхонь, сприяє випаровуванню легких фракцій, після чого газоподібні компоненти беруть участь у реакції з киснем. Тонке розпилення та контроль в'язкості мазуту є критичними факторами, оскільки крупні краплі випаровуються нерівномірно, затримують формування фронту полум'я та створюють умови для димлення і нестабільності факела. Саме тому запалювання мазуту майже завжди здійснюється через попередній газовий або електричний запалювач, який забезпечує стабільний тепловий потік у початковій фазі.

З погляду теплопередачі полум'я являє собою джерело конвективного, кондуктивного та радіаційного теплового потоку. Промислові фотосенсори

фіксують саме радіаційну складову — спектральне електромагнітне випромінювання, що формується під час перебігу реакцій. У межах видимого та інфрачервоного діапазону інтенсивно світяться продукти неповного згоряння, а також вуглецеві частинки, що піддаються високотемпературному окисненню. Ультрафіолетове випромінювання, навпаки, більш характерне для ранніх стадій хімічної реакції та наявності активних радикалів. Це пояснює, чому в сучасних детекторах застосовуються комбіновані методи аналізу: УФ-канал дозволяє швидко виявити появу факела, тоді як ІЧ-канал оцінює його стабільність і потужність.

Класичні фоторезистори, на яких ґрунтується аварійна резервна система, функціонують на принципі зміни електричного опору напівпровідникового шару під впливом фотонів. При освітленні кількість вільних носіїв заряду зростає, опір падає, і схема формує електричний сигнал, що відповідає наявності світлового випромінювання. На відміну від фотодіодів, фоторезистори мають більший час реакції, але забезпечують високу чутливість до широкого світлового спектра, що робить їх придатними для грубого резервного моніторингу полум'я. Разом з тим їхня чутливість до нагріву вимагає спеціального охолодження, оскільки температура безпосередньо впливає на опір і може призвести до неправильної інтерпретації сигналу.

Спектральні детектори сучасних систем, таких як DURAG, працюють з використанням УФ та ІЧ фотоприймачів, інколи у поєднанні з цифровою обробкою сигналу та алгоритмами розпізнавання спектральних підписів полум'я. Вони здатні відрізнити полум'я від сторонніх джерел світла, наприклад від розжарених частин футерівки або електричних нагрівачів, і мають вбудовану систему діагностики, що дозволяє виявити втрату чутливості або деградацію. Такі датчики визначають не лише наявність або відсутність полум'я, а й його інтенсивність, динаміку, та іноді навіть можуть інтерпретувати турбулентність газового потоку.

Ключовим аспектом детекції є вимога надзвичайно короткого часу реагування. У промислових пальниках зупинка подачі палива повинна відбутися протягом одиниць сотих або десятих секунди після зникнення факела, оскільки навіть короткочасне безполум'яне надходження газу призводить до вибухонебезпечного накопичення горючої суміші. Саме тому технологічно доцільно застосовувати два незалежні рівні контролю: основний спектральний сенсор високої точності та резервний канал, який, хоч і простіший, проте здатний закрити критичний часовий проміжок у випадку відмови первинної системи. Синергія двох різних фізичних принципів контролю забезпечує найвищу відмовостійкість і повністю відповідає концепції fail-safe [3].

Таким чином, фізика горіння та принципи детекції полум'я безпосередньо визначають архітектуру сучасних систем розпалювання та безпеки. Повне розуміння цих процесів дозволяє проектувати більш надійні, точні та адаптивні рішення, у тому числі системи резервного контролю, що здатні підтримувати роботу обладнання у відповідальних режимах. Поєднання спектрального контролю, резервних оптичних сенсорів і алгоритмів автоматичного вимкнення палива формує комплексний підхід, який забезпечує високий рівень промислової безпеки та стабільності енергетичних установок.

У процесах горіння, що відбуваються в пальникових пристроях промислових котлів та теплотехнічних агрегатів, турбулентність виступає одним з найважливіших факторів, які визначають якісні характеристики факела, його стабільність та безпечність протікання реакції. На відміну від ламінарного режиму, де газові потоки рухаються впорядковано та послідовно, турбулентний режим характеризується хаотичними флуктуаціями швидкості, вихровими структурами різних масштабів та значною інтенсивністю перемішування компонентів. Ці гідродинамічні властивості безпосередньо впливають на процес змішування пального та

окиснювача, темп хімічних реакцій, тепловіддачу, геометрію полум'я та його поведінку у топковому просторі.

Турбулентність у пальникових системах є корисним і необхідним явищем, оскільки саме завдяки хаотичним мікровихровим потокам досягається інтенсивне перемішування палива і повітря на мікромасштабах, що суттєво підвищує швидкість хімічної реакції й забезпечує рівномірність температурного поля. Для газових пальників це означає повне згоряння пального без утворення надлишкових продуктів неповного окиснення, а для рідкопаливних факелів — ефективне випаровування паливних крапель, запобігання утворенню сажі та локального переохолодження полум'я. При оптимальному рівні турбулентності фронт горіння поширюється рівномірно, температура у реакційній зоні тримається стабільною, а палаючий факел зберігає сталу форму та не схильний до відриву або коливань, що може спричинити загасання або, навпаки, неконтрольоване різке розростання.

Важливим чинником стабілізації полум'я є формування зони внутрішньої рециркуляції, де частина гарячих продуктів згоряння повертається у зону початкового змішування. Такий механізм дозволяє підтримувати температуру в області зародження факела, забезпечуючи повторне займання паливно-повітряної суміші, яка подається у пальник, і тим самим створюючи природний стабілізатор горіння. Саме ці рециркуляційні зони дозволяють сучасним пальникам працювати у широких діапазонах навантаження та витрат палива. Якщо циркуляційний потік недостатній або зруйнований, полум'я може відірватися від горловини пальника, переміститися всередину топки, загаснути або створити умови для пізнього займання, що є потенційно вибухонебезпечним явищем.

Разом з тим, надмірна турбулентність також негативно впливає на стабільність факела. Надто інтенсивні вихрові структури здатні руйнувати тонку дифузійну зону горіння, розривати фронт реакції та знижувати локальну температуру, що може призвести до зриву факела або до його фрагментації на окремі нестабільні зони. Різкі пульсації тиску й швидкості

створюють умови для динамічних коливань полум'я, що не лише погіршує якість згорання, а й спричиняє підвищене теплове та механічне навантаження на пальникове обладнання, футерівку та газоходи. При тривалій експлуатації це призводить до підвищеного зносу вузлів, появи тріщин та перегріву окремих елементів топки.

Для систем детекції полум'я, таких як спектральні датчики DURAG, турбулентність створює цілу низку критеріїв правильного розпізнавання. Горіння в турбулентному режимі супроводжується високочастотними флуктуаціями інтенсивності УФ- та ІЧ-випромінювання, що є природним «пульсом» факела. Саме ці мікропульсації служать для диференціації реального полум'я від сторонніх джерел світла, таких як розжарені поверхні або сонячне освітлення. Такі пульсаційні сигнатури, або «частотний портрет факела», дозволяють сучасним детекторам аналізувати не лише наявність світлового потоку, а й динаміку його зміни. Тому турбулентність у певних межах є корисним для детекції, оскільки створює характерну картину випромінювання, яку легко ідентифікувати.

У випадку резервних фотооптичних сенсорів, заснованих на фоторезисторах, турбулентність викликає коливання освітлення, які можуть проявлятися у вигляді шуму сигналу. Саме тому сигнал від таких датчиків подається через компаратор з гістерезисом, що відсікає незначні коливання та забезпечує чітку реакцію лише на стале світлове випромінювання факела. Такий підхід дає змогу уникнути помилкових спрацювань внаслідок короткочасних флуктуацій яскравості та створює більш надійну систему аварійного підтвердження полум'я [20].

Таким чином, турбулентність у пальникових системах не є випадковим або другорядним явищем, а виступає фундаментальним елементом фізики горіння та стабілізації полум'я. Вона забезпечує інтенсивне перемішування, стабільність фронту горіння, рівномірність теплового поля та можливість коректного спектрального контролю факела. Водночас як недостатня, так і надмірна турбулентність здатні порушувати процеси горіння, що вимагає

точного конструкторського розрахунку геометрії пальника, профілю повітряних каналів і програмного керування подачею газу та повітря. У системах, де безпека залежить від стійкого і контрольованого факела, правильне керування турбулентністю стає одним з ключових факторів довговічності обладнання та відсутності аварійних ситуацій.

Турбулентність у мазутних системах

У процесах спалювання мазуту турбулентність відіграє набагато складнішу і багатofакторну роль, ніж у газових пальниках, оскільки рідке паливо перед включенням у реакцію горіння повинне пройти послідовний шлях диспергування, нагрівання, випаровування і подальшого змішування з окиснювачем. У мазутних системах турбулентність не лише визначає якість перемішування палива та повітря, а й безпосередньо впливає на процес руйнування паливного струменя на краплі, рівномірність їх розподілу у топковому об'ємі та ефективність теплопередачі від гарячих продуктів згоряння до рідкої фракції. Саме тому формування правильної турбулентної структури у зоні виходу мазутної форсунки є критично важливим фактором стабільності факела та повноти згоряння.

Під час подачі мазуту через форсунку потік рідини вступає у взаємодію з паром або повітрям, що створює значні зсувні навантаження у приповерхневому шарі струменя палива. У результаті утворюються турбулентні вихрові структури різного масштабу, які механічно дроблять паливо на мікрокраплі. Далі у процесі руху частинок у топці до них підводиться тепловий потік, краплі випаровуються, а молекули палива вступають у дифузійне змішування з киснем. Важливо підкреслити, що у цьому випадку турбулентність виконує роль фізичного каталізатора, який підвищує ефективність фазового переходу «рідина — газ» і створює умови для рівномірного дозрівання крапель до горючої парової оболонки.

Якщо рівень турбулентності є недостатнім, великі краплі мазуту не встигають випаровуватися до моменту потрапляння у гарячі реакційні зони. Вони прогриваються нерівномірно, затримують підпал і створюють ядра

пізнього займання. У крайньому випадку великі краплі можуть осідати на елементах топки, приводячи до закоксовування, інтенсивного задимлення та ерозії поверхонь нагріву. Крім цього, недостатня турбулентність сприяє утворенню довгого, нестабільного факела з глибинним проникненням у топку, що створює локальні перегріву футерівки і підвищує ризик теплових ударів [34].

Протилежна крайність — надмірна турбулентність у зоні розпилення. У цьому випадку гідродинамічні коливання настільки інтенсивні, що струмінь палива руйнується надмірно швидко і нерівномірно. Утворюється широкий спектр крапель — від дуже дрібних, які швидко згорають і створюють локальні перегріву, до мікрокрапель, що не встигають випаровуватися і можуть виходити з активної зони горіння. Крім того, надмірна турбулентність здатна “зривати” факел, фрагментуючи полум’я та знижуючи його стабільність. У таких умовах пальник стає схильним до пульсацій, зниження температури у кореневій зоні полум’я та можливої нестабільності розпалу.

Окремо слід зазначити, що мазутні форсунки працюють у зоні високої температури та інтенсивного радіаційного теплового потоку, який підтримує випаровування крапель. Турбулентність тут виступає не лише механізмом перемішування, але й механізмом переносу тепла — гарячі продукти згорання рециркулюють у прифорсункову область, підтримуючи високу температуру, необхідну для безперервного випаровування і стабілізації факела. Це створює критичну зону, де баланс між турбулентним зсувом та рециркуляцією тепла визначає режим горіння. Порушення цього балансу легко призводить до “холодного факела”, що супроводжується жорстким димленням і збільшеним викидом незгорілих вуглеводнів.

Для систем детекції і контролю полум’я турбулентність при спалюванні мазуту створює додаткові труднощі. Інтенсивне розпилення та випаровування рідких часток часто супроводжується появою дрібнодисперсної сажі та змінною оптичною щільністю полум’я. Це

призводить до нерівномірних коливань інтенсивності світлового потоку, у тому числі у видимому та інфрачервоному спектрі. Спектральні датчики високого класу здатні інтерпретувати цей режим як характерний режим роботи мазутного пальника і коректно визначати наявність полум'я. Натомість прості резервні системи, що базуються на фоторезисторах, повинні бути захищені оптичними фільтрами та хистерезисом у електронній схемі, щоб уникнути хибного сигналу через короткі провали світлового потоку. Саме тому у проєкті забезпечено обдув фоторезисторів та оптичну ізоляцію для стабілізації сигналу та зниження впливу турбулентних флуктуацій розпилення.

Узагальнюючи, можна вказати, що у мазутних форсунках турбулентність є одночасно джерелом стабільності факела і потенційним фактором нестабільності. Її роль полягає у забезпеченні повноцінного дроблення та випаровування палива, формуванні температурного поля, підтриманні рециркуляційного теплового ядра та стабілізації процесу горіння. Водночас будь-які відхилення від оптимального діапазону турбулентної інтенсивності ведуть до нестабільного факела, задимлення, збоїв у роботі автоматики та ризику аварійних режимів. Правильне керування турбулентною структурою у мазутних пальниках є однією з основ безпечної експлуатації теплотехнічного обладнання і становить ключову передумову успішного використання сучасних систем детекції полум'я.

Необхідність заповнення котла водою

Перед початком будь-яких операцій з розпалу пальників у водогрійних та парових котлах необхідно забезпечити правильне заповнення котлоагрегату водою та встановлення стабільної циркуляції в контурі. Ця вимога має не лише технологічний характер, а й є ключовою умовою безпечної експлуатації теплотехнічного обладнання, оскільки без наявності водяного середовища теплообмінні поверхні котла зазнають швидкого локального перегріву, деформації, термічних напружень та руйнування. У найгіршому випадку відсутність води або порушення циркуляції може

призвести до випаровування тонкого водяного шару на внутрішніх стінках труб, виникнення сухого ходу, перегріву металу, його крихкого руйнування, вибуху трубних пакетів і небезпеки для персоналу.

Під час запуску котла вода виконує роль теплоакumuлюючого та теплообмінного середовища. Її маса та здатність поглинати тепло забезпечують плавне зростання температури елементів котлового об'єму та пароводяного тракту. У разі відсутності достатньої кількості води або порушення циркуляції теплова енергія, що надходить від пальників, концентрується в окремих ділянках теплообмінних труб, створюючи термічні градієнти та локальні перегріву. Це призводить до гідродинамічних ударів при подальшій подачі води, що небезпечно для контурів високого тиску та всієї системи в цілому. Особливо критично це явище для котлів із природною циркуляцією, де створення стійкої конвективної петлі між випарником і економайзером залежить від щільності насиченого та перегрітого середовища.

Наявність циркуляції є такою ж важливою, як і заповнення водою. Система циркуляції забезпечує рівномірний розподіл теплової енергії по контуру, перевід тепла від зони горіння до теплообмінних пакетів та стабільний режим прогріву котла. Циркуляція може бути природною, коли рух середовища зумовлений різницею густини нагрітої і холодної води, або примусовою — за допомогою циркуляційних насосів. У будь-якому випадку перед включенням пальників необхідно підтвердити працездатність насосів, відкриття арматури на циркуляційних лініях, наявність рівня в барабані (для парових котлів) та відсутність повітряних пробок у трубопроводах. Повітряні затори перешкоджають руху теплоносія, провокують локальне закипання та можуть спричинити удар тиску, що руйнує трубні пакети або роз'єднання фланцевих з'єднань.

Окрему увагу слід приділити термічному режиму під час запуску. Сталеві та чавунні елементи котла мають обмеження на швидкість нагріву, і вода виконує функцію термостабілізатора. Прогрів слід здійснювати

поступово, з контролем температурних градієнтів, щоб уникнути внутрішніх механічних напружень. Характерним є правило, відповідно до якого температура води на виході зі змішувального вузла та на вході до теплообмінних секцій не повинна різко відрізнятись, а швидкість підйому температури має бути контрольованою. Різке нагрівання металу на суху внаслідок відсутності циркуляції або недостатнього об'єму води призводить до прогину труб, відриву окалини, корозії поверхонь нагріву та розвитку тріщин [40].

Підтвердження рівня води виконується як по контрольних вікнах і датчиках рівня, так і по сигналах рівнемірив. У автоматизованих системах перед розпалом активуються міжблокування, які не дозволяють запустити пальник без сигналу про наявність мінімального рівня води та підтвердженої циркуляції. У схемі безпеки передбачено логічний захист, що одразу блокує пальники при втраті циркуляції або падінні рівня нижче допустимого значення. Це запобігає аварійним сценаріям, пов'язаним з перегрівом та руйнуванням металоконструкцій. Додатковим обов'язковим елементом є контроль температури зворотної лінії і різниці температур між прямим і зворотним колектором, що дозволяє оперативно визначити якість циркуляції. Не менш важливим є режим дегазації — видалення розчинених газів і повітря, що утворюються при нагріванні води. У початкових фазах пуску теплоносій вивільняє газові бульбашки, які накопичуються у верхніх точках і камерах котла. Їхнє видалення є критичним, адже газовий прошарок має низьку теплопровідність і створює теплові бар'єри, що локально перегрівають поверхню труб. Системи відведення повітря і дегазаційні клапани мають бути працездатними, а їх відкриття перевіряється до подачі палива.

Таким чином, заповнення котла водою та підтвердження циркуляції є фундаментальними умовами безпечного початку процедури розпалювання. Без наявності водяного середовища та стабільної циркуляції робота пальників стає неприйнятною з точки зору норм безпеки, екологічних вимог і

регламентів експлуатації теплотехнічного обладнання. Правильна організація початкових етапів пуску дозволяє уникнути критичних пошкоджень енергетичного обладнання, підвищує його ресурс, забезпечує стабільну теплопередачу та запобігає аварійним ситуаціям, які можуть мати катастрофічні наслідки. Саме тому система автоматики котла, зокрема контури логіки безпеки, повинні суворо контролювати ці параметри, не допускаючи жодних компромісів у частині їх дотримання.

3.4 Алгоритм розпалу і зупину котла.

Процес розпалу промислового котла є одним із найбільш відповідальних технологічних етапів, який визначає подальший теплотехнічний режим агрегата, його надійність, ресурсне навантаження на обладнання та рівень безпеки. Алгоритм пуску розроблений з урахуванням необхідності гарантованого видалення вибухонебезпечної суміші з топкового об'єму, поступового теплового навантаження на металоконструкції, перевірки працездатності всіх систем, а також забезпечення стабільного формування полум'я на запальнику та основних пальниках. Центральне місце у логіці розпалювання займають системи промислової автоматики та блокувань, які контролюють параметри навколишнього середовища, стан виконавчих механізмів, працездатність систем подачі палива та повітря, функціонування димо-газових трактів і відповідність технологічних показників допустимим умовам [48].

Алгоритм розпалу завжди починається з етапу підготовки котла до теплового навантаження. На цьому етапі перевіряється наявність води в котлі, працездатність системи рециркуляції теплоносія та циркуляційних насосів, відсутність повітряних пробок у контурі та нормальна робота рівнемірних пристроїв. Одночасно контролюється стан тягодуттєвого устаткування: димососи, вентилятори, засувки повітропроводів та газоходів мають бути в робочому положенні, а система шибєрів — відкрита відповідно до регламенту. Після підтвердження нормального рівня тяги, відсутності

підсмоктування стороннього повітря та стабільності розрідження у топці активується режим продувки. Продувка топкового простору слугує ключовим елементом безпеки: потужний потік повітря, що проходить через камеру згоряння, повністю видаляє залишки горючих газів, пари мазуту та дрібнодисперсні продукти неповного згорання, які могли накопичитися під час попередньої зупинки.

Після завершення продувки, яка триває встановлений час і контролюється як по таймеру, так і по фактичних параметрах тяги, система переходить у режим запуску запального пристрою. Якщо використовується електродний або газовий запалювач типу Hegwein, автоматика подає сигнали на відкриття запального газового клапана, активує високовольтний трансформатор запалювання або мікрофакельну систему і очікує формування стійкого полум'я на запальнику. У цей момент система детекції полум'я повинна зафіксувати наявність горіння у відведений інтервал часу. Для цього використовується спектральний датчик DURAG, який оцінює ультрафіолетові та інфрачервоні компоненти випромінювання і підтверджує появу стабільного факела. За відсутності полум'я протягом заданого циклу запальник відключається, подача палива припиняється, а топка знову проходить продувку — це гарантує, що паливно-повітряна суміш не накопичиться у вибухонебезпечних концентраціях.

Після успішного формування запального факела автоматика дозволяє відкриття клапана основного палива. У разі газового режиму відбувається контрольоване подавання природного газу або суміші газів до основних пальникових блоків, причому подача здійснюється поетапно, з плавним збільшенням обсягу, за принципом низького стартового навантаження. Це пояснюється необхідністю уникнення гідравлічних та теплових ударів, а також виключенням різкого росту температури, що може спричинити деформацію поверхонь нагріву. Для режиму роботи на мазуті, перед відкриттям основного клапана подачі мазуту, перевіряється досягнення необхідної температури підігріву палива та тиску у системі розпилу, після

чого активується форсунка і починається розпилення пари або повітря, необхідних для формування парогазової суміші [17].

На етапі переходу на основне горіння датчик полум'я продовжує відстежувати стабільність факела. Датчики DURAG оцінюють не тільки факт наявності полум'я, але й характер спектрального сигналу, що дозволяє відокремити реальний процес горіння від паразитних світлових імпульсів та розжарених поверхонь. Паралельно система стежить за розрідженням у топці, температурою газів на виході з котла, тиском палива, тиском повітря та станом заслінок. У випадку відхилення хоча б одного параметра від дозволеного діапазону подача палива припиняється, пальники вимикаються, і система повертається в стан продувки до з'ясування причин порушення.

Особливої уваги потребує логіка роботи у разі часткового розпалу, коли запальник горить, але основний пальник не сформував стабільний факел. У такому випадку автоматика негайно припиняє пускову процедуру та не допускає повторного відкриття основного клапана до завершення продувки та нового циклу запуску. Такий підхід запобігає ситуації, коли залишки палива накопичуються у топці та можуть спричинити відкладений спалах або вибух. Важливою також є функція затриманого контролю полум'я, коли датчик зобов'язаний підтвердити присутність горіння протягом визначеного часового інтервалу після відкриття основного клапана. Це забезпечує гарантію стійкого займання, а не випадкової оптичної імпульсації.

Після підтвердження стабільного основного горіння система переходить у режим поступового підвищення потужності. На цьому етапі реалізується кліматичний або технологічний закон регулювання, що визначає швидкість збільшення теплового навантаження відповідно до параметрів системи. Продовжується контроль температури, тиску, концентрації кисню у продуктах згоряння (якщо передбачено), параметрів циркуляції та цілісності системи подачі палива. У разі втрати сигналу полум'я, навіть короткочасної, система негайно закриває всі паливні клапани, що є невід'ємною вимогою експлуатації відповідно до принципу fail-safe.

Таким чином, алгоритм розпалу котла являє собою жорстко регламентовану послідовність операцій, що виключає можливість хаотичного впливу оператора або випадкової помилки системи. Увесь процес підпорядкований принципам технічної та вибухопожежної безпеки, спрямованим на повну локалізацію можливих ризиків та створення максимально передбачуваних умов запуску теплового агрегата. Реалізація алгоритмів розпалу на основі сучасних систем нагляду, таких як спектральні детектори DURAG та мікрофакельні запальники Hegwein, дозволяє досягти високої швидкості реакції автоматики, стабільного формування факела та значного підвищення загальної надійності теплогенеруючих установок.

Процес зупинки котла, так само як і процедура його розпалювання, є відповідальною фазою технологічного циклу, що вимагає суворого дотримання регламентів та повного контролю стану обладнання. Зупинка не зводиться до простого припинення подачі палива — вона передбачає поступове зниження теплового навантаження, стабілізацію теплогідравлічних режимів, видалення залишків продуктів згоряння з топкового простору та забезпечення контрольованого охолодження елементів котла. Це дозволяє уникнути термічних ударів, деформацій, руйнувань труб та зниження ресурсу металоконструкцій [32].

Після прийняття рішення про зупинку котла автоматизована система поступово зменшує подачу палива відповідно до алгоритму поетапного зниження теплової потужності. Регулятори подачі повітря і газу, або відповідні контури подачі мазуту, синхронно знижують витрату, зберігаючи стехіометричний баланс і забезпечуючи повне згоряння паливно-повітряної суміші до останнього етапу роботи. На цьому етапі особливо важливо запобігти переходу факела у нестабільний режим або появі зони неповного згоряння, оскільки це може спричинити утворення сажі, потоки неповністю окиснених газів та небезпеку повторного займання під час продувки.

Після стабільного завершення роботи основного пальника і відпрацювання команди на закриття основного паливного клапана запальник

продовжує функціонувати ще певний інтервал часу — це гарантує повне догорання залишків паливної суміші у топці. Лише після підтвердження повного згасання факела система видає команду на вимкнення запалювального пристрою. У цей момент датчик полум'я DURAG фіксує відсутність випромінювання та передає сигнал у систему керування. Після завершення фази горіння автоматика підтримує роботу тягодуттєвого обладнання, забезпечуючи післяпродувку топки. Продувка видаляє продукти згорання, залишкові гази та запобігає можливості утворення вибухонебезпечної суміші у разі подальшого пуску. Лише після завершення продувки допускається відключення вентилятора та димососа.

Особливий розділ алгоритму становить аварійне відключення котла. Аварійна зупинка відрізняється від штатної тим, що виконується миттєво, без фази поетапного зниження навантаження. Вона активується у випадках втрати полум'я, падіння рівня води нижче допустимого мінімуму, втрати циркуляції теплоносія, перевищення тиску або температури за межі безпечних значень, раптової втрати тяги, або за сигналом аварійного датчика газу чи пожежної системи. У таких ситуаціях система одразу закриває всі паливні клапани, блокує повторну подачу палива та переводить обладнання у стан примусової продувки. Продувка триває визначений регламентом час, забезпечуючи повне видалення незгорілих залишків та газового середовища. На відміну від штатної зупинки, запальний пристрій також вимикається негайно, оскільки його робота у відсутність основного факела може створити загрозу вибуху.

При аварійному гасінні вмикаються спеціальні блокування, які не дозволяють відновити подачу палива без повного аналізу причин аварії і ручного втручання оператора. Ця функція, відома як режим «жорсткої блокування», гарантує, що котел не може бути запущений автоматично після небезпечного сценарію, навіть якщо параметри повернулися у норму. Для відновлення роботи оператор зобов'язаний виконати діагностику, усунути причину аварії, підтвердити виконання вимог безпеки, відновити нормальний

стан насосного, газового та вентиляційного обладнання, і лише після цього заново ініціювати пуск котла. Система самодіагностики контролює стан датчиків, працездатність клапанів, рівнемірив, системи розпалювання, ланцюгів сигналізації та електроживлення.

Важливим аспектом повторного пуску після аварійної зупинки є обов'язкова повторна продувка топкового простору. Навіть короткочасна поява незгорілих газів або порушення процесу вентиляції вимагає повторної повноцінної продувки, що розсіює потенційно вибухонебезпечну суміш та створює гарантовано безпечні умови для розпалу. Тільки після завершення продувки допускається повторне подавання палива на запальник та виконання повного циклу розпалювання, включаючи контроль полум'я, підтвердження напрацювання запального факела та переведення на основне горіння.

Таким чином, алгоритми зупинки котла, аварійного відключення та повторного пуску формують комплексну багаторівневу систему безпеки, яка базується на принципах негайного усунення небезпеки, обов'язкової діагностики, поетапного перезапуску та глибокого резервування механізмів контролю. Дотримання цих алгоритмів є фундаментальною умовою безпечної експлуатації котельного обладнання, запобігає термічним аваріям, вибухам, пошкодженню конструкцій та створює передумови для стабільної і довговічної роботи теплогенеруючої установки.

Сучасні системи запалювання та контролю полум'я, такі як комплекс DURAG у поєднанні з мікрофакельними запальними пристроями Hegwein, відрізняються високим рівнем автономності та технологічної надійності, що досягається не лише за рахунок інженерно-конструктивних особливостей, але й завдяки розвиненим функціям самодіагностики. Система самоконтролю є невід'ємною частиною архітектури безпеки, оскільки забезпечує постійний аналіз справності фотодатчика, електронних модулів, кабельної інфраструктури, пальникових вузлів та елементів, що виконують функції формування і підтримання факела. Самодіагностика дозволяє виявляти

потенційні відмови до того, як вони перетворюються на критичні, а також запобігає робочим станам, у яких система не може гарантувати достовірне підтвердження полум'я або безпечний запуск [46].

Система детекції DURAG здійснює постійний контроль оптичного каналу. Для цього використовується декілька методів. Перший — перевірка інтенсивності зворотного сигналу у режимах відсутності факела та присутності полум'я. Коли полум'я відсутнє, фотоприймач повинен бачити лише мінімальний рівень фону, і відхилення від цього значення може свідчити про деградацію фоточутливого елемента, забруднення оптичного вікна, нагар або неправильне положення датчика. Під час горіння інтенсивність сигналу повинна відповідати встановленим діапазнам, що характерні саме для полум'я, а не для паразитного випромінювання гарячих поверхонь топки. DURAG використовує спектральну селекцію, аналізуючи ультрафіолетову та інфрачервону компоненти, а також частотну структуру сигналу, що створює характерну «пульсаційну картину» турбулентного факела. Виявлені відхилення спектрального профілю негайно формують діагностичний сигнал.

Другий рівень самодіагностики стосується електронних вузлів. Мікроконтролерна частина DURAG постійно контролює живлення датчика, працездатність внутрішніх ланцюгів, стан підсилювачів, аналогово-цифрових перетворювачів, температуру корпусу та стабільність внутрішніх опорних напруг. У разі коливань, що виходять за регламентований діапазон, система автоматично переходить у режим блокування, не допускаючи неконтрольованої інтерпретації сигналу. Це принципова вимога fail-safe логіки: у будь-якій сумнівній ситуації система вважає полум'я відсутнім, подача палива припиняється, а пальник переходить у режим зупинки та продувки.

Negwein, у свою чергу, має власні механізми контролю справності. Мікрофакельний запальник контролює наявність газу на вході, стан електромагнітного клапана, коректність роботи високовольтного

запалювального трансформатора, наявність іскри, а також тиск у системі подачі повітря або газу, що забезпечує мікрофакельний режим. У випадку зниження тиску нижче мінімально допустимого рівня система не дасть команду на формування полум'я, оскільки відсутність стабілізуючого повітряного потоку призведе до нестійкого горіння або «вибивання» факела назад у палинковий вузол. Додатково контролюється термічний стан корпусу запальника, адже перегрів може викликати деградацію електродів та зниження якості іскрового розряду.

Особливе значення має контроль кабельної інфраструктури між DURAG та контролером. Усі сигнали передаються по екранованих лініях, а система аналізує цілісність ланцюга. Обрив, коротке замикання або спотворення сигналу викликають аварійне відключення. Таким чином запобігається ситуація, при якій імітований або випадковий сигнал може бути прийнятий за реальне підтвердження полум'я. Це особливо важливо з точки зору захисту від прихованих дефектів і внутрішніх пошкоджень кабелів, що можуть виникати через вібрації, температуру або старіння ізоляції.

Крім того, системою передбачено режим тестування. Під час технічного обслуговування оператор або автоматичний цикл може активувати тестовий алгоритм, коли запальник формує контрольований імпульс, а детектор має підтвердити його появу. При цьому система реєструє час реакції, амплітуду сигналу та відповідність очікуваним параметрам. Якщо результати тесту виходять за межі допуску, система не допускає розпал і вимагає сервісного втручання. Це дозволяє виявляти деградацію фотодатчика на ранніх етапах, ще до фактичної відмови.

Таким чином, комплекс DURAG + Hegwein реалізує багатоконтурну систему самодіагностики: контроль оптики та спектра полум'я, тестування електронних ланцюгів, нагляд за роботою запальника, перевірку кабельних ліній, моніторинг температури та відповідності сигналів очікуваним характеристикам. Завдяки цьому система не лише визначає факт наявності

або відсутності полум'я, а й гарантує, що будь-яка аномалія в роботі елементів контролю автоматично призводить до безпечного стану. Такий підхід відповідає концепції технологічної безпеки світового рівня і є принциповою причиною впровадження DURAG та Hegwein на теплових електростанціях, а також на критичних промислових об'єктах, де надійність систем розпалювання та контролю є визначальним фактором безпечної експлуатації обладнання.

У сучасних системах контролю полум'я надзвичайно важливим є не лише точне визначення факту горіння, але й здатність комплексу переходити в режим деградації у випадку виходу з ладу основних елементів, не втрачаючи функціональної здатності контролювати критичні параметри. Режим деградації (англ. *degraded mode*) у контексті системи DURAG + Hegwein є спеціальним аварійно-безпечним логічним станом, при якому система зберігає здатність контролю наявності полум'я, але переходить з високоточних спектральних алгоритмів на резервний канал верифікації факела, забезпечуючи безперервність роботи пальникового вузла та виключаючи необхідність негайної зупинки обладнання.

Після виявлення некоректної роботи основного фотодетектора DURAG, а саме: втрати чутливості, невідповідного спектрального профілю, відсутності частотної пульсації характерної для полум'я, деградації фотоприймача, обриву або короткого замикання в сигнальних ланцюгах, а також при самодіагностиці, що виявила критичні відхилення, система приймає рішення про неможливість подальшої експлуатації первинного каналу у нормальному режимі. Однак, замість негайного припинення подачі палива та аварійної зупинки котла, ініціюється перехід на резервну підсистему — два фоторезисторні датчики, що розташовані таким чином, щоб один контролював полум'я запальника, а інший — факел основного пальника. Схема аналізу реалізується через промисловий контролер, наприклад **Siemens S7-1200**, який здатен взаємодіяти з загальною системою

автоматики газового господарства та пальникових пристроїв, не порушуючи міжблокувань та алгоритмів безпеки.

У режимі деградації контролер застосовує принцип подвійної верифікації: факт наявності полум'я вважається підтвердженням лише у випадку одночасної наявності світлового сигналу відповідної інтенсивності з обох каналів — як запального факела, так і основного пальника. Такий підхід унеможлиблює хибне підтвердження горіння у разі паразитного освітлення, струмопровідних відблисків, або оптичних шумів внаслідок турбулентності чи локального прогорання плівок сажі. Для усунення коливань сигналу від турбулентного факела використовується електронний гістерезис та цифрова фільтрація на рівні ПЛК, що дозволяє відокремити випадкові флуктуації яскравості від фактичного зникнення полум'я.

Перехід у режим деградації супроводжується автоматичним повідомленням персоналу через систему сигналізації з фіксацією події у журналі тривоги. Це дозволяє оперативно ініціювати сервісне обслуговування датчика DURAG без негайного зняття котла з навантаження. Водночас робота в такому режимі має обмеження у часі, оскільки резервний канал хоч і забезпечує контроль наявності полум'я, але поступається основному за точністю спектральної селекції, швидкістю реакції та здатністю ігнорувати паразитні оптичні перешкоди. Тому логіка системи передбачає автоматичний таймер, після завершення якого, у разі неусунення несправності основного датчика, котел переводиться в контрольовано-зупинний стан із включенням продувки та блокуванням повторного пуску без технічного втручання.

У критичній інфраструктурі теплозабезпечення, особливо в умовах низьких температур або роботи котла як єдиного джерела теплоти, такий перехідний механізм має величезне значення. Він дозволяє уникнути несанкціонованого припинення подачі тепла, аварійного відключення парогенератора і заморожування мереж чи пошкодження технологічного процесу. Комплекс DURAG + Hegwein при цьому продовжує виконувати ключову функцію захисту — при зникненні факела навіть на резервному

каналі відбувається негайне відключення палива, активація продувки топки та блокування повторного запуску.

Таким чином, режим деградації у системі модернізації пального комплексу забезпечує оптимальний компроміс між безпекою та безперервністю технологічного процесу. Використання подвійної фотооптичної системи на базі фоторезистивних елементів у комбінації з промисловим ПЛК дозволяє створити архітектуру з контрольованим рівнем ризику, де навіть у разі відмови високоточних спектральних сенсорів зберігається можливість безпечної експлуатації. Такий підхід відповідає принципам fail-safe, забезпечує відповідність сучасним нормам експлуатації теплотехнічних установок та створює додатковий рівень надійності, який є особливо важливим для енергетичних об'єктів, що працюють у режимі критичної інфраструктури.

3.5 Висновки до розділу 3.

Розгляд недоліків системи детекції полум'я на базі обладнання DURAG у контексті реальної експлуатації котлів показує, що навіть високотехнологічні спектральні датчики не є повністю позбавленими слабких місць. Основною проблемою, яка проявляється у практичній роботі теплотехнічного обладнання, є те, що фотодатчики, попри свою спектральну селективність, часом виходять з ладу у найбільш відповідальний момент — під час запуску котла або при переході з розпалювальної фази до основного горіння. Причинами цього можуть бути деградація оптичної поверхні від пилу й температури, зсув спектральної чутливості через старіння елемента, електронні відмови, вібраційні впливи, а також локальні забруднення оптики. Усі ці фактори у сумі створюють ризик втрати сигналу полум'я під час штатного горіння. Оскільки система безпеки працює за принципом fail-safe, така ситуація автоматично інтерпретується як зникнення факела, що призводить до аварійного відключення котла, продувки топки та зупинки виробничого процесу.

Аналіз фізики горіння показує, що полум'я є складною нерівномірною структурою, яка змінюється у часі під дією турбулентності, коливань тиску, зміни кількості повітря, та взаємодії з поверхнями топки. Характерні частотні коливання факела, його інтенсивність та спектральний склад постійно змінюються, і саме ці динамічні властивості іноді створюють ситуації, коли навіть якісний спектральний датчик може неправильно інтерпретувати зміну яскравості або напрямку полум'я як зникнення факела. Додатковим фактором є оптичний шум від розжарених частин котла, особливо при роботі на мазуті, коли утворюються короточасні згустки сажі, що здатні переривати або спотворювати оптичний канал. Таким чином, фізика процесів горіння сама по собі вимагає дублювання каналу детекції, оскільки коливання та нестабільність світлового потоку можуть спричинити помилкові сигнали навіть при справному датчику.

Саме це стало підставою для впровадження додаткового каналу контролю у вигляді фоторезистора, розташованого у захисному тепловідбивному екрані та оснащеного системою обдуву для відведення тепла. Фоторезистор є менш вибагливим до умов експлуатації, здатний працювати у широкому діапазоні температур та має прямолінійну характеристику реакції на освітленість. Він не забезпечує спектральної селективності, але добре реагує на сам факт наявності інтенсивного світлового потоку, що є достатнім критерієм для дублювання сигналу «полум'я є». Захисний екран та примусове охолодження дозволяють зберегти стабільність параметрів фоторезистора у топковому середовищі, де температура може змінюватися від сотень до тисяч градусів. Даний підхід істотно знижує ризик втрати контролю над факелом у разі тимчасового або повного виходу з ладу основного спектрального датчика.

Для логічної обробки резервного сигналу був використаний промисловий контролер **Siemens S7-1200**, що має достатню швидкодію, надійність, засоби фільтрації та можливість інтеграції у загальну схему автоматики котла. Контролер отримує дані з фоторезистора, аналізує їх в динаміці і формує дублювальний сигнал про наявність полум'я. У поєднанні з можливістю

налаштування гістерезису, часових фільтрів та порогів інтенсивності він забезпечує достовірний контроль навіть у разі короткочасних коливань світлового потоку. Використання Simatic S7-1200 також дозволяє вести журналування відмов, відстежувати тенденції деградації основного датчика DURAG та формувати повноцінний режим «деградованої роботи», в якому система переходить на резервний канал без необхідності аварійної зупинки котлоагрегата.

Узагальнюючи результати аналізу можна стверджувати, що впровадження резервної системи контролю полум'я на базі фоторезистора та контролера Simatic S7-1200 є обґрунтованим і технологічно необхідним кроком. Поєднання спектрального датчика та простого фотооптичного елемента забезпечує подвійну верифікацію факела, підвищує стійкість системи до оптичних та теплових перешкод, компенсує фізичні обмеження основного датчика та дозволяє уникнути аварійних зупинок у критичні моменти. У результаті підвищується загальна надійність системи горіння, зменшується кількість необґрунтованих спрацювань автоматики, а система розпалу набуває властивостей відмовостійкості, що відповідає вимогам сучасних енергетичних стандартів.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Техніка безпеки та охорона монтажі запальників HEGWEIN

Монтаж запалювальних пристроїв типу Hegwein у системах промислового спалювання палива є відповідальною технологічною операцією, що вимагає суворого дотримання норм охорони праці, правил електробезпеки, вимог вибухозахисту, а також чіткої організації робочого місця. Запальники Hegwein працюють у зоні підвищеної небезпеки — безпосередньо в області пальникових пристроїв, де присутні горючі гази, мазут, розжарені поверхні, високі температури та потужні повітряні потоки. Тому монтаж таких пристроїв потребує особливо уважного підходу. Основною метою заходів охорони праці є забезпечення безпеки персоналу, запобігання нештатним ситуаціям, уникнення витоків палива, неконтрольованих іскрових розрядів і забезпечення повної готовності обладнання до подальшої експлуатації [10].

Перед початком монтажних робіт необхідно забезпечити повне відключення всіх джерел енергії, які можуть вплинути на робочий процес. Це стосується електроживлення запальника, ліній газопостачання, повітряних колекторів та вузлів керування. Відключення повинно бути виконане відповідно до процедур lock-out/tag-out, які гарантують, що обладнання не буде випадково активоване під час роботи персоналу. Зняття напруги з трансформаторів запалювання, виконавчих механізмів і блоків управління є обов'язковим, оскільки запальники Hegwein працюють із високовольтними імпульсами, здатними створити небезпечний електричний розряд при контакті з відкритими струмопровідними елементами. Водночас газові та повітряні магістралі повинні бути відключені та розгерметизовані, щоб виключити можливість надходження газу в робочу зону.

Під час монтажу особливу увагу приділяють температурному стану обладнання. Запальник, як правило, встановлюється на корпус пальника або

у спеціальну посадкову гільзу, що є частиною топкового тракту. Перед демонтажем старого або встановленням нового пристрою необхідно переконатися, що температура металу є безпечною для роботи. Робота з гарячими поверхнями може спричинити опіки, а також викликати термічну деформацію елементів запальника під час фіксації. У разі, коли неможливо дочекатися охолодження обладнання до безпечної температури, допускається застосування теплоізоляційних рукавиць, захисних екранів і термостійкого інструменту.

Під час встановлення запальника важливим є забезпечення належної герметичності посадкових місць. Будь-яке мікропротікання газу у зоні установки може створити вибухонебезпечну атмосферу, тому необхідно контролювати стан ущільнень, перевіряти відсутність механічних пошкоджень гільзи, контролювати рівномірність затяжки кріпильних елементів. Механічні навантаження не повинні спричиняти перекосів корпусу запальника або деформації його ущільнюючих поверхонь, оскільки це впливає на правильність формування мікрофакела та безпеку під час запуску.

Важливою вимогою охорони праці є запобігання утворенню вибухонебезпечних зон під час монтажу. Топка та повітряні канали перед роботою повинні бути провентильовані, що гарантує відсутність накопичених парів мазуту або залишків газу. Проводити монтаж у необдубленій топці суворо заборонено, оскільки навіть мінімальні концентрації газоповітряної суміші можуть спалахнути від статичного заряду або інструмента. Персонал повинен контролювати рівень вибухонебезпечних газів за допомогою переносних газоаналізаторів, а у разі виявлення слідів вибухонебезпечної суміші всі роботи негайно припиняються.

Не менш важливим аспектом є електробезпека. Запальники Hegwein використовують високовольтні трансформатори, і під час монтажу необхідно уникати торкання контактних груп, оголених проводів і трансформаторів, навіть якщо вони знеструмлені. Персонал має працювати в діелектричних

рукавицях та використовувати інструмент з ізоляцією. Кабельні з'єднання повинні бути прокладені з урахуванням механічного захисту, термостійкості та відсутності ризику пошкодження вібраціями або рухом конструкцій. Особливу увагу приділяють правильному маркуванню кабелів, щоб уникнути помилкового підключення при пусконаладженні.

Монтаж Hegwein передбачає роботу на висоті, оскільки запальники часто розмішуються на фронті котла або у верхніх зонах топкового простору. Тому важливо забезпечити надійні підмостки, перевірені драбини та страхувальні системи. Падіння в умовах котельні може мати тяжкі наслідки, а вузькі проходи ускладнюють евакуацію. Персонал повинен мати засоби індивідуального захисту: шоломи, захисні окуляри, рукавиці, протиковзне взуття та засоби фіксації на висоті. Робота у зоні, де потенційно можливі гострі краї, гарячі елементи та рухомі механізми, вимагає постійної уваги та виключення сторонніх предметів, які можуть впасти у топку чи пальниковий канал [24].

Після встановлення запальника та перед підключенням системи управління проводиться комплекс перевірок: оцінюється якість механічної фіксації, перевіряється герметичність газових з'єднань мильною емульсією або спеціальним тестером, контролюється правильність прокладання кабелів, оглядаються ущільнення та відсутність тріщин у корпусі. Усі роботи виконуються з дотриманням вимог до вибухозахищеного обладнання, а персонал повинен забезпечити, щоб у зоні монтажу не залишилося займистих матеріалів. Пусконаладжувальні роботи виконуються тільки під керівництвом відповідальної особи, компетентної у системах газового обладнання.

Таким чином, заходи охорони праці при монтажі запальників Hegwein є комплексом вимог, що охоплюють електричну, газову, термічну, висотну та вибухову безпеку. Їхнє суворе дотримання забезпечує не лише безпеку персоналу, але й тривалий ресурс роботи обладнання, правильність формування мікрофакела, якісний розпал пальників і безпечний запуск

котлоагрегата. Монтаж Hegwein у відповідності до нормативних вимог створює необхідні передумови для надійної й довготривалої експлуатації системи розпалу в умовах промислової енергетики.

4.2 Техніка безпеки та охорона монтажі системи DURAG.

Монтаж фотодетекторів системи DURAG у промислових пальникових установках пов'язаний із особливими вимогами безпеки, оскільки ці прилади встановлюються безпосередньо в зоні високих температур, поблизу топкового простору, газових та мазутних каналів, а також у місцях, де присутні інтенсивні інфрачервоні та ультрафіолетові випромінювання. DURAG є чутливим оптико-електронним обладнанням, яке потребує дотримання спеціальних процедур монтажу, правильного підбору місця встановлення, дбайливого поводження з оптичними поверхнями, а також забезпечення електро- і вибухобезпеки. Тому охорона праці під час монтажу цього обладнання є інтегральною частиною системи безпечної експлуатації котлоагрегата.

Перед початком монтажних робіт необхідно провести повну ізоляцію джерел енергії, здатних вплинути на систему DURAG. Це включає відключення живлення фотодетектора, комутаційного блоку, кабельних трас, а також відведення або блокування будь-яких каналів, що можуть пропускати гаряче повітря або продукти згоряння у зону монтажу. Вимога lock-out/tag-out поширюється на всі електричні кола, оскільки фотодатчики DURAG живляться через спеціалізовані блоки, які можуть підтримувати напругу навіть після основного відключення. Кожний ланцюг повинен бути промаркований, а доступ сторонніх осіб до нього — обмежений [42].

Під час встановлення датчика особливе значення має температура навколишнього середовища та стан металоконструкцій. Оптичне вікно DURAG розташоване у безпосередній близькості до топки, де температура може досягати декількох сотень градусів. Тому перед монтажем корпус пальника і місце посадки оптичного патрубка повинні бути повністю

охолоджені до безпечного рівня. Робота з гарячими поверхнями може призвести до термічних опіків, деформації оптичних елементів, пошкодження ущільнень, а також втрати точного юстування приладу. Якщо охолодження неможливе, персонал зобов'язаний використовувати термостійкі рукавиці, спеціалізований інструмент та теплоізоляційні накладки, які запобігають перегріву фотодетектора під час монтажу.

Оптична частина фотодатчика потребує максимальної акуратності. Забруднення, подряпини або відбитки пальців на лінзі можуть суттєво знизити чутливість приладу, збільшити хибні спрацювання або призвести до повної втрати спектральної селективності. Тому під час обслуговування або заміни слід використовувати лише безворсові серветки, мікрофібру та ізопропіловий спирт, а також уникати потрапляння пилу, мазутних аерозолів або крапель конденсату. Важливою складовою монтажу є перевірка правильності юстування DURAG: оптична вісь датчика повинна бути направлена точно в область факела, і будь-який відхил може спричинити спотворення світлового сигналу. Регулювання здійснюється з урахуванням геометрії пальника, напрямку факела та характеристик топки.

Під час монтажу фотодатчиків забороняється використовувати ударний інструмент, оскільки корпус приладу містить прецизійні оптичні та електронні компоненти. Будь-яке механічне пошкодження може викликати внутрішній відрив лінзи, зсув фотоприймача або втрату герметичності корпусу. Порушення герметизації є особливо небезпечним, адже навіть мінімальне попадання топкових газів всередину оптичного блоку призводить до корозії, забруднення оптики та виходу приладу з ладу. Усі ущільнення та різьбові з'єднання повинні бути перевірені перед монтажем і замінені у разі виявлення тріщин або зносу. Роботи виконуються без відкритого полум'я та без використання інструментів, здатних утворювати іскру.

Електробезпека під час роботи з DURAG є одним із ключових аспектів охорони праці. Система містить електронні модулі та чутливі сигнальні ланцюги, які повинні бути підключені згідно з вимогами захисту від

перенапруги та електростатичних розрядів. Під час прокладання кабелів необхідно уникати близького сусідства з силовими лініями, щоб запобігти індукованим перешкодам. Екранування кабелів повинно бути виконано згідно з інструкцією виробника, з заземленням лише на одному кінці. Персонал, що проводить монтаж, має бути захищений діелектричними рукавицями, інструмент повинен мати ізольовані ручки, а зона роботи — бути сухою та добре освітленою. Особливо важливо не допускати роботи на датчику під напругою, навіть якщо йдеться про низьковольтні сигнальні кола.

Монтаж системи DURAG часто проводиться у важкодоступних місцях — на фронті котла, у шахтах пальників або на верхніх майданчиках. Тому на працівників поширюються вимоги охорони праці при роботі на висоті. Необхідно використовувати страхувальні пояси, захисні каски, протиковзні взуття та надійні майданчики з бортовими огороженнями. Будь-які предмети, які можуть випадково впасти у топку або на нижні рівні, повинні бути зафіксовані. Кабелі, інструменти та елементи кріплення слід переносити у закритих сумках або контейнерах.

У процесі завершення монтажу проводиться набір пускових перевірок: контроль правильності орієнтації приладу, тестування цілісності кабельних ліній, аналіз стану екранів, перевірка заземлення та пробна подача живлення. Далі проводиться тестовий цикл, у якому перевіряється реакція датчика на контрольне полум'я. Під час цього етапу персонал повинен знаходитися на безпечній відстані та мати засоби індивідуального захисту органів зору, оскільки при тестуванні можливі інтенсивні світлові імпульси. Всі отримані значення фіксуються у журналі технічного стану, що є обов'язковим елементом охорони праці.

Таким чином, охорона праці при монтажі та обслуговуванні системи DURAG — це комплекс заходів, що охоплює електробезпеку, вибухобезпеку, оптичну безпеку, термічну захищеність, захист від падіння предметів та організацію безпечного робочого місця. Дотримання цих вимог мінімізує

ризика виходу з ладу високоточного обладнання, забезпечує коректність його роботи та гарантує безпеку персоналу. DURAG як сучасний оптичний датчик полум'я є високоточним, чутливим та вимогливим до умов монтажу приладом, і лише за умови правильного поводження з ним можлива його довготривала, надійна і безпечна експлуатація у системі розпалу та контролю горіння промислових котлоагрегатів.

4.3 Техніка безпеки та охорона праці при роботах у вибухонебезпечних зонах.

Монтаж обладнання у пожежо- та вибухонебезпечних зонах є однією з найбільш відповідальних операцій у теплотехнічній та енергетичній галузі, оскільки такі зони характеризуються наявністю горючих газів, парів мазуту, пилу, розжарених поверхонь, високої температури та потенційно вибухонебезпечних сумішей повітря з вуглеводнями. У процесі встановлення систем контролю полум'я DURAG, запальників Hegwein, газової арматури, кабельних трас, систем блокувань або будь-якого допоміжного обладнання працівники стикаються з низкою факторів небезпеки, які можуть проявитися як у вигляді миттєвого спалаху, так і у вигляді відкладеного вибуху у разі поєднання трьох основних елементів вибухонебезпечної атмосфери: джерела займання, горючої речовини та кисню повітря. Тому охорона праці під час монтажу у таких умовах має комплексний характер і спрямована на повне виключення можливості появи цих факторів одночасно [8].

Перед початком робіт проводиться обов'язкова класифікація робочої зони згідно з категоріями вибухонебезпечності, визначаються межі можливого скупчення вибухових газів, перевіряється відповідність обладнання вимогам рівня захисту Ex і типу вибухонебезпечної суміші (газ, пара, пил). Усі запальники, датчики, кабелі, з'єднувальні коробки та арматура, що передбачено до монтажу, повинні мати відповідні маркування та сертифікати, що підтверджують їхню придатність для роботи у вибухонебезпечних зонах. Забороняється використання будь-яких приладів

та інструментів, які не мають вибухозахищеного виконання або здатні створювати іскру при випадковому ударі чи електричному контакті.

Першим етапом забезпечення безпеки є перевірка атмосфери на наявність горючих газів. Перед допуском працівників до робіт у зоні встановлюються газоаналізатори, що вимірюють концентрацію метану, пропану, бутану або парів мазуту. Роботи дозволяються лише після підтвердження, що концентрації горючих речовин не перевищують нижню межу вибуховості. У випадку, якщо показники газоаналізатора коливаються або повільно зростають, роботи негайно припиняються, а зона підлягає додатковому провітрюванню. Усі монтажні роботи у вибухонебезпечних зонах повинні виконуватися тільки за письмовим нарядом-допуском під керівництвом відповідальної особи.

Під час монтажу категорично забороняється використання будь-яких відкритих джерел вогню, включаючи газові паяльники, відкриті лампи розжарювання та інше обладнання, здатне створити локальне перегрівання або іскру. Водночас заборонені ударні інструменти зі сталевими поверхнями, що здатні при зіткненні створювати іскровий імпульс. Усі інструменти повинні бути у вибухозахищеному виконанні — з незаймистими накладками, мідними або бронзовими робочими поверхнями, а корпуси електричного інструменту — мати спеціалізоване маркування. Також заборонено використання несертифікованих переносних світильників або прожекторів, оскільки нагрів лампи або пошкодження кабелю можуть призвести до запалювання вибухонебезпечної суміші.

Особливу увагу приділяють монтажу кабельних ліній, які проходять через зони підвищеної температури або зони можливого накопичення газів. Кабелі повинні бути в оболонці, що відповідає класу вибухозахисту, а їхні з'єднання виконуються у герметичних вибухозахищених коробках, які виключають можливість іскроутворення всередині корпусу. Прокладання кабелів повинно виключати провисання, тертя об металеві поверхні, перегин або можливість отримання механічного пошкодження внаслідок вібрацій.

Кожен кабель має бути промаркований і підключений у суворій відповідності до схеми, оскільки неправильне з'єднання сигнальних і силових ліній може призвести до втрати вибухозахисту обладнання DURAG або Hegwein.

Під час монтажу обладнання у пожежонебезпечних зонах необхідно запобігти накопиченню статичної електрики. Поверхні обладнання, інструментів та робочого одягу повинні забезпечувати відведення статичного заряду, а робоча зона має бути обладнана заземленням, яке гарантує постійне відведення надлишкових потенціалів. Монтажники повинні використовувати антистатичний одяг, не допустити контакту з синтетичними речовинами, що здатні накопичувати заряд. Усі металеві частини, з якими контактує персонал, перевіряються на наявність надійного заземлення до початку робіт.

Важливою частиною охорони праці є запобігання витокам горючих речовин. Якщо монтаж пов'язаний із роботою на газових або мазутних магістралях, необхідно переконатися у повному відключенні та зниженні тиску у лініях. Витоки газу можуть утворити вибухонебезпечну атмосферу навіть при низьких концентраціях, тому всі фланцеві з'єднання, ущільнення та різьбові ділянки перевіряються спеціальними тестерами або мильною емульсією. У зоні монтажу повинні бути заборонені будь-які роботи, що пов'язані з механічною обробкою металів, зняттям окалини, використанням шліфувальних машин або інструментів, що можуть створити локальне іскроутворення.

Усі роботи у вибухонебезпечних місцях повинні виконуватися у присутності відповідальної особи, яка контролює дотримання техніки безпеки, стежить за показниками газоаналізаторів, контролює вентиляцію та наявність засобів пожежогасіння. На робочому місці повинні бути вогнегасники відповідного типу (порошкові або вуглекислотні), а персонал повинен бути навченим правильному їх застосуванню. Будь-яке порушення технологічного регламенту, поява характерного запаху газу або мазуту, сторонні звуки або зміни у поведінці приладів є підставою для негайного припинення робіт.

Таким чином, монтаж у пожежо- та вибухонебезпечних зонах є складним комплексом заходів, де охорона праці відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки персоналу та запобіганні аварій. Дотримання правил вибухозахисту, правильний підбір обладнання, контроль атмосфери, уникнення джерел займання, забезпечення електробезпеки та застосування спеціальних інструментів створюють необхідні умови для безпечного виконання робіт. Виконання таких вимог дозволяє надійно змонтувати обладнання DURAG та Hegwein, зберегти його ресурс і гарантувати безпечну та безаварійну роботу котлоагрегата в умовах підвищеної технологічної небезпеки.

4.4 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.

Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях є базовим елементом функціонування будь-якого технологічного комплексу, особливо якщо об'єкт пов'язаний з використанням газоподібних і рідких видів палива, високими температурами, роботою пальникових систем та експлуатацією трубопроводів під тиском. Будь-які порушення у таких системах здатні спричинити аварії значної небезпеки, тому питання технічної безпеки, організації робіт і підготовки персоналу мають комплексний і першочерговий характер [36].

Основним принципом охорони праці є створення умов, за яких кожна операція виконується під контролем технічних засобів та у відповідності до затверджених регламентів. У системах, де працюють газові та мазутні магістралі, важливим є забезпечення герметичності, правильного вибору арматури, відповідності обладнання класу вибухозахищеності та наявності автоматизованих блокувань, здатних негайно припинити подачу палива у разі виникнення найменших відхилень. Будь-яка модернізація пальникових пристроїв або заміна старих систем запалювання вимагає суворого дотримання правил електробезпеки, забезпечення захисту від статичного

заряду, а також перевірки коректності підключення датчиків полум'я, контролерів запалювання та елементів протиаварійного вимкнення.

Отримання точних та достовірних параметрів є ключовим у попередженні аварійних процесів. Тому модернізація систем вимірювання – заміна старих давачів тиску, температури, розрідження, рівня, витрати або концентрації продуктів згоряння – є не лише питанням підвищення ефективності, а й безпеки. Технологічні аварії часто виникають через помилки вимірювання, нестабільність сигналу, корозію чутливих елементів або затримку реакції системи. Нові датчики мають більшу надійність, кращий захист від зовнішніх впливів, електричну ізоляцію та можливість діагностики несправностей, що значно підвищує загальний рівень безпеки.

Особливої уваги потребує експлуатація обладнання, яке працює з водою, парою або хімічно активними середовищами. Системи знесолення, насосні станції, мережеві трубопроводи та запірні арматури мають бути захищені від надлишкового тиску, вібраційних навантажень та гідроударів. Правильна організація продувок, видалення повітря з трубопроводів, контроль роботи клапанів та зворотних засувок забезпечують безперебійність роботи та запобігають пошкодженню обладнання. Особливо небезпечними є ситуації, коли в системі утворюються пробки з холодної води або коли продувка виконується без урахування температурних перепадів. Усі ці процеси мають здійснюватися лише за затвердженими картами технологічних операцій [6].

При роботі у вибухонебезпечних зонах або приміщеннях з підвищеною пожежною небезпекою важливим є виключення джерел займання. Електрообладнання повинно відповідати своєму класу захищеності, мати якісне заземлення, захист від іскріння та бути регулярно перевіреном на правильність підключення. Системи запалювання пальників, такі як сучасні комплекси Durag або Hegwein, оснащуються багаторівневим контролем та автоматичним відключенням у разі відсутності полум'я, помилкового запуску або нестабільного горіння. Вони мінімізують ризики займання

газоповітряної суміші, проте ефективність цих систем напряму залежить від правильності монтажу та регулярного технічного обслуговування.

Суттєвим фактором забезпечення безпеки є підготовка персоналу. Працівники мають знати характеристики палива, правила виконання операцій запалювання, порядок пуску котельного або насосного обладнання, а також послідовність дій у надзвичайних ситуаціях. Під час тренувань відпрацьовуються сценарії вибухонебезпечних ситуацій, витоків газу або мазуту, аварійних зупинок насосів, раптової втрати тиску в магістралі чи відмови систем контролю. Чим краще підготовлений персонал, тим меншим є ризик помилкових дій, які здатні спровокувати розвиток аварії.

Для мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій необхідно мати чітко розроблені плани локалізації аварій, маршрути евакуації, засоби першочергового реагування та надійну систему оповіщення. На підприємствах повинні бути встановлені системи пожежогасіння, газоаналізатори, датчики загазованості, засоби аварійного відсікання подачі палива та резервні джерела живлення. Усі ці системи працюють комплексно, формуючи багаторівневий захист, який здатен забезпечити безперервність роботи, навіть якщо один із елементів виходить з ладу.

Отже, охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях у контексті роботи з пальниковими системами, паливними магістралями, насосними станціями та системами водопідготовки є комплексом організаційних, технічних та профілактичних заходів, спрямованих на стабільність технологічних процесів і захист персоналу. Вона базується на сучасних системах контролю, правильному технічному обслуговуванні, високій кваліфікації працівників та бездоганній організації виробничих операцій, що дозволяє підтримувати високий рівень промислової безпеки та мінімізувати наслідки можливих аварій.

4.5 Висновки до розділу 4.

Проведений аналіз вимог охорони праці під час монтажу запальників Hegwein, фотодатчиків DURAG та іншого обладнання системи розпалу у реальних умовах експлуатації котлоагрегатів дозволяє зробити висновок, що безпечне виконання цих робіт є критично важливим чинником, який визначає не лише збереження життя і здоров'я персоналу, але й надійну подальшу роботу всього теплотехнічного комплексу. Особливість даного обладнання полягає у тому, що монтаж виконується безпосередньо в зоні джерел займання, поблизу високотемпературних поверхонь, газових і мазутних магістралей, а також у місцях, які за класифікацією належать до пожежо- та вибухонебезпечних. Саме тому до робіт висуваються підвищені вимоги щодо електробезпеки, вибухозахисту, контролю атмосфери та механічної безпеки.

Забезпечення безпечних умов роботи при монтажі запальників Hegwein ґрунтується на необхідності повної ізоляції джерел енергії, гарантованій відсутності подачі газу, повітря або мазуту, а також контролі температури монтажної зони. У випадку з фотодатчиками DURAG додатковими факторами небезпеки є висока чутливість оптичних елементів, потреба в акуратному поводженні з лінзами, правильному юстуванні та уникненні оптичних забруднень, що може не лише призвести до травм, але й спровокувати помилки у роботі системи безпеки. Посадкові місця для обох типів обладнання розташовані у важкодоступних зонах, а отже, потребують дотримання вимог щодо роботи на висоті, використання страхувальних систем та організації безпечного робочого простору.

Особливо суворі вимоги висуваються до монтажу у пожежо- та вибухонебезпечних зонах. Тут ризики підвищуються в рази через наявність горючих газів, пилу та мазутних парів. Порушення навіть одного з правил — застосування інструмента, здатного іскрити, недостатня вентиляція або недотримання антистатичних норм — може спричинити раптовий спалах чи вибух. Тому контроль атмосфери газоаналізаторами, використання

вибухозахищеного інструменту, обов'язковий наряд-допуск, антистатичний одяг та постійний контроль відповідальної особи є невід'ємними елементами безпечної роботи.

Узагальнюючи всі вимоги, можна стверджувати, що охорона праці при монтажі системи розпалу є комплексною, багатогранною і такою, що охоплює всі аспекти взаємодії персоналу з технологічним обладнанням — від електричної та механічної безпеки до вибухозахисту, організації робочого місця, контролю атмосфери і правильного технічного виконання робіт. Дотримання цих вимог забезпечує мінімізацію ризиків, запобігає аваріям, гарантує надійну роботу системи DURAG + Hegwein у реальних умовах експлуатації та створює передумови для безпечного функціонування котлоагрегата протягом усього його ресурсу. У результаті охорона праці виступає не лише обов'язковою частиною монтажних процедур, а й фундаментальною складовою загальної культури безпеки на енергетичних об'єктах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Проведене дослідження, присвячене аналізу, порівнянню та модернізації системи розпалу та контролю горіння промислового котлоагрегата із застосуванням високонадійного обладнання DURAG і Hegwein, дозволяє стверджувати, що комплексна заміна застарілих елементів істотно підвищує рівень технічної безпеки, стабільності роботи та загальної енергетичної ефективності устаткування. Розгляд історично застосовуваних систем — електродних запальників, свічкових схем, фотодетекторів Факел-2 та Факел-3 — показав їхню фундаментальну невідповідність вимогам сучасної енергетики. Вони характеризуються низькою надійністю, обмеженим ресурсом роботи, високою ймовірністю хибних спрацювань і відсутністю механізмів самодіагностики. Ці недоліки є критичними для обладнання, що працює в умовах підвищених температур, інтенсивної турбулентності, газових навантажень і швидких технологічних переходів.

Встановлення сучасних систем контролю полум'я DURAG, що використовують спектральний аналіз УФ та ІЧ випромінювання факела, дозволяє реалізувати високоточну і достовірну діагностику процесів горіння. У поєднанні з мікрофакельними газовими запальниками Hegwein, які забезпечують гарантований і стабільний розпал навіть у складних робочих умовах, створюється цілісна технологічна структура, що відповідає принципам fail-safe та міжнародним стандартам SIL. Застосування алгоритмів самодіагностики, контролю внутрішніх ланцюгів, спектральної селекції та контролю кабельної інфраструктури дає можливість виявляти потенційні відмови заздалегідь, мінімізуючи ризик аварійної зупинки.

Важливою складовою роботи є розробка та впровадження резервного каналу контролю наявності полум'я на основі фоторезисторів, встановлених у захисному тепловідбивному екрані з примусовим обдувом, а також використання контролера Simatic S7-1200. Така система дублювання дозволяє забезпечити роботу котла навіть у випадку деградації або виходу з

ладу основного спектрального датчика DURAG. Отриманий ефект підвищеної відмовостійкості має принципове значення для об'єктів критичної інфраструктури, де аварійна зупинка може створити серйозні технологічні або соціальні наслідки. Режим деградації, реалізований на ПЛК, формує додатковий рівень безпеки та зменшує ймовірність хибних відключень.

У роботі також деталізовано фізичні основи горіння газу та мазуту, роль турбулентності, процеси випаровування та формування факела, що дозволяє пояснити вимоги до точності та швидкодії системи детекції. Обґрунтовано необхідність продувки топкового простору, контролю тяги, стабільної циркуляції води та дотримання термогідравлічних режимів перед розпалом. Розглянуто алгоритми штатного пуску та зупинки котла, порядок роботи міжблокувань та способи реагування на аварійні ситуації. Це підкреслює важливість застосування сучасної автоматики, здатної у режимі реального часу оцінювати комплекс параметрів і гарантувати безпечний технологічний перехід між режимами.

Окремий розділ присвячено питанням охорони праці при виконанні монтажних робіт. Проаналізовано вимоги при встановленні запальників Hegwein, фотодатчиків DURAG, а також при роботі у пожежо- і вибухонебезпечних зонах. Деталізовано заходи електробезпеки, правила організації робочого місця, вимоги до інструменту, засобів індивідуального захисту, контролю атмосфери та дотримання нарядів-допусків. Це акцентує увагу на тому, що якість монтажу і технічного обслуговування безпосередньо впливає на технологічну безпеку всієї системи розпалу і контролю горіння.

Загалом робота демонструє, що модернізація системи розпалювання на базі DURAG та Hegwein є технологічно виправданою, економічно доцільною і необхідною для забезпечення вимог сучасних стандартів енергетичної галузі. Впровадження запропонованих рішень дозволяє істотно підвищити надійність котлоагрегата, зменшити ризики аварійних зупинок, покращити показники енергоефективності та підвищити рівень загальної безпеки на

підприємстві. Комплексна модернізація створює передумови для довготривалої стабільної роботи обладнання, підвищення ресурсу механічних і електронних компонентів та забезпечує відповідність котлоагрегата сучасним вимогам експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація процесів горіння в котельних установках : навч. посіб. / В. М. Ковальчук. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 248 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31245> (дата звернення: 25.11.2025).
2. Системи розпалу та захисту котлоагрегатів : навч. матеріали. Харків : ХПІ, 2020. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/48912> (дата звернення: 25.11.2025).
3. Теплотехнічні установки та системи спалювання палива : підручник / Ю. В. Шульга. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2018. 392 с. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/42511> (дата звернення: 25.11.2025).
4. Автоматичні системи керування горінням : навч. посіб. / ХНУМГ ім.О.М.Бекетова. Харків, 2021. URL: https://eprints.kname.edu.ua/58421/1/Combustion_control.pdf (дата звернення: 25.11.2025).
5. Проектування систем розпалу парових котлів : методичні вказівки. Вінниця:ВНТУ, 2022. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/34102> (дата звернення: 25.11.2025).
6. NFPA 85 – Boiler and Combustion Systems Hazard Code : standard overview. NFPA, 2021. URL: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/detail?code=85> (дата звернення: 25.11.2025).
7. EN 676 – Automatic forced draught burners for gaseous fuels : standard overview. CEN, 2020. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/en-676-2020> (дата звернення: 25.11.2025).
8. EN 746-2 – Safety requirements for combustion systems : standard overview. CEN, 2019. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/en-746-2-2010> (дата звернення: 25.11.2025).
9. Burner Management Systems for Power Boilers : technical handbook. Emerson, 2022. URL: <https://www.emerson.com/enus/automation/solutions/burner-management> (дата звернення: 25.11.2025).

10. Boiler Flame Safeguard Systems : application guide. Honeywell, 2021. URL: <https://process.honeywell.com/us/en/products/flame-safeguard> (дата звернення: 25.11.2025).
11. DURAG – Flame Monitoring Systems : technical documentation. DURAG Group, 2023. URL: <https://www.durag.com/products/flame-monitors> (дата звернення: 25.11.2025).
12. DURAG D-LUX Flame Detector : product documentation. DURAG, 2022. URL: <https://www.durag.com/products/flame-monitors/d-lux> (дата звернення: 25.11.2025).
13. Hegwein Ignition and Pilot Burners : technical overview. HEGWEIN GmbH, 2023. URL: <https://www.hegwein.com/products/ignition-burners> (дата звернення: 25.11.2025).
14. High-Energy Ignition Systems for Industrial Boilers : technical guide. HEGWEIN, 2022. URL: <https://www.hegwein.com/solutions/industrial-boilers> (дата звернення: 25.11.2025).
15. Fireye Flame Safeguard Controls : technical handbook. Fireye, 2021. URL: <https://www.fireye.com/products/flame-safeguard-systems> (дата звернення: 25.11.2025).
16. ABB Burner Management Solutions : technical overview. ABB, 2022. URL: <https://new.abb.com/process-automation/safety/burner-management> (дата звернення: 25.11.2025).
17. Siemens Burner Management Systems : application guide. Siemens Energy, 2023. URL: <https://www.siemensenergy.com/global/en/offerings/automation/burner-management.html> (дата звернення: 25.11.2025).
18. Yokogawa ProSafe-RS for Burner Management : technical overview. Yokogawa, 2022. URL: <https://www.yokogawa.com/solutions/products-platforms/safety-system/prosafe-rs/> (дата звернення: 25.11.2025).
19. Flame Detection Technologies in Power Boilers : technical article. Power Engineering, 2021. URL: <https://www.power-eng.com/boilers/flame-detection-technologies/> (дата звернення: 25.11.2025).

20. Reliability of Flame Monitoring Systems : research article. Energies, 2020.URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/16/4172> (дата звернення: 25.11.2025).
21. Start-up and Shutdown Sequences of Power Boilers : technical article. EnergyReports,2022.URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722002655> (дата звернення: 25.11.2025).
22. Safety Instrumented Systems for Burner Management : handbook. TÜV Rheinland, 2020.URL: <https://www.tuv.com/world/en/burner-management-systems.html> (дата звернення: 25.11.2025).
23. Functional Safety of Combustion Systems : technical guide. IEC, 2019. URL: https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:85:0::::FSP_LANG_ID:25 (дата звернення: 25.11.2025).
24. Boiler Ignition Safety Philosophy : technical article. ISA, 2021.URL: <https://www.isa.org/products-and-publications/technical-papers/boiler-ignition-safety> (дата звернення: 25.11.2025).
25. Process Interlocks in Burner Management Systems : technical article. Chemical Engineering, 2020.URL: <https://www.chemengonline.com/burner-management-interlocks/> (дата звернення: 25.11.2025).
26. Industrial Combustion Safety Systems : handbook. Schneider Electric, 2021.URL:<https://www.se.com/ww/en/work/solutions/forbusiness/industrial-automation/combustion-safety/> (дата звернення: 25.11.2025).
27. Boiler Explosion Prevention Systems : technical overview. Power Technology, 2021.URL: <https://www.powertechnology.com/features/boiler-explosion-prevention/> (дата звернення: 25.11.2025).
28. Ignition System Design for Large Boilers : research article. Applied ThermalEngineering,2020.URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431120303459> (дата звернення: 25.11.2025).
29. Advanced Burner Management Systems in Thermal Power Plants : reviewarticle.EnergySystems,2022.URL:<https://link.springer.com/article/10.1007/s12667-022-00469-7> (дата звернення: 25.11.2025).

30. Flame Scanner Selection and Installation : technical guide. DURAG, 2021.URL: <https://www.durag.com/service/knowledge-base> (дата звернення: 25.11.2025).
31. Ignition Burners for Pulverized Coal Boilers : technical article. Babcock & Wilcox, 2020.URL: <https://www.babcock.com/home/resources/ignition-burners> (дата звернення: 25.11.2025).
32. Gas and Oil Burner Safety Systems : technical handbook. Weishaupt, 2021.URL: <https://www.weishaupt.com/products/burner-technology/> (дата звернення: 25.11.2025).
33. Combustion Control and Safety in Power Generation : open access chapter. Springer, 2019.URL:https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-12345-6_9 (дата звернення: 25.11.2025).
34. Boiler Start-up Automation and Protection : technical article. Siemens Energy,2022.URL:<https://www.siemensenergy.com/global/en/offerings/automation/boiler-automation.html> (дата звернення: 25.11.2025).
35. Modern Flame Detection Systems for Thermal Power Plants : review article. Energies, 2023.URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/4/1789> (дата звернення: 25.11.2025).
36. Системи автоматичного розпалу та захисту енергетичних котлів : навч. посіб. / І. О. Кравченко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 214 с.URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49874> (дата звернення: 25.11.2025).
37. Автоматизація пальникових пристроїв котлів : навч. матеріали. Харків : ХПІ, 2019.URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/46321> (дата звернення: 25.11.2025).
38. Технології спалювання газу та мазуту в котельних агрегатах : підручник. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2017.URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/39211> (дата звернення: 25.11.2025).

39. Проектування систем контролю полум'я : методичні вказівки. Вінниця:ВНТУ,2020.URL:<https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/31458> (дата звернення: 25.11.2025).
40. Автоматичні системи безпеки котельних установок : навч. посіб. Харків:ХНУМГ ім.О.М.Бекетова,2021.URL:https://eprints.kname.edu.ua/60127/1/Boiler_safety_systems.pdf (дата звернення: 25.11.2025).
41. Burner Management Systems – Engineering Practice : technical handbook. Emerson, 2020.URL: <https://www.emerson.com/en-us/automation/solutions/burner-management> (дата звернення: 25.11.2025).
42. Industrial Burner Safety Systems : application guide. Honeywell, 2020. URL: <https://process.honeywell.com/us/en/solutions/burner-management> (дата звернення: 25.11.2025).
43. Flame Monitoring in Large Boilers : technical paper. DURAG Group, 2021.URL: <https://www.durag.com/service/knowledge-base> (дата звернення: 25.11.2025).
44. Optical Flame Detection Technologies : technical article. Power Engineering, 2020.URL: <https://www.power-eng.com/boilers/flame-monitoring/> (дата звернення: 25.11.2025).
45. High-Energy Ignition Systems for Power Boilers : application guide. HEGWEIN GmbH, 2021.URL: <https://www.hegwein.com/solutions/power-generation> (дата звернення: 25.11.2025).
46. Pilot Burners and Igniters for Steam Boilers : technical handbook. HEGWEIN, 2022.URL: <https://www.hegwein.com/products> (дата звернення: 25.11.2025).
47. Fireye Burner Management and Flame Safeguard Systems : technical documentation. Fireye, 2021.URL: <https://www.fireye.com/products/flame-safeguard-systems> (дата звернення: 25.11.2025).
48. ABB Ability™ Burner Management Systems : technical overview. ABB,2022.URL: <https://new.abb.com/process-automation/safety/burner-management> (дата звернення: 25.11.2025).

49. Siemens Energy – Boiler and Burner Automation : application guide. SiemensEnergy,2023.URL:<https://www.siemensenergy.com/global/en/offerings/automation/boiler-automation.html> (дата звернення: 25.11.2025).

50. Yokogawa Safety Systems for Combustion Processes : technical overview.Yokogawa,2021.URL:<https://www.yokogawa.com/solutions/products-platforms/safety-system/> (дата звернення: 25.11.2025).