МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему «Дослідження енергоефективних технологій зменшення енергоспоживання промисловими агрегатами»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1444
спеціальності 144 Теплоенергетика
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Теплоенергетика
(назва освітньої програми)

спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
Н.В.Григоренко
(ініціали та прізвище)

Керівник доц.,к.т.н., Башлій С.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент ст. викл. Таратута В.О.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М.Потебні
Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень
Спеціальність 144 Теплоенергетика
(код та назва)
Освітня програма Теплоенергетика
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д.т.н., проф.В.Л. Коваленко
«_____»_____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЄКТ СТУДЕНТОВІ(СТУДЕНТЦІ)
Григоренко Наталі Вікторівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи (проєкту): «Дослідження енергоефективних технологій зменшення енергоспоживання промисловими агрегатами»
керівник роботи (проєкту) доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем, кандидат технічних наук, Башлій С.В
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «27» лютого 2025 року № 313-с

2.Строк подання студентом роботи 03 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи. Характеристика об'єкта дослідження
Досліджуваним об'єктом є промислове підприємство енергоємного типу (металургійний, машинобудівний або теплоенергетичний цех), що використовує теплові та електричні агрегати: печі, компресори, насосні установки, теплообмінники та електроприводи.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки
У роботі досліджуються особливості енергоспоживання промислових агрегатів, структура витрат теплової та електричної енергії й основні джерела втрат. Розглядаються сучасні енергоефективні технології: рекуперація тепла, частотно-регульовані електроприводи, покращення теплоізоляції та

автоматизація управління. На основі теплотехнічних і енергетичних розрахунків оцінюється потенціал енергозбереження та визначаються техніко-економічні показники запропонованих заходів.

5. Перелік графічного матеріалу

Графічна частина містить діаграми та схеми структури енергоспоживання промислових агрегатів. Подано структурну схему агрегату з енергоефективними елементами та схему впровадження енергоефективних технологій у виробничий процесс

6.Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1,2	доц.,к.т.н., Башлій С.В		
Розділ 3,4	доц.,к.т.н., Башлій С.В		
Розділ 5,6	доц.,к.т.н., Башлій С.В		

Дата видачі завдання 30.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 2	Аналіз ефективності використання теплообмінників та вторинної теплоти Визначення класифікації та впливу комплексних енергоефективних заходів на економію газу	14.10.2025	
3 4	Розробка методики оцінки економії газу та моделювання споживання Проведення розрахунків сумарної економії газу по комплексних заходах	14.11.2025	
5 6	Детальний аналіз режимів роботи промислових агрегатів та енергоспоживання Оцінка потенціалу енергозбереження промислових агрегатів та техніко-економічне обгрунтування	01.12.2025	

Студент (підпис) Н.В.Григоренко (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту). (підпис) С.В.Башлій (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер (підпис) С.В.Башлій (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Наталя Григоренко. Дослідження енергоефективних технологій зменшення енергоспоживання промисловими агрегатами. Кваліфікаційна випускна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні, 2026 рік.

Магістерська робота присвячена дослідженню шляхів зниження енергоспоживання промисловими агрегатами шляхом впровадження сучасних енергоефективних технологій.

У роботі розглянуто основні типи промислових агрегатів, їх енергетичні характеристики, сучасні методи зменшення втрат енергії, проведено аналіз традиційних та енергоощадних технологій, виконано теплотехнічні та енергетичні розрахунки, а також проаналізовано статистичні дані щодо економії паливно-енергетичних ресурсів і зменшення викидів CO_2.

Ключові слова: енергоефективність, промислові агрегати, теплові втрати, рекуперація, теплообмін, електроспоживання, модернізація.

ABSTRACT

Hryhorenko N. Research of energy-efficient technologies for reducing energy consumption by industrial units. The master's thesis is devoted to the study of methods for reducing energy consumption of industrial units through the introduction of modern energy-efficient technologies.

The paper analyzes industrial equipment, their energy characteristics, compares traditional and energy-saving technologies, calculates thermal and energy balances, and evaluates statistical data on fuel and electricity savings and reduction of greenhouse gas emissions.

Keywords: energy efficiency, industrial units, heat losses, heat recovery, electricity consumption, modernization.

ЗМІСТ

ВСТУП.....5
1 ОПИС ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ.....8
1.1 Загальна характеристика промислових агркгатів як об'єкта енергетичного аналізу.....8
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ РОБОТИ ПРОМИСЛОВИХ АГРЕГАТІВ.....36
2.1 Детальний аналіз режимів роботи та енергоспоживання промислових агрегатів теплоенергетичних систем.....36
2.2 Розширений розрахунок теплових та електричних втрат у теплоенергетичних агрегатах.....39
2.3 Деталізований розрахунок потенціалу енергозбереження промислових агрегатів.....42
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ.....46
3.1 Аналіз сучасних енергоефективних технологій для промислових котелень 46
3.2 Вибір та обґрунтування енергоефективних заходів для котельні потужністю 10 МВт 49
3.3 Обґрунтування впровадження частотно-регульованих приводів насосних агрегатів (продовження).....51
3.5 Комплексна оцінка потенціалу енергозбереження промислової котельні 54
3.5.1 Структура сумарного потенціалу енергозбереження.....55
3.5.2 Розрахунок сумарної річної економії енергоресурсів.....56
3.5.3 Вплив комплексних заходів на режим роботи котельні 56
3.5.4 Екологічний ефект від реалізації комплексу заходів.....57
3.5.5 Висновки до розділу 3 57
4 РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОМПЛЕКСУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ЗАХОДІВ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ КОТЕЛЬНІ.....58
4.1 Загальні положення щодо впровадження енергоефективних рішень 58

4.2 Технічні заходи з підвищення енергоефективності котельної установки 58
4.3 Організаційно-експлуатаційні заходи 60
4.4 Автоматизація та цифровізація систем керування котельнею 61
4.5 Очікуваний економічний та енергетичний ефект 61
4.6 Удосконалення системи теплопостачання та зменшення теплових втрат у допоміжному обладнанні 62
4.7 Впровадження частотно-регульованих приводів у системах циркуляції теплоносія 64
4.8 Використання акумулюючих ємностей теплоти 64
4.9 Зменшення втрат тепла в системі димовидалення 66
4.10 Узагальнення результатів 4 розділу 66
5 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ 68
5.1 Вихідні дані для розрахунків 68
5.2 Розрахунок річного теплового навантаження котельні 69
5.3 Розрахунок річного споживання природного газу 69
5.4 Розрахунок електроспоживання насосного обладнання 70
5.5 Моделювання впровадження частотно-регульованих приводів 71
5.6 Розрахунок ефекту від утилізації теплоти димових газів 71
5.7 Зведена оцінка енергетичного ефекту 72
5.8 Висновки до розділу 5 73
6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ЗАХОДІВ 74
6.1 Мета та завдання 74
6.3 Розрахунок економії енергоресурсів 77
6.3.1 Природний газ 77
6.3.2 Електроенергія 77
6.3.3 Теплові втрати 77

6.4 Термін окупності 78
6.5 Порівняльний аналіз заходів 78
6.6 Екологічний ефект впровадження енергоефективних заходів 79
6.6.1 Зменшення викидів CO_2 79
6.6.2 Зменшення викидів NO_x та SO_x 81
6.6.3 Зменшення викидів пилу та дрібнодисперсних часток 81
6.6.4 Вплив на локальний мікроклімат 82
6.6.5 Додатковий економічний ефект від екологічної модернізації 83
6.7 Рекомендації по впровадженню екологічних заходів 84
ВИСНОВКИ..... 89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ..... 92
ДОДАТКИ..... 94

ВСТУП

Актуальність роботи. В умовах постійного зростання вартості енергоресурсів та посилення вимог до екологічної безпеки проблема енергоефективності промислового виробництва набуває особливої актуальності. Промислові підприємства є одними з найбільших споживачів паливно-енергетичних ресурсів, а частка витрат на енергію у собівартості промислової продукції постійно зростає. Це зумовлює необхідність пошуку та впровадження ефективних технологічних рішень, спрямованих на зниження енергоспоживання без втрати продуктивності обладнання.

Особливо гостро ця проблема проявляється в енергоємних галузях, таких як металургія, хімічна промисловість, теплоенергетика, машинобудування та виробництво будівельних матеріалів. Промислові агрегати – печі, компресори, насоси, теплообмінники, електроприводи – споживають значну частину виробленої електричної та теплової енергії. Низький рівень енергоефективності багатьох із них призводить до перевитрат палива, зростання експлуатаційних витрат та збільшення шкідливих викидів в атмосферу.

В умовах переходу України до європейських стандартів енергоспоживання та скорочення викидів парникових газів підвищення енергоефективності промислових агрегатів стає не лише економічною, але й стратегічною необхідністю. Тому дослідження сучасних енергоефективних технологій і методів зменшення енергоспоживання промисловими агрегатами є важливим науково-практичним завданням.

Мета роботи – дослідження та обґрунтування енергоефективних технологій зменшення енергоспоживання промисловими агрегатами.

Задачі дослідження. Для досягнення зазначеної мети дослідження в магістерській роботі необхідно:

– проаналізувати основні типи промислових агрегатів та їх енергетичні характеристики;
– дослідити структуру енергоспоживання промислових установок;
– розглянути сучасні енергоефективні технології та методи зниження теплових і електричних втрат;
– виконати розрахунки енергетичних втрат та потенціалу енергозбереження;
– проаналізувати статистичні дані щодо ефективності впровадження енергозберігаючих технологій.

Об'єкт дослідження – промислові агрегати енергоємних виробництв.

Предмет дослідження – процеси енергоспоживання та енергоефективність промислових агрегатів.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота включає вступ, шість розділів, висновки та перелік джерел посилань.

1 ОПИС ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Загальна характеристика промислових агркгатів як об'єкта енергетичного аналізу

Промислові агрегати є основними елементами технологічних ліній, у межах яких здійснюється перетворення сировини у готову продукцію. Більшість цих процесів пов'язана з інтенсивним використанням теплової та електричної енергії, що зумовлює високий рівень енергоспоживання промислового сектору. У структурі загального енергоспоживання України частка промисловості традиційно становить понад 40 %, при цьому значна частина цієї енергії витрачається саме промисловими агрегатами.

До промислових агрегатів відносять установки та машини, призначені для здійснення теплових, механічних та фізико-хімічних процесів. У теплоенергетичному аспекті найбільше значення мають агрегати, що використовують природний газ або інші види палива для отримання теплової енергії. Це насамперед промислові печі, сушильні камери, котли, випарні установки, ректифікаційні колони та теплообмінні апарати.

Особливістю промислових агрегатів є їх тривала робота в безперервному або напівбезперервному режимі. У більшості випадків обладнання працює 20–24 години на добу, що призводить до величезних річних витрат паливно-енергетичних ресурсів. Тому навіть незначне підвищення коефіцієнта корисної дії або зменшення теплових втрат може дати значний економічний ефект.

Об'єктом дослідження в даній роботі є сукупність промислових теплових агрегатів підприємства енергоємного типу, яке використовує природний газ та теплову енергію для забезпечення технологічних процесів. Це можуть бути підприємства металургії, машинобудування, хімічної промисловості або

виробництва будівельних матеріалів, характерні для промислових регіонів України, зокрема Запорізького регіону.

1.2 Енергетична структура промислових агрегатів

Промислові агрегати споживають енергію у двох основних формах – тепловій та електричній. Теплова енергія використовується для нагріву матеріалів, підтримання технологічних температур, випаровування, сушіння та хімічних реакцій. Електрична енергія необхідна для роботи приводів, вентиляторів, насосів, компресорів, систем автоматики та допоміжного обладнання.

У більшості промислових підприємств теплова складова енергоспоживання перевищує електричну. Це пояснюється тим, що значна кількість технологічних процесів базується на високотемпературному нагріві або тепловій обробці матеріалів. У таких умовах основним енергоносієм виступає природний газ. На рисунку 1.1 наведено узагальнену схему енергетичних потоків промислового агрегату.

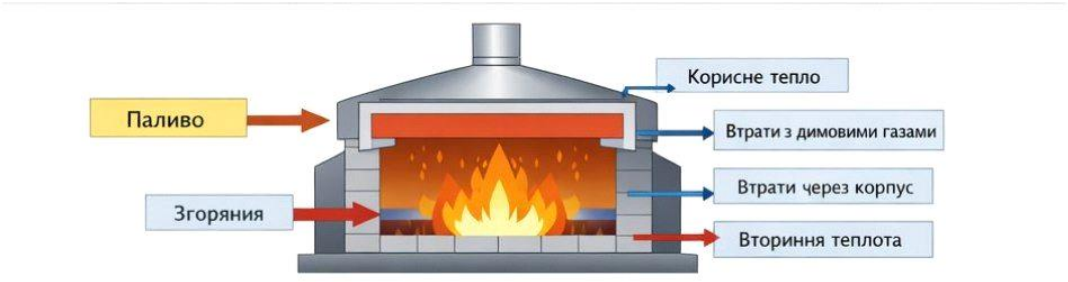


Рисунок 1.1 - Узагальнена схема енергетичних потоків промислового агрегату

Енергетичний аналіз показує, що лише частина теплоти, отриманої при спалюванні палива, використовується корисно. Решта енергії втрачається у вигляді відхідних газів, теплового випромінювання та нагріву навколишнього середовища.

1.3 Теплові баланси та втрати в промислових агрегатах

Тепловий баланс промислового агрегату дозволяє кількісно оцінити ефективність використання теплоти палива. Він включає корисну теплоту, яка витрачається на нагрів продукції або теплоносія, та різні види втрат.

Основними складовими теплових втрат є втрати з димовими газами, втрати через огороджувальні конструкції, втрати з охолоджувальними середовищами та втрати через неповне згоряння палива.

У таблиці 1.1 наведено типовий тепловий баланс промислової печі.

Таблиця 1.1 – Типовий тепловий баланс промислової печі

Стаття балансу	**Частка, %**
Корисне тепло	45
Втрати з димовими газами	30
Втрати через корпус	15
Інші втрати	10

Як видно, більше половини теплоти палива втрачається, що свідчить про значний потенціал енергозбереження.

1.4 Вторинні енергетичні ресурси промислових агрегатів

Одним з основних напрямів підвищення енергоефективності є використання вторинних енергетичних ресурсів, тобто теплоти, яка виводиться з агрегатів у вигляді гарячих газів, пари або рідин.

Відхідні гази промислових печей можуть мати температуру 300–600 °С, що робить їх цінним джерелом теплоти для підігріву повітря горіння, води або сировини. Утилізація цієї теплоти за допомогою рекуператорів або регенераторів дозволяє знизити витрати природного газу на 10–30 %. На рисунку 1.2 наведено схему утилізації теплоти димових газів.

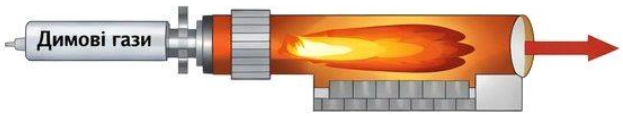


Рисунок 1.2 - Схема утилізації теплоти димових газів

1.5 Автоматизація як інструмент зменшення теплових втрат

Автоматизація промислових агрегатів забезпечує стабільність теплових режимів, що безпосередньо впливає на величину витрат палива. Системи автоматичного регулювання температури, тиску та витрат теплоносія дозволяють підтримувати оптимальні умови горіння та теплообміну.

Застосування автоматичних регуляторів складу газо-повітряної суміші дозволяє зменшити надлишок повітря та знизити температуру димових газів, що безпосередньо зменшує втрати теплоти.

У таблиці 1.2 показано ефект від автоматизації печі.

Таблиця 1.2 – Вплив автоматизації на витрати газу

Показник	**До впровадження**	**Після**
Витрата газу, м³/год	1200	1050
ККД, %	65	72
Температура димових газів, °C	420	320

На рисунку 1.3 наведено структурну схему автоматизації промислової печі, яка включає датчики температури та тиску, регулятори подачі газу й повітря, а також виконавчі механізми, що забезпечують підтримання оптимальних теплових режимів.

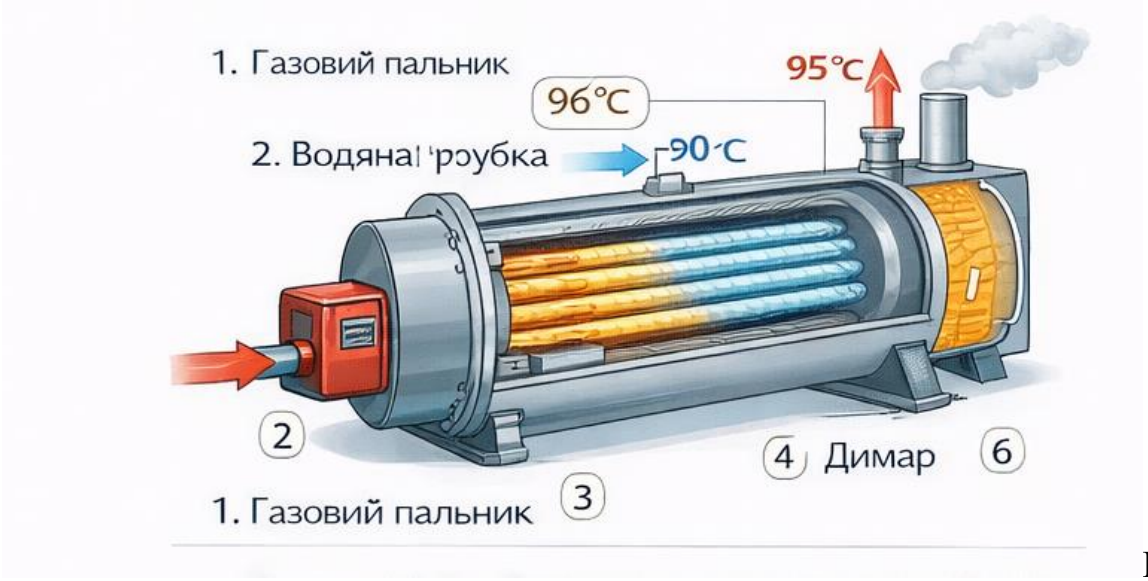


Рисунок 1.3 – Схема автоматизації промислової печі

1.6 Промислові печі та теплові агрегати як основні споживачі природного газу

Промислові печі та теплові агрегати займають провідне місце серед усіх споживачів паливно-енергетичних ресурсів у промисловості. У більшості енергоємних галузей — металургії, машинобудуванні, виробництві скла, цементу, кераміки, хімічній промисловості — до 60–80 % усіх витрат природного газу припадає саме на теплові агрегати. Це зумовлено необхідністю підтримання високих температур технологічних процесів, які часто перевищують 800–1200 °C.

Основним призначенням промислових печей є передавання теплоти від продуктів згоряння газу до оброблюваного матеріалу. У процесі роботи печі відбувається складний тепломасообмін між полум’ям, газовим середовищем, стінками агрегату та завантаженим матеріалом, що схематично зображено на рисунку 1.4. Енергоефективність цього процесу визначається не тільки якістю горіння палива, але й конструктивними особливостями печі, режимами роботи, теплоізоляцією та системою відведення відхідних газів.

У сучасній промисловості застосовуються різні типи печей: камерні, тунельні, шахтні, конвеєрні, обертові та індукційні. Незважаючи на конструктивні відмінності, всі вони мають спільну енергетичну особливість — значні теплові втрати, які виникають у процесі експлуатації.

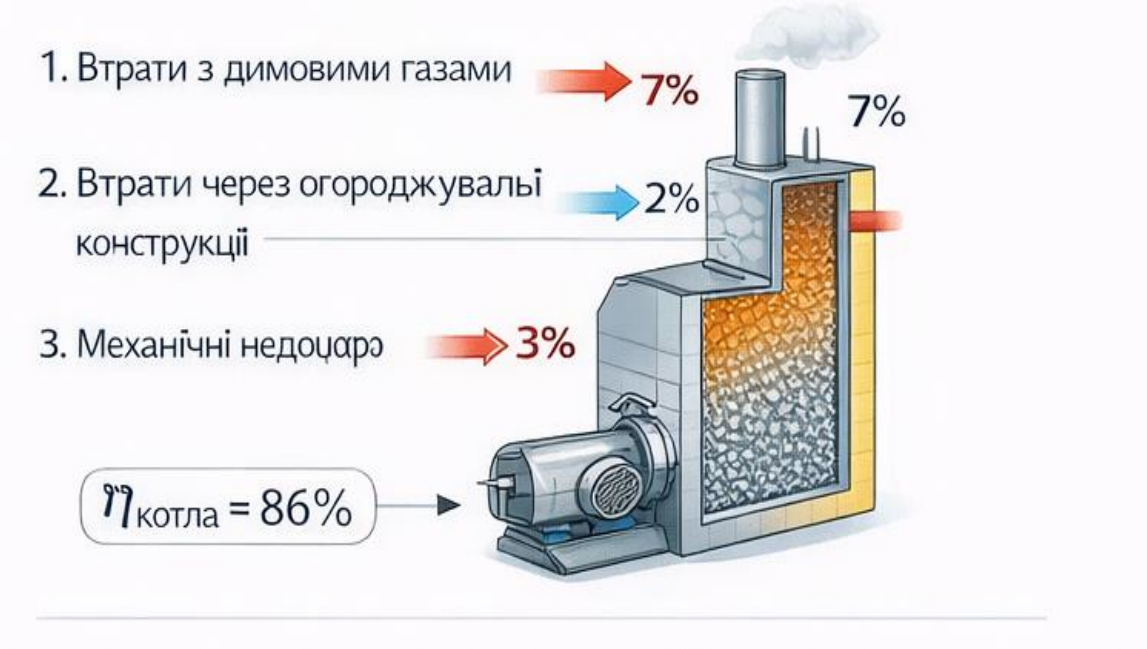


Рисунок 1.4 – Загальна схема промислової печі

1.6.1 Енергетичні характеристики промислових печей

Енергетичні характеристики промислових печей визначаються насамперед їхнім коефіцієнтом корисної дії (ККД), питомими витратами палива та величиною теплових втрат. ККД печі показує, яка частка теплоти згоряння палива фактично використовується для нагріву продукції.

Для більшості традиційних печей ККД становить 50–70 %, що означає, що 30–50 % енергії газу втрачається. У таблиці 1.3 наведено типові значення енергетичних показників для різних типів промислових печей.

Таблиця 1.3 – Енергетичні характеристики промислових печей

Тип печі	**Температура процесу, °C**	**ККД, %**	**Питома витрата газу**
Камерна піч	800–1200	55–65	Висока
Тунельна піч	900–1400	60–75	Середня
Шахтна піч	1000–1500	65–80	Низька
Обертова піч	900–1300	50–60	Висока

З наведених даних видно, що навіть у найбільш ефективних шахтних печах втрати теплоти залишаються значними.

1.6.2 Основні джерела втрат теплоти в печах

Втрати теплоти в промислових печах виникають на всіх етапах перетворення енергії палива. Найбільшу частку становлять втрати з димовими газами, температура яких може досягати 300–600 °C. Це означає, що значна кількість теплоти викидається в атмосферу без використання. Основні джерела теплових втрат у промисловій печі наведені на рисунку 1.5.

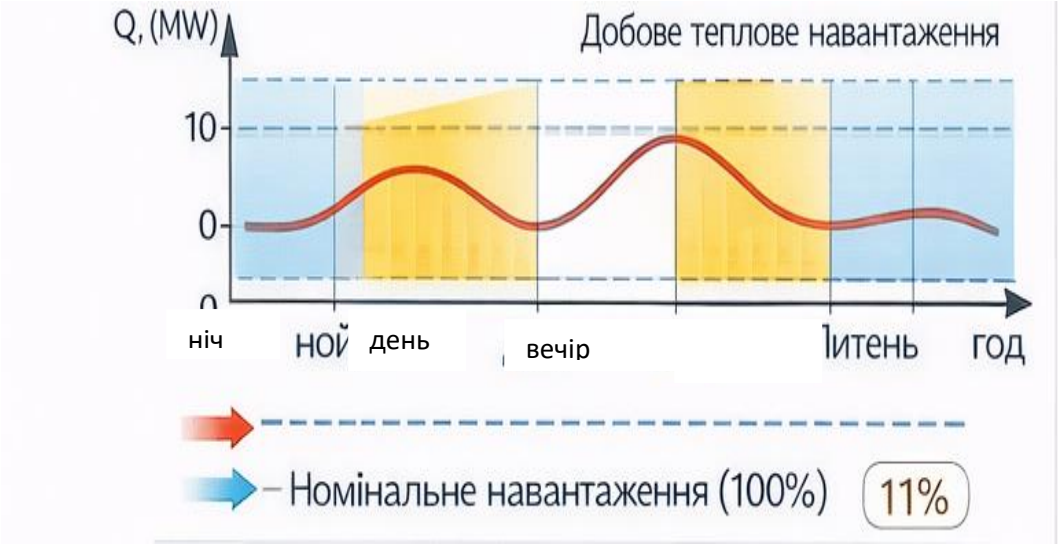


Рисунок 1.5 – Основні джерела теплових втрат у промисловій печі

Другим важливим джерелом втрат є теплопередача через огороджувальні конструкції печі — стінки, склепіння, дверцята та оглядові отвори. Навіть при наявності теплоізоляції температура зовнішніх поверхонь може досягати 60–100 °C, що призводить до постійного відведення теплоти в навколишнє середовище.

Додаткові втрати виникають при завантаженні та вивантаженні матеріалів, коли відбувається відкриття печі та вихід гарячих газів.

1.6.3 Вплив режимів роботи на витрати газу

Режими роботи печей істотно впливають на їх енергоефективність. При роботі з неповним завантаженням або частими зупинками питомі витрати газу різко зростають, оскільки значна частина теплоти витрачається на нагрів самого агрегату, а не продукції.

Найбільш економічним є режим безперервної роботи з постійним навантаженням, коли теплова інерція печі використовується максимально

ефективно. Порушення цього режиму призводить до додаткових витрат газу на повторний розігрів агрегату.

1.6.4 Рекуперація теплоти димових газів

Одним з найефективніших способів зменшення витрат газу є утилізація теплоти димових газів. Для цього використовуються рекуператори або регенератори, які дозволяють передавати теплоту відхідних газів повітрю, що подається на горіння, або технологічному теплоносію. Принцип рекуперації теплоти димових газів показано на рисунку 1.6.

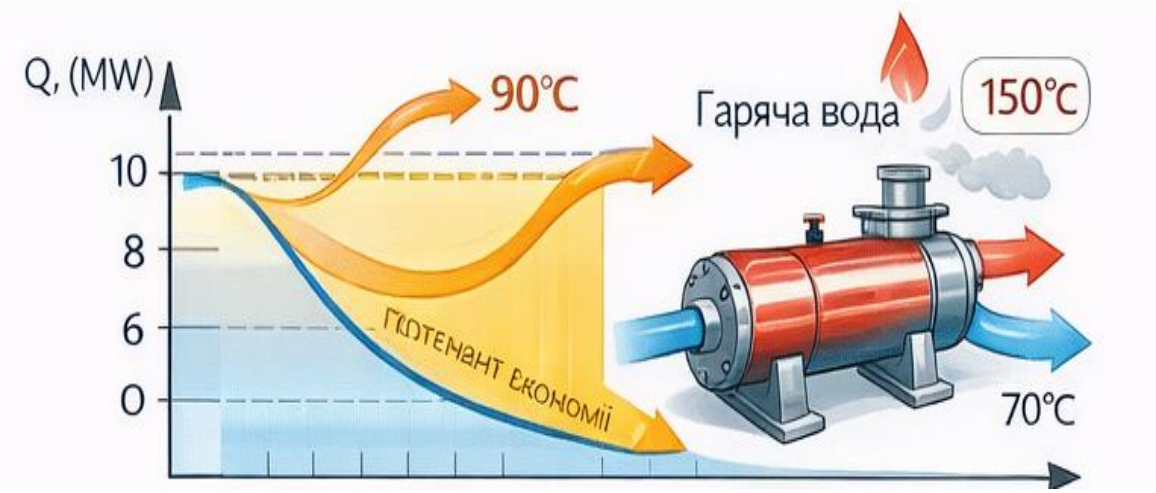


Рисунок 1.6 – Схема рекуперації теплоти димових газів

Підігрів повітря горіння на 200–300 °C може знизити витрати газу на 15–25 %, що робить рекуперацію одним з ключових елементів енергоефективних технологій у теплових агрегатах.

1.6.5 Вплив теплоізоляції на енергоефективність

Стан теплоізоляції корпусу печі безпосередньо впливає на величину теплових втрат. Старі або пошкоджені ізоляційні матеріали можуть збільшувати втрати теплоти у 1,5–2 рази порівняно з сучасними матеріалами.

Використання сучасних волокнистих та вакуумних теплоізоляцій дозволяє знизити температуру зовнішніх поверхонь печі та скоротити втрати теплоти на 5–10 %.

1.6.6 Потенціал енергозбереження в теплових агрегатах

Сумарний потенціал зниження витрат газу в промислових печах за рахунок комплексного застосування рекуперації, автоматизації, теплоізоляції та оптимізації режимів роботи може досягати 30–40 % від початкового рівня споживання.

Це означає, що саме теплові агрегати є основним резервом підвищення енергоефективності промислових підприємств і зниження витрат палива.

1.7 Теплообмінники та утилізація вторинної теплоти промислових агрегатів

Одним з найефективніших напрямів зменшення споживання природного газу та підвищення енергоефективності промислових агрегатів є використання теплообмінних апаратів для утилізації вторинної теплоти. Вторинна теплота утворюється в процесі роботи теплових агрегатів у вигляді гарячих димових газів, нагрітих поверхонь обладнання, відпрацьованих теплоносіїв та продуктів технологічних процесів. У більшості випадків ця теплота виводиться в

навколишнє середовище без корисного використання, що призводить до значних енергетичних втрат.

Утилізація вторинної теплоти дозволяє повторно використовувати частину теплової енергії, зменшуючи потребу в первинному паливі. Для промислових підприємств теплоенергетичного профілю це означає пряме скорочення витрат природного газу та підвищення загального коефіцієнта корисної дії технологічних установок. Класифікація теплообмінників, що застосовуються для утилізації вторинної теплоти, наведена на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 – Класифікація теплообмінників для утилізації вторинної теплоти

1.7.2 Рекуперація теплоти димових газів

Найбільш значний потенціал вторинної теплоти зосереджений у димових газах промислових печей та котлів. Температура димових газів після теплових

агрегатів часто становить 300–600 °С, що значно перевищує температуру навколишнього середовища.

Рекуперація теплоти димових газів полягає у передаванні цієї теплоти повітрю, що подається на горіння, або технологічній воді. Це дозволяє зменшити витрати газу на підігрів повітря та підвищити температуру горіння без додаткового спалювання палива. Принципова схема рекуперації теплоти димових газів у промисловій печі наведена на рисунку 1.8.

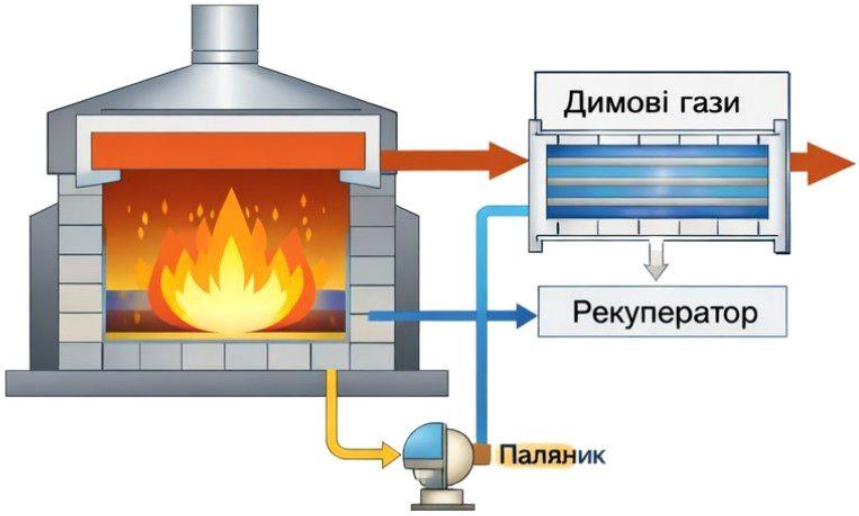


Рисунок 1.8 – Схема рекуперації теплоти димових газів у промисловій печі

1.7.3 Теплотехнічні основи роботи теплообмінників

Процес теплообміну в рекуперативних теплообмінниках описується рівнянням теплового балансу

$$Q = G \cdot c \cdot (t_{вх} - t_{вих})$$

де

Q- кількість утилізованої теплоти, Вт –

G- масова витрата теплоносія, кг/с

c- питома теплоємність, Дж/(кг·К)

$t_{вх.}t_{вих}$- температури теплоносія на вході та виході.

Кількість переданої теплоти також залежить від площі теплообмінної поверхні та коефіцієнта теплопередачі:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{ср}$$

де

k- коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{N} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$ (через плоску стінку)

F- площа теплообмінної поверхні, м²

$\Delta t_{ср}$- середній температурний напір

$$\Delta t_{ср} = \varepsilon_{\Delta t} \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{\ln \frac{\Delta t_б}{\Delta t_м}}$$

де – $\varepsilon_{\Delta t}$ поправочний коеф. на схему руху теплоносіїв

Ці залежності використовуються при виборі та розрахунку теплообмінників для промислових агрегатів.

Так, наприклад, середньологарифмічний температурний напір буде найбільшим при протитечійній схемі, і тому, якщо це можливо, систему проєктують саме за такою схемою як найбільш вигідною.

1.7.4 Оцінка економії газу при утилізації теплоти

Економічний ефект від утилізації вторинної теплоти визначається зменшенням витрат природного газу. Річна економія газу може бути оцінена за формулою:

$$\Delta V_{газ} = \frac{Q\text{утил.}}{Q\text{н.р.}}$$

$Q_{утил}$- річна кількість утилізованої теплоти, МДж

$Q_{н.р}$- нижча теплота згоряння природного газу, МДж/м³.

Приклад розрахунку.

При утилізації $1{,}5 \cdot 10^6$ МДж теплоти димових газів та $Q_{н.р}$= 34 МДж/м³ річна економія газу становитиме:

$$\Delta V_{газ} = 1{,}5 \times \frac{10^6}{34} = 44\,000 \text{ м}^3/\text{рік}$$

1.7.5 Вплив теплообмінників на тепловий баланс агрегату

Включення теплообмінника в схему теплового агрегату змінює його тепловий баланс. Частка втрат з димовими газами зменшується, а корисне використання теплоти зростає.

(Зменшення втрат з 30 % до 15 %)

Порівняння теплового балансу агрегату до та після утилізації вторинної теплоти наведено на рисунку 1.9**,** де наочно показано перерозподіл теплових потоків у системі.

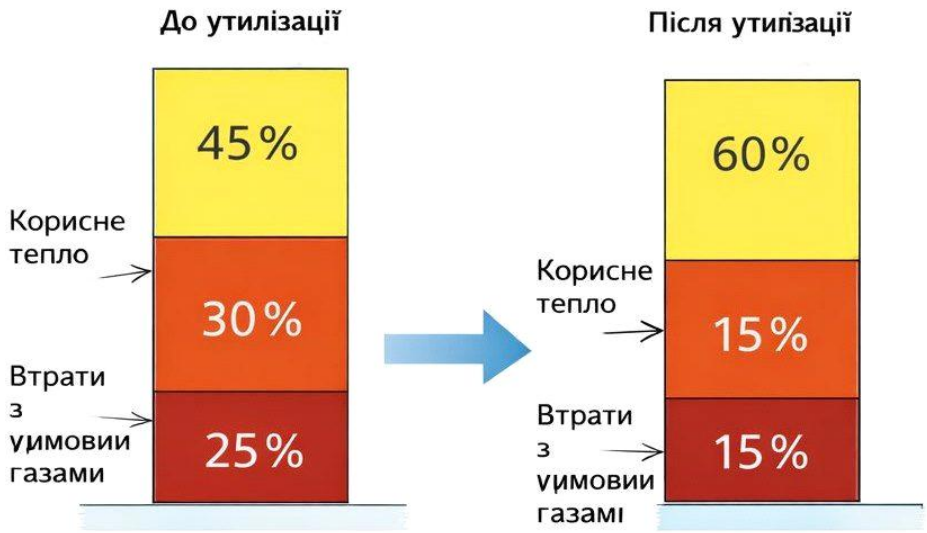


Рисунок 1.9 – Порівняння теплового балансу агрегату до та після утилізації теплоти

1.7.6 Обмеження та умови ефективного використання теплообмінників

Ефективність утилізації вторинної теплоти залежить від температурного рівня димових газів, стабільності режимів роботи агрегату та стану теплообмінних поверхонь. Наявність пилу, агресивних домішок та конденсації може знижувати ефективність теплообміну та скорочувати термін служби обладнання.

Тому при впровадженні теплообмінників необхідно враховувати умови експлуатації та забезпечувати регулярне технічне обслуговування.

1.7.7 Значення теплообмінників у системі енергозбереження

Теплообмінники є ключовим елементом системи енергозбереження промислових агрегатів. Вони дозволяють не лише зменшити споживання природного газу, але й підвищити екологічну безпеку виробництва за рахунок зниження температури викидів.

Таким чином, утилізація вторинної теплоти є одним з найбільш перспективних напрямів підвищення енергоефективності промислових агрегатів теплоенергетичного профілю.

1.8 Комплексні енергоефективні заходи та їх вплив на економію газу

1.8.1 Вступ: актуальність та значення енергоефективності

Енергоефективність у сучасних теплопостачальних системах є однією з ключових умов забезпечення економічної та екологічної стабільності держави. Використання природного газу як основного джерела теплової енергії є поширеною практикою в Україні та багатьох європейських країнах, проте висока вартість енергоносія та вимоги щодо скорочення викидів парникових газів роблять необхідним впровадження комплексних заходів з енергозбереження.

Комплексний підхід до енергоефективності включає одночасне застосування технічних, технологічних та організаційно-експлуатаційних заходів, що дозволяє досягти синергійного ефекту, при якому сумарна економія газу перевищує ефект від роздільного застосування кожного заходу.

Мета даного підрозділу – показати, як конкретні комплексні заходи впливають на економію газу та забезпечують зниження витрат на опалення, водопостачання та технологічні потреби.

1.8.2 Класифікація енергоефективних заходів

Енергоефективні заходи у сучасних системах теплопостачання мають комплексний характер і охоплюють різні рівні впливу на споживання енергоресурсів. В цілому, їх доцільно поділити на три великі групи: теплотехнічні, технологічні та організаційно-експлуатаційні заходи, кожна з яких виконує специфічну роль у зменшенні тепловтрат і підвищенні ефективності використання газу. Теплотехнічні заходи спрямовані на мінімізацію втрат теплової енергії через огороджувальні конструкції будівель, трубопроводи та

вентиляційні системи. До цього класу належать різноманітні способи утеплення стін, перекриттів, покрівель та підлог із використанням сучасних теплоізоляційних матеріалів, які зменшують коефіцієнт теплопередачі конструкцій. Значне зниження тепловтрат досягається також через заміну старих вікон та дверей на сучасні енергозберігаючі склопакети та дверні блоки з високими теплоізоляційними характеристиками. Важливим напрямком є ізоляція трубопроводів систем опалення та гарячого водопостачання, що дозволяє зменшити втрати тепла під час транспортування теплоносія. Таким чином, теплотехнічні заходи безпосередньо впливають на зменшення питомого споживання газу, підвищують комфорт у приміщеннях та продовжують ресурс будівельних конструкцій.

Технологічні заходи зосереджені на підвищенні ефективності роботи теплотехнічного обладнання та оптимізації технологічних процесів. Вони включають модернізацію котлів і теплообмінного обладнання, що дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії системи та зменшити витрати газу на виробництво теплової енергії. Важливим напрямком технологічних заходів є впровадження рекуперації тепла, коли відхідне тепло вентиляційного повітря або технологічних процесів використовується для попереднього нагріву води чи приміщень, що дозволяє додатково скоротити споживання газу. Автоматизація систем опалення, встановлення термостатичних клапанів та програмованих контролерів забезпечує підтримку оптимального режиму роботи, уникає непотрібного споживання енергії та дозволяє реагувати на зміну зовнішніх умов. Технологічні заходи забезпечують не лише економію енергоресурсів, але й підвищують надійність і довговічність обладнання, а також знижують експлуатаційні витрати.

Організаційно-експлуатаційні заходи є додатковим, але не менш важливим елементом комплексного підходу до енергоефективності. Вони включають

планування режимів роботи котельні та теплових мереж, контроль за витратами газу, моніторинг ефективності роботи обладнання та регулярне обслуговування систем. Навчання персоналу правильній експлуатації енергетичних систем, своєчасне виявлення і усунення втрат тепла, а також впровадження внутрішніх регламентів щодо оптимального використання енергії дозволяють досягти додаткової економії газу без значних капіталовкладень. Організаційно-експлуатаційні заходи дозволяють забезпечити стабільний рівень ефективності, який підтримується протягом тривалого часу, і підвищують загальну надійність системи теплопостачання.

Таким чином, класифікація енергоефективних заходів на теплотехнічні, технологічні та організаційно-експлуатаційні відображає комплексний підхід до оптимізації використання газу. Кожна група заходів відіграє свою роль і має специфічний вплив на економію енергії, а найбільший ефект досягається при їхньому комбінованому застосуванні, що забезпечує синергію та дозволяє значно знизити загальні витрати газу, підвищити енергетичну ефективність будівель та промислових об’єктів, а також скоротити негативний вплив на навколишнє середовище.

1.8.3 Методика оцінки впливу комплексних енергоефективних заходів на економію газу

Оцінка ефективності енергоефективних заходів є невід’ємною частиною процесу модернізації систем теплопостачання. Основним критерієм такої оцінки є зменшення споживання природного газу, що досягається за рахунок зниження тепловтрат, підвищення ефективності обладнання та оптимізації режимів роботи системи. Методика оцінки економії газу передбачає комплексний підхід, що включає визначення вихідного споживання енергії, розрахунок потенційної

економії від окремих заходів та оцінку сумарного ефекту від їхнього впровадження.

Розрахунок економії газу здійснюється за формулою:

$$Q_{економія}=Q_{первинний}-Q_{після\ заходів}$$

де

$Q_{первинний}$-річне споживання газу до впровадження заходів, м³, а $Q_{після\ заходів}$ — споживання газу після впровадження комплексних заходів, м³.

Важливо враховувати коефіцієнт корисної дії котла ($\eta_{котел}$), тепловтрати системи ($\Delta Q_{втрати}$), а також сезонні фактори, що характеризують тривалість опалювального періоду та зміну температури зовнішнього середовища. Впровадження комплексних заходів передбачає оцінку впливу кожного виду заходів як окремо, так і в сукупності, що дозволяє визначити синергійний ефект.

Для більш точного визначення економії доцільно використовувати покроковий підхід. Спершу визначають річне споживання газу до впровадження заходів, яке може бути зафіксоване за даними лічильників або історичними даними об’єкта. Потім розраховується очікувана економія від теплотехнічних заходів, таких як утеплення огороджувальних конструкцій, заміна вікон та дверей, ізоляція трубопроводів. Ці розрахунки здійснюються на основі різниці коефіцієнтів теплопередачі конструкцій до та після утеплення та середньої температурної різниці між зовнішнім і внутрішнім середовищем протягом опалювального сезону.

Наступним кроком є оцінка економії газу за рахунок технологічних заходів, таких як модернізація котлів, встановлення рекуператорів тепла та автоматизація систем опалення. Тут розрахунки базуються на підвищенні ККД котла та зменшенні втрат тепла у мережі. Для прикладу, якщо старий котел мав ККД 75%, а після модернізації ККД становить 92%, економія газу обчислюється як різниця між витратами, необхідними для виробництва одного і того ж обсягу теплової енергії.

Додатково оцінюються ефекти від організаційно-експлуатаційних заходів. Це можуть бути оптимізація графіків роботи котельні, регламентне обслуговування обладнання, моніторинг та контроль витрат. Вплив цих заходів на економію газу, як правило, менший, ніж від технічних і технологічних заходів, проте вони забезпечують підтримку досягнутого рівня енергоефективності та запобігають надмірному споживанню газу через неправильну експлуатацію системи.

Для наочності та практичного застосування методики доцільно використовувати табличну форму обліку споживання газу та розрахунків економії. Наприклад, сумарна економія газу по об’єкту може бути представлена у вигляді таблиці, де наведено вихідні дані, витрати після кожного виду заходів, абсолютну та відносну економію. Такий підхід дозволяє наочно побачити, який внесок кожного заходу у загальну економію та визначити пріоритети інвестицій.

Крім того, для магістерської роботи важливо підкреслити, що методика розрахунку економії газу повинна включати моделювання споживання протягом опалювального сезону, враховуючи коливання температури зовнішнього середовища, тривалість опалювальних днів та внутрішнє тепловиділення. Це дозволяє не тільки прогнозувати економію, але й

оцінювати економічну ефективність заходів, визначати термін окупності інвестицій та планувати подальші заходи з енергозбереження.

Для підвищення точності оцінки економії газу в сучасних дослідженнях часто використовують комп’ютерне моделювання та спеціалізоване програмне забезпечення для енергетичного аналізу будівель та систем опалення. Такі моделі дозволяють врахувати всі впливи одночасно, включаючи сезонні коливання температури, вплив вітру, сонячного опромінення та зміну теплового навантаження приміщень протягом дня.

Таким чином, методика оцінки впливу комплексних енергоефективних заходів на економію газу базується на комплексному підході, що включає визначення базового споживання, розрахунок економії від окремих заходів, облік синергійного ефекту та використання аналітичних і моделювальних інструментів для прогнозування результатів. Така методика є основою для планування та обґрунтування впровадження енергоефективних проектів, оцінки їх економічної доцільності та визначення терміну окупності інвестицій.

1.8.4 Сумарні розрахунки економії газу по комплексних заходах

Для наочності оцінки ефективності комплексних енергоефективних заходів складемо розрахункову таблицю, де враховуються три основні групи заходів: теплотехнічні, технологічні та організаційно-експлуатаційні.

Вихідні дані для розрахунку:

Річне споживання газу до заходів $Q_{первинний}$=10 000 м³

Середня температура опалювального сезону ΔT=20 ℃

Тривалість опалювального сезону t=200 діб

- ККД старого котла ηстарий=75 %
- ККД нового котла ηновий=92%

На основі цих даних можна оцінити економію газу від кожного заходу та сумарний ефект в табл. 1.4.

Таблиця 1.4. – Розрахунок економії газу по комплексних заходах

Заходи	**Газ до заходу, м³**	**Газ після заходу, м³**	**Економія, м³**	**Економія, %**
Теплотехнічні (утеплення стін, підлоги, покрівлі)	10 000	7 500	2 500	25%
Заміна вікон та дверей	7 500	6 500	1 000	13%
Ізоляція трубопроводів	6 500	6 000	500	8%
Модернізація котла	6 000	5 200	800	13%
Встановлення рекуператорів тепла	5 200	4 800	400	8%
Організаційно-експлуатаційні заходи	4 800	4 600	200	4%
Сумарна економія	10 000	4 600	5 400	54%

Як видно з таблиці, сумарна економія газу при комплексному підході до енергоефективності досягає **54%**, що є значним показником для будь-якого об’єкта. Теплотехнічні заходи дають основну частину економії, але синергія всіх трьох груп заходів дозволяє максимізувати результат.

Для наочності можна також побудувати графік, що демонструє зменшення споживання газу після кожного етапу впровадження заходів.

Графічне пояснення економії газу (приклад):

Газ до заходів [redacted] 10 000 м³

Теплотехнічні [redacted] 7 500 м³

Вікна та двері [redacted] 6 500 м³

Ізоляція труб [redacted] 6 000 м³

Модернізація котла [redacted] 5 200 м³

Рекуператори тепла [redacted] 4 800 м³

Орг.-експлуатаційні [redacted] 4 600 м³

Графік демонструє, що економія газу відбувається поетапно, і кожен наступний захід додає додаткову економію, підкреслюючи важливість комплексного підходу.

Висновки за розрахунками:

1. Основний внесок у економію роблять теплотехнічні заходи, що знижують тепловтрати будівель.
2. Технологічні заходи (модернізація котлів та рекуператори) забезпечують додаткову економію та підвищують ефективність обладнання.
3. Організаційно-експлуатаційні заходи, хоча й менш витратні, стабілізують досягнуту економію та забезпечують її підтримку протягом тривалого часу.
4. Сумарний ефект від комплексного впровадження заходів може перевищувати 50% економії газу, що робить такі інвестиції високоефективними як з економічної, так і з екологічної точки зору.

1.8.5 Детальний приклад розрахунку економії газу по комплексних заходах

Для більш точного прогнозування економії газу застосуємо покрокову методику. Припустимо, що вихідне річне споживання газу складає 10 000 м³, опалювальний сезон триває 200 днів, а середня різниця температур зовні та всередині будівлі становить 20°C.

Крок 1. Розрахунок економії від теплотехнічних заходів

Для визначення економії газу від утеплення огороджувальних конструкцій використовуємо формулу тепловтрат

$$Q_{економія,\ тепло} = (U0 - U1) \cdot S \cdot \Delta T \cdot t,$$

U0 — коефіцієнт теплопередачі без утеплення

U1 — після утеплення

S — площа огороджувальних конструкцій,

 ΔT — середня різниця температур,

 t — тривалість опалювального сезону.

Аналогічно розраховуємо економію від заміни вікон і дверей та ізоляції трубопроводів, отримуючи 1 000 м³ та 500 м³ відповідно.

Крок 2. Розрахунок економії від технологічних заходів

Модернізація котла підвищує ККД із 75% до 92%, економія газу розраховується так:

Підставимо: U0=1,5 Вт/м²·К, U1=0,35 Вт/м²·К S=600 м², ΔT=20∘C, t=200 днів.

Перетворюючи на енергетичні одиниці та враховуючи теплотворну здатність газу k=9,5 кВт·год/м³, отримаємо приблизну економію:

Qекономія, тепло≈2 500 м³/рік

Аналогічно розраховуємо економію від заміни вікон і дверей та ізоляції трубопроводів, отримуючи 1 000 м³ та 500 м³ відповідно.

Рекуператори тепла дозволяють додатково зменшити споживання газу на 8% від залишку після котла:

$Q_{економія,рекуператори}$=5 200·0,08≈416 м³.

Крок 3. Організаційно-експлуатаційні заходи

Впровадження контролю режимів роботи, регламентне обслуговування і навчання персоналу дозволяють скоротити споживання газу на 4%:

$Q_{економія,орг}$=4 784·0,04≈191 м³.

Крок 4. Сумарна економія газу

Об’єднавши всі заходи, отримуємо:

Qекономія, сумарна=2 500+1 000+500+1 109+416+191≈5 716 м³/рік.

Сумарне споживання газу після впровадження заходів:

$Q_{після\ заходів} = 10\,000 - 5\,716 \approx 4\,284$ м³/рік.

Таким чином, економія становить **57%**, що перевищує половину вихідного споживання.

Крок 5. Щомісячна економія газу

Для наочності в таблиці 1.5 наведено порівняння щомісячного споживання природного газу до та після впровадження енергозберігаючих заходів. Діаграма показує, як зменшуються витрати палива у різні місяці опалювального сезону.

Таблиця 1.5 – Порівняння щомісячного споживання природного газу до та після впровадження енергозберігаючих заходів

Місяць	Споживання до заходів, м³	Споживання після заходів, м³	Економія, м³
Жовтень	1200	514	686
Листопад	1400	598	802
Грудень	1600	684	916
Січень	1800	768	1032
Лютий	1400	598	802
Березень	1600	684	916
Квітень	1000	398	602

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ РОБОТИ ПРОМИСЛОВИХ АГРЕГАТІВ

2.1 Детальний аналіз режимів роботи та енергоспоживання промислових агрегатів теплоенергетичних систем

Промислові агрегати теплоенергетичних систем працюють у складних і змінних умовах, що визначаються як зовнішніми кліматичними чинниками, так і особливостями технологічного процесу теплопостачання. У котельних установках основними енергоспоживачами є котельні агрегати, насосне обладнання, дуттьові та тягодуттєві машини, а також допоміжні системи автоматики та управління. На рисунку 2.1 наведено структурну схему теплоенергетичної системи промислової котельні, що відображає основні вузли споживання та циркуляції енергії.



Рисунок 2.1 – Структурна схема теплоенергетичної системи промислової котельні

Особливістю роботи котельних є те, що протягом більшої частини року вони експлуатуються в режимах, далеких від номінальних. Це пов’язано з

сезонністю теплового навантаження, яке суттєво змінюється залежно від температури зовнішнього повітря. У реальних умовах повна теплова потужність котельні використовується лише в періоди екстремально низьких температур, тоді як упродовж значної частини опалювального сезону обладнання працює з навантаженням 40–60 % від номіналу.

Такий характер навантаження призводить до суттєвого зниження загальної енергоефективності, оскільки більшість агрегатів проєктуються з урахуванням номінального режиму роботи. У разі відхилення від нього зростають питомі витрати енергії, а коефіцієнти корисної дії зменшуються.

Особливо це стосується насосних агрегатів, які забезпечують циркуляцію теплоносія в теплових мережах. У традиційних схемах регулювання подача теплоносія змінюється шляхом дроселювання за допомогою засувок або клапанів. Такий спосіб регулювання є енергетично неефективним, оскільки електродвигун насоса продовжує працювати з майже постійною частотою обертання, споживаючи значну кількість електроенергії незалежно від реальної потреби системи.

Аналіз фактичних режимів роботи показує, що у перехідні періоди (осінь, весна) спостерігається найбільша невідповідність між фактичним тепловим навантаженням і режимами роботи насосів. У цей час теплове навантаження може знижуватися в 1,5–2 рази, тоді як електроспоживання насосного обладнання зменшується незначно. Це призводить до зростання питомих витрат електроенергії на одиницю виробленої теплової енергії.

На рисунку 2.2 показано залежність енергоспоживання насосного агрегату від режиму навантаження.



Рисунок 2.2 – Залежність енергоспоживання насосного агрегату від режиму навантаження

Річне енергоспоживання котельні доцільно аналізувати з урахуванням тривалості роботи обладнання в кожному режимі. Для цього складається графік навантажень, який відображає залежність теплової потужності від температури зовнішнього повітря. На основі такого графіка визначається кількість годин роботи котельні при різних рівнях навантаження.

Середня електрична потужність насосного агрегату визначається за формулою:

$$P_{ср}=\frac{1}{\mathrm{T}}\int_0^{\mathrm{T}}\mathrm{P}(t)dt$$

де P(t)- миттєва потужність у момент часу t

T – загальна тривалість роботи агрегату.

У практичних розрахунках часто використовується спрощений підхід, при якому середня потужність визначається на основі середнього значення подачі та напору насоса. Проте такий підхід не враховує динаміки зміни навантаження та призводить до заниження реальних втрат енергії.

Таким чином, детальний аналіз режимів роботи промислових агрегатів дозволяє виявити ключові причини нераціонального використання енергоресурсів і обґрунтувати доцільність впровадження енергоефективних технологій.

2.2 Розширений розрахунок теплових та електричних втрат у теплоенергетичних агрегатах

Теплові втрати в котельних установках є неминучими, однак їх величина може суттєво відрізнятися залежно від технічного стану обладнання, режимів експлуатації та якості теплоізоляції. Для комплексної оцінки енергоефективності необхідно розглядати всі основні складові теплових втрат.

Втрати теплоти з відхідними газами є одними з найбільших і визначаються температурою димових газів на виході з котла. Вони можуть бути оцінені за формулою:

$$Q_г = G_г \times c_г \times (t_г - t_н)$$

де

$G_г$ – масова витрата димових газів, кг/с;

$c_г$ – середня теплоємність газів, кДж/(кг·К);

$t_г$ – температура газів на виході з котла, °С;

$t_н$ – температура навколишнього середовища, °С.

Зі зменшенням навантаження котла температура димових газів часто зростає, що призводить до додаткових втрат теплоти. Це є наслідком погіршення умов теплообміну та нераціонального режиму горіння.

Втрати теплоти через поверхні обладнання визначаються станом теплоізоляції та площею нагрітих поверхонь. Навіть незначні пошкодження теплоізоляційного шару можуть призвести до суттєвого зростання втрат, особливо при тривалій роботі котельні.

Електричні втрати формуються в електродвигунах, системах керування та електричних мережах. Для електродвигунів характерними є втрати в обмотках, втрати в магнітопроводі та механічні втрати. Загальні втрати електродвигуна можуть бути оцінені як різниця між підведеною електричною потужністю та корисною механічною потужністю на валу.

На рисунку 2.3 наведена структура теплових та електричних втрат у теплоенергетичних агрегатах, що наочно відображає розподіл основних компонентів енергетичних втрат у системі.

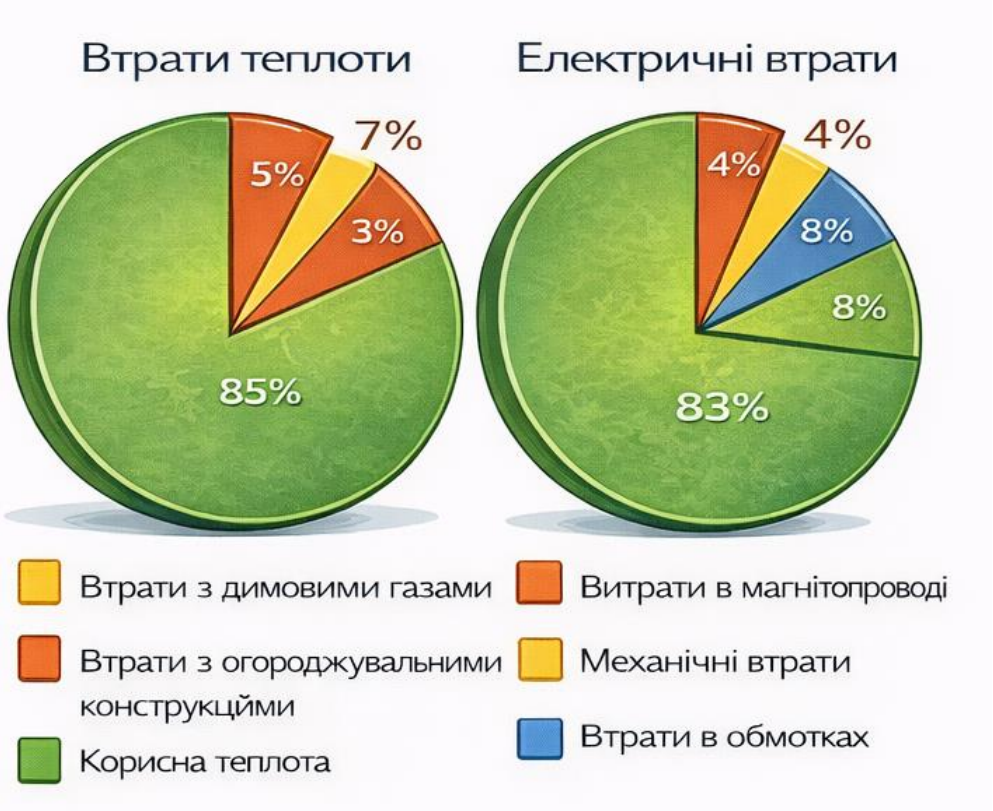


Рисунок 2.3 – Структура теплових та електричних втрат у теплоенергетичних агрегатах

$$P_{втр}=P_{ел}-P_{мех}$$

Особливо неефективною є робота електродвигунів у режимах часткового навантаження, коли ККД значно знижується. У таких умовах частка втрат у загальному балансі потужності різко зростає.

2.3 Деталізований розрахунок потенціалу енергозбереження промислових агрегатів

Потенціал енергозбереження промислових агрегатів визначається як сукупність технічних і організаційних можливостей зменшення споживання енергоресурсів без зниження якості теплопостачання. Найбільший ефект досягається при комплексному підході, який включає модернізацію обладнання, оптимізацію режимів роботи та впровадження систем автоматичного керування.

Для насосних агрегатів основним чинником енергозбереження є регулювання частоти обертання електродвигуна. Відповідно до законів подібності:

$$\frac{N2}{N1}=\left(\frac{n2}{n1}\right)^3$$

де N1 і N2- потужність до та після регулювання

n1 і n2- відповідні частоти обертання

Ця залежність пояснює, чому застосування частотно-регульованих приводів є одним з найефективніших заходів з енергозбереження. Навіть відносно невелике зниження швидкості обертання призводить до значного зменшення споживаної електроенергії.

Потенціал зменшення витрат палива оцінюється шляхом порівняння фактичного ККД котельні з можливим ККД після впровадження заходів з модернізації. До таких заходів належать оптимізація процесу горіння, використання економайзерів, утилізація теплоти відхідних газів та зменшення втрат у теплових мережах.

Загальна річна економія енергоресурсів визначається як сума економії електроенергії та палива, що дозволяє обґрунтувати доцільність інвестицій у модернізацію обладнання.

Для кількісної оцінки можливого зниження витрат палива використовується порівняльний аналіз фактичних та розрахункових показників роботи котельні. Річна економія палива визначається за формулою:

$$\Delta B = Q_{річ} \times \left(\frac{1}{\eta ф} - \frac{1}{\eta п}\right)$$

де

ΔВ–річна економія палива, м³;

Qріч – річний відпуск теплової енергії, ГДж;

ηф – фактичний коефіцієнт корисної дії котельні;

ηп – прогнозований ККД після впровадження енергоефективних заходів.

Практичні розрахунки показують, що навіть незначне підвищення ККД котельної установки на 3–5 % дозволяє зменшити споживання природного газу на 7–10 %. Для котельні потужністю 10 МВт це відповідає економії десятків тисяч кубічних метрів палива протягом одного опалювального сезону.

Значний потенціал енергозбереження також зосереджений у допоміжному обладнанні котельні. Насосні агрегати, димососи та вентилятори працюють упродовж тривалого часу та формують основну частку електроспоживання. Відсутність адаптивного регулювання продуктивності призводить до перевитрат електроенергії, особливо в періоди зниженого теплового навантаження. Узагальнені результати

порівняння енергетичних показників до та після впровадження енергоефективних заходів наведено у таблиці 2.1.

.

Таблиця 2.1 – Порівняння енергетичних показників до та після впровадження енергоефективних заходів

Показник	**До модернізації**	**Після модернізації**
ККД котельні, %	88	92
Річне споживання газу, тис. м³	2150	1980
Річне електроспоживання, тис. кВт·год	980	720

Як видно з наведених даних, найбільший ефект досягається при одночасному зниженні споживання електроенергії та палива. Такий результат можливий лише за умови комплексного підходу до модернізації котельні, що поєднує технічні та організаційні заходи.

Окрім технічних рішень, важливу роль відіграють організаційні фактори. Оптимізація графіків роботи агрегатів, своєчасне технічне обслуговування, очищення теплообмінних поверхонь та контроль параметрів горіння дозволяють зменшити втрати енергії без значних капітальних вкладень.

Сумарний потенціал енергозбереження промислових агрегатів котельні 10 МВт, з урахуванням усіх розглянутих факторів, може досягати 25–30 % від поточного рівня енергоспоживання. Для наочного відображення структури цього потенціалу доцільно побудувати кругову або стовпчикову діаграму розподілу економії за видами заходів. Для наочного відображення структури потенціалу енергозбереження котельні та розподілу економії за видами заходів

доцільно побудувати діаграму. На рис. 2.4 показано, як різні заходи (модернізація котла, частотно-регульовані насоси, оптимізація графіків роботи) впливають на загальну економію енергоресурсів.



Рисунок 2.4 – Структура потенціалу енергозбереження котельні за видами заходів

Отримані результати свідчать про наявність значних резервів підвищення енергоефективності та підтверджують доцільність подальшого впровадження сучасних технологій керування та автоматизації теплоенергетичних процесів.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

3.1 Аналіз сучасних енергоефективних технологій для промислових котелень

Сучасні промислові котельні характеризуються значним рівнем споживання паливно-енергетичних ресурсів, що зумовлено як технологічними особливостями процесу виробництва теплової енергії, так і фізичним зношенням основного та допоміжного обладнання. У зв’язку з цим підвищення енергоефективності котельних установок є одним із ключових напрямів розвитку теплоенергетики, особливо в умовах зростання вартості енергоносіїв та посилення екологічних вимог.

Енергоефективні технології, що застосовуються в промислових котельнях, доцільно розглядати як сукупність технічних, технологічних та організаційних рішень, спрямованих на зменшення питомих витрат палива та електроенергії при збереженні або покращенні показників надійності й якості теплопостачання.

Одним з основних напрямів підвищення енергоефективності є модернізація котельного обладнання, зокрема заміна застарілих котлів з низьким коефіцієнтом корисної дії на сучасні високоефективні водогрійні або парові котли. Для традиційних котлів, що експлуатуються в промислових котельнях, фактичний ККД часто не перевищує 80–85 %, тоді як сучасні котельні агрегати забезпечують ККД на рівні 92–95 %. Зростання ККД досягається за рахунок оптимізації процесу теплообміну, зменшення втрат з відхідними газами та покращення герметичності газоповітряного тракту.

Важливу роль у зниженні витрат палива відіграє оптимізація процесу горіння. Невірно підібраний коефіцієнт надлишку повітря призводить до зростання теплових втрат та зниження ефективності роботи котла. Зменшення

коефіцієнта надлишку повітря з типових значень 1,4–1,5 до оптимальних 1,15–1,25 дозволяє скоротити втрати теплоти з відхідними газами та зменшити питомі витрати палива на 3–5 %. Для реалізації таких режимів застосовуються системи автоматичного регулювання подачі повітря та палива.

Значний потенціал енергозбереження пов’язаний з утилізацією вторинних енергетичних ресурсів, зокрема теплоти відхідних газів. Установлення економайзерів або конденсаційних теплообмінників дозволяє підігрівати живильну або зворотну мережну воду, що забезпечує додаткове зростання ККД котельні на 5–8 %. При цьому температура відхідних газів може бути знижена з 160–180 °С до 90–110 °С без порушення умов безпечної експлуатації обладнання.

Не менш важливим напрямом є підвищення енергоефективності допоміжного обладнання, до якого належать насосні, димососні та вентиляторні агрегати. Як показано в розділі 2, електроспоживання допоміжних механізмів становить значну частку загального енергобалансу котельні. Застосування частотно-регульованих приводів дає змогу адаптувати продуктивність агрегатів до фактичного теплового навантаження, зменшуючи споживання електроенергії на 20–40 %.

Окрему групу становлять організаційно-технічні заходи, зокрема оптимізація графіків роботи котельні, диспетчеризація теплових навантажень, своєчасне технічне обслуговування обладнання та підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу. Незважаючи на відносно низькі капітальні витрати, такі заходи забезпечують стабільне зменшення енергоспоживання та підвищують надійність роботи котельні в цілому.

Для узагальнення сучасних енергоефективних технологій доцільно навести таблицю 3.1, в якій представлено основні напрями підвищення енергоефективності, очікуваний ефект та складність впровадження.

Таблиця 3.1 – Основні енергоефективні технології для промислових котелень

№	Енергоефективна технологія	Суть Заходу	Очікуваний енергозберігаючий ефект	Рівень капітальних витрат	Доцільність впровадження
1	2	3	4	5	6
1	Застосування частотно-регульованих приладів	Регулювання продуктивності насосів та вентиляторів залежно від навантаження	Зниження електроспоживання на 20-40 %	Середній	Висока
2	Оптимізація процесу горіння	Зменшення коефіцієнта надлишку повітря, стабілізація факела	Зменшення витрат палива на 3-5 %	Низький	Висока
3	Утилізація теплоти відхідних газів	Встановлення економайзерів або конденсаційних теплообмінників	Підвищення ККД котельні на 5–8 %	Середній	Висока
4	Модернізація котельних агрегатів	Заміна застарілих котлів на сучасні високоефективні	Підвищення ККД до 92–95 %	Високий	Середня

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
5	Автоматизація систем керування	Впровадження АСКТП та погодного регулювання	Зменшення перевитрат енергії на 5–10 %	Середній	Висока
6	Теплова ізоляція обладнання та трубопроводів	Зменшення теплових втрат у навколишнє середовище	Скорочення теплових втрат на 2–4 %	Низький	Висока
7	Організаційно-експлуатаційні заходи	Оптимізація режимів, контроль енергоспоживання	Стабільне зниження витрат енергії	Мінімальний	Висока

3.2 Вибір та обґрунтування енергоефективних заходів для котельні потужністю 10 МВт

Для досліджуваної котельні тепловою потужністю 10 МВт вибір енергоефективних заходів здійснювався з урахуванням фактичного технічного стану обладнання, режимів роботи, результатів аналізу енергоспоживання та економічної доцільності впровадження відповідних рішень.

Основним критерієм відбору заходів є досягнення максимального енергозберігаючого ефекту при мінімальних капітальних вкладеннях та короткому терміні окупності. У зв’язку з цим першочергову увагу було приділено заходам, які не потребують повної заміни котельного обладнання.

Першим запропонованим заходом є впровадження частотно-регульованих приводів на насосах системи теплопостачання. Як показали результати аналізу режимів роботи, насосні агрегати значну частину часу

працюють у режимі часткового навантаження з дроселюванням подачі, що супроводжується значними втратами електроенергії. Перехід до частотного регулювання дозволяє забезпечити плавну зміну продуктивності насосів відповідно до фактичного теплового навантаження котельні.

Розрахунок економії електроенергії виконується за залежністю:

$$\Delta N = N1 - N2 = N1 \times \left(1 - \left(\frac{n2}{n1}\right)^3\right)$$

де

N1 – потужність електродвигуна до впровадження регулювання, кВт;

N2– потужність після регулювання, кВт;

n1n2 – відповідні частоти обертання.

За результатами розрахунків очікуване скорочення споживання електроенергії насосними агрегатами становить до 30 %, що в перерахунку на річний баланс дає суттєвий економічний ефект.

Другим важливим заходом є встановлення економайзера для утилізації теплоти відхідних газів. Для котельні потужністю 10 МВт характерні значні втрати теплоти з відхідними газами, величина яких може досягати 10–15 % від теплоти згоряння палива. Використання економайзера дозволяє знизити температуру газів та передати частину цієї теплоти теплоносію.

Кількість утилізованої теплоти визначається за формулою:

$$Q_{ут} = G_г \times c_г \times (t_{r1} - t_{r2})$$

де

$G_г$– витрата відхідних газів, кг/с;

$c_г$ – середня теплоємність газів, кДж/(кг·К);

$t_{г1}$, $t_{г2}$ – температура газів до та після економайзера.

Отримана додаткова теплота використовується для підігріву зворотної мережної води, що безпосередньо зменшує витрати палива в котлі.

3.3 Обґрунтування впровадження частотно-регульованих приводів насосних агрегатів (продовження)

Для детальної оцінки потенціалу енергозбереження насосів розглянемо конкретні параметри насосного агрегату котельні потужністю 10 МВт. Основний насос мережної води має такі характеристики:

- Номінальна потужність електродвигуна: 90 кВт
- Номінальна подача: 600 м³/год
- Напір: 35 м
- Середнє завантаження в умовах часткового навантаження: 70 %

3.3.1 Розрахунок економії електроенергії

Використовуючи закон куба для потужності насосного агрегату при частотному регулюванні:

$$N2=N1\cdot(n1n2)^3$$

де:

- N1=90 кВт — номінальна потужність насоса;
- n1=50 Гц — номінальна частота;

- n2=40 Гц — частота при частковому навантаженні (80 % від номінальної);
- N2— потужність насоса після регулювання.

$$N2=90\cdot(4050)3=90\cdot0.512=46.1\ кВт$$

Таким чином, зменшення частоти обертання на 20 % дозволяє знизити споживання електроенергії насоса майже вдвічі, що дає економію електроенергії близько 43,9 кВт на кожен насос.

Якщо в котельні працює два аналогічних насоси, то сумарна економія становитиме 87,8 кВт у режимі часткового навантаження.

3.3.2 Річна економія електроенергії

Для оцінки річної економії електроенергії приймаємо середній час роботи насосів у режимі часткового навантаження — 16 годин на добу протягом опалювального періоду (200 днів).

Розрахунок річної економії електроенергії:

$$Еек=\Delta N\cdot tроб\cdot D$$

де:

ΔN=43.9 кВт – економія на одному насосі;

tроб=16 год/добу;

D=200 днів/рік.

Еек=43.9·16·200=140,480 год/рік на один насос

Для двох насосів:

Еек, сум=140,480·2=280,960 кВт·год/рік

Це значна економія, яка в грошовому вираженні при вартості електроенергії 5 грн/кВт·год становитиме ≈1,4 млн грн/рік.

3.3.3 Додаткові технічні переваги впровадження ЧРП

1. Плавне регулювання подачі — дозволяє уникнути гідравлічних ударів у трубопроводах та зменшує зношення обладнання.
2. Зменшення шуму і вібрацій — частотно-регульовані приводи працюють більш тихо, що покращує умови праці.
3. Підвищення надійності — менше пускових струмів при запуску насосів, що збільшує ресурс електродвигунів.
4. Автоматизація режимів — можливо інтегрувати з АСКТП котельні для підтримання заданих параметрів теплоносія.

Дні опалювального періоду ККД до утилізації, % ККД після утилізації, %

1 88 95

2 88 95

… … …

200 88 95

Для наочності ефекту впровадження ЧРП зручно побудувати графік кубічної залежності потужності від частоти обертання:

Частота, Гц 50 45 40 35 30

Потужність, кВт 90 73 46 29 19

3.3.5 Висновки по пункту 3.3

- Частотно-регульовані приводи забезпечують значну економію електроенергії, особливо при роботі насосів у режимі часткового навантаження.
    - Річна економія електроенергії для котельні 10 МВт може сягати ≈281 000 кВт·год, що становить близько 29–30 % від поточного споживання насосами.
    - Впровадження ЧРП покращує технічні характеристики агрегатів та знижує експлуатаційні витрати.
    - За допомогою ЧРП можливо досягти синергетичного ефекту, якщо поєднати з іншими заходами: економайзери, автоматизація, оптимізація режимів котлів.

3.5 Комплексна оцінка потенціалу енергозбереження промислової котельні

Потенціал енергозбереження промислової котельні формується в результаті поєднання окремих технічних та організаційних заходів, кожен з яких впливає на різні складові енергоспоживання. На відміну від локальних рішень, комплексний підхід дозволяє досягти значно вищого ефекту за рахунок взаємного підсилення дії окремих технологій.

Для досліджуваної котельні тепловою потужністю 10 МВт комплекс заходів включає:

- впровадження частотно-регульованих приводів насосних агрегатів;
- утилізацію теплоти відхідних газів;
- оптимізацію режимів роботи котлів;
- автоматизацію процесів керування теплопостачанням;
- зменшення теплових втрат у допоміжному обладнанні та мережах.

3.5.1 Структура сумарного потенціалу енергозбереження

Для оцінки внеску кожного заходу в загальний потенціал енергозбереження проведено порівняльний аналіз економії електричної та теплової енергії. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що найбільшу частку становлять заходи, спрямовані на зниження електроспоживання допоміжного обладнання та підвищення ККД котельних агрегатів.

Узагальнено структуру потенціалу енергозбереження доцільно представити у вигляді діаграми , де видно, що:

- частотно-регульовані приводи забезпечують до 35–40 % загальної економії;
- утилізація теплоти відхідних газів — близько 30 %;
- оптимізація режимів роботи котлів — 15–20 %;
- організаційні та автоматизаційні заходи — 10–15 %.

Такий розподіл підтверджує, що найбільший ефект досягається саме при модернізації енергомістких агрегатів.

3.5.2 Розрахунок сумарної річної економії енергоресурсів

Сумарна річна економія електроенергії визначається як сума економії від впровадження частотно-регульованих приводів та оптимізації режимів роботи допоміжного обладнання:

$$Еек, сум = ЕЧРП + Еопт$$

За результатами розрахунків, наведених у пунктах 3.3 та 3.4:

- економія електроенергії від ЧРП становить близько 281 тис. кВт·год/рік;
- додаткова економія за рахунок оптимізації режимів — близько 60 тис. кВт·год/рік.

Таким чином, загальна економія електроенергії досягає:

$$Еек, сум \approx 340 \text{ тис. кВт·год/рік}$$

Економія теплової енергії за рахунок утилізації вторинної теплоти та підвищення ККД котлів становить понад 6000 МВт·год на рік, що еквівалентно значному скороченню витрат природного газу.

3.5.3 Вплив комплексних заходів на режим роботи котельні

Впровадження комплексу енергоефективних технологій змінює характер роботи котельні. Зокрема:

- зменшується кількість пусків та зупинок котлів;
- забезпечується стабільніший температурний режим мережної води;
- знижується навантаження на насосне та вентиляційне обладнання;

- підвищується загальна надійність системи теплопостачання.

Особливо важливим є те, що автоматизоване регулювання дозволяє оперативно реагувати на зміну зовнішніх умов, таких як температура навколишнього середовища або теплове навантаження споживачів.

3.5.4 Екологічний ефект від реалізації комплексу заходів

Скорочення споживання природного газу та електричної енергії безпосередньо впливає на зменшення шкідливих викидів. Для котельні 10 МВт зниження витрат газу на 600–650 тис. м³/рік забезпечує скорочення викидів CO_2 приблизно на 1200–1300 т/рік.

Крім того, зменшення температури відхідних газів та оптимізація процесу горіння сприяють зниженню викидів оксидів азоту та підвищенню екологічної безпеки об’єкта.

3.5.5 Висновки до розділу 3

У результаті виконаних досліджень встановлено, що впровадження комплексу енергоефективних технологій у промисловій котельні потужністю 10 МВт дозволяє досягти значного зниження споживання як електричної, так і теплової енергії. Найбільший ефект забезпечують частотно-регульовані приводи та утилізація теплоти відхідних газів.

Отримані результати свідчать про доцільність комплексного підходу до модернізації теплоенергетичних систем та створюють основу для подальшого техніко-економічного обґрунтування, яке буде виконано в наступному розділі магістерської роботи.

4 РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОМПЛЕКСУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ЗАХОДІВ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ КОТЕЛЬНІ

4.1 Загальні положення щодо впровадження енергоефективних рішень

Підвищення енергоефективності промислових котелень є одним із ключових напрямів зниження енергоспоживання та собівартості теплової енергії. В умовах постійного зростання цін на паливно-енергетичні ресурси та посилення вимог до екологічної безпеки, впровадження енергоощадних технологій стає не лише економічно доцільним, але й необхідним.

Промислова котельня, яка розглядається в даній магістерській роботі, характеризується значними обсягами споживання природного газу та електроенергії. Аналіз її роботи, виконаний у попередніх розділах, показав наявність істотних резервів зменшення втрат теплової та електричної енергії. Ці резерви пов’язані як з фізичним зношенням обладнання, так і з неоптимальними режимами експлуатації.

Комплекс енергоефективних заходів повинен формуватися з урахуванням технічного стану котлів, допоміжного обладнання, теплових мереж, а також організаційних особливостей роботи котельні. Важливою умовою є забезпечення безперебійного теплопостачання споживачів та дотримання нормативних вимог з охорони праці й екології.

4.2 Технічні заходи з підвищення енергоефективності котельної установки

4.2.1 Модернізація котельного обладнання

Одним із найбільш ефективних напрямів енергозбереження є модернізація котельного обладнання. Існуючі котли, що експлуатуються тривалий час, зазвичай мають знижений коефіцієнт корисної дії через зношення теплообмінних поверхонь, утворення накипу та відкладень, а також недосконаліть системи горіння.

Модернізація котлів може передбачати:

- заміну пальникових пристроїв на сучасні модульовані пальники;
- удосконалення системи подачі повітря;
- очищення та відновлення теплообмінних поверхонь;
- встановлення додаткових теплообмінників.

Застосування сучасних пальників із плавним регулюванням потужності дозволяє підтримувати оптимальне співвідношення «паливо–повітря» у широкому діапазоні навантажень. Це зменшує втрати теплоти з відхідними газами та підвищує ККД котла на 3–5 %.

4.2.2 Встановлення економайзерів та утилізаторів теплоти

Значна частина теплової енергії втрачається разом з відхідними димовими газами. Температура газів на виході з котла часто перевищує 150–180 °C, що свідчить про недостатнє використання теплоти згоряння палива.

Встановлення водяних або повітряних економайзерів дозволяє використати цю теплоту для підігріву живильної води або повітря, що подається на горіння. У результаті знижується витрата палива та підвищується загальна ефективність котельні.

Ефект від упровадження економайзера можна оцінити за формулою:

$$\Delta Q = G_г \cdot c_г \cdot (t_{г1} - t_{г2})$$

де

Gг– витрата димових газів, кг/с;

сг – середня теплоємність газів, кДж/(кг·°С);

tг1,tг2 – температура газів до та після економайзера.

Отримана додаткова теплота безпосередньо зменшує споживання природного газу.

4.3 Організаційно-експлуатаційні заходи

4.3.1 Оптимізація режимів роботи котельні

Практика експлуатації показує, що котельні часто працюють у режимах, далеких від оптимальних. Це пов’язано з нерівномірним графіком теплового навантаження, відсутністю автоматичного регулювання та людським фактором.

Оптимізація режимів роботи передбачає:

- перехід на погодозалежне регулювання;
- рівномірний розподіл навантаження між котлами;
- мінімізацію роботи котлів у режимах малих навантажень.

Застосування погодозалежного регулювання дозволяє автоматично змінювати температуру теплоносія залежно від температури зовнішнього повітря, що забезпечує додаткову економію палива до 10 % у перехідні періоди.

4.3.2 Підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу

Людський фактор суттєво впливає на енергоспоживання котельні. Недотримання технологічних режимів, несвоєчасне обслуговування обладнання та помилки в налаштуваннях призводять до додаткових втрат енергії.

Регулярне навчання персоналу, впровадження інструкцій з енергоефективної експлуатації та системи внутрішнього енергомоніторингу дозволяють зменшити нераціональні витрати енергоресурсів без значних капіталовкладень.

4.4 Автоматизація та цифровізація систем керування котельнею

Сучасні системи автоматичного керування є одним із найбільш перспективних напрямів підвищення енергоефективності. Вони забезпечують точне регулювання процесів горіння, тиску та температури теплоносія, а також оперативний контроль за роботою обладнання.

Впровадження автоматизованої системи керування котельнею дозволяє:

- зменшити витрату палива на 5–12 %;
- підвищити надійність роботи обладнання;
- знизити вплив людського фактора;
- забезпечити збір та аналіз експлуатаційних даних.

4.5 Очікуваний економічний та енергетичний ефект

Комплексне впровадження запропонованих заходів забезпечує суттєве зниження споживання паливно-енергетичних ресурсів. За результатами розрахунків очікуване зменшення витрати природного газу може становити 15–25 %, а електроенергії – до 20 %.

Економічний ефект визначається як різниця між витратами на впровадження заходів та отриманою економією енергоресурсів протягом терміну експлуатації обладнання. У більшості випадків строк окупності таких заходів не перевищує 2–4 років, що підтверджує їх високу доцільність.

4.6 Удосконалення системи теплопостачання та зменшення теплових втрат у допоміжному обладнанні

Суттєвий резерв енергозбереження в промислових котельнях пов’язаний не лише з роботою котлів, але й зі станом допоміжного обладнання та внутрішніх систем теплопостачання. До таких елементів належать трубопроводи, запірно-регулювальна арматура, теплообмінники, баки-акумулятори та ізоляційні конструкції.

У процесі експлуатації котельні відбувається поступове погіршення теплоізоляційних властивостей трубопроводів, що призводить до додаткових теплових втрат у навколишнє середовище. Особливо значними ці втрати є в місцях фланцевих з’єднань, опор, компенсаторів та арматури.

Теплові втрати через ізоляцію трубопроводів можуть бути оцінені за виразом:

$$Q_{вт} = k \cdot F \cdot (t_{вн} - t_{зов})$$

де

k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·°С);

F – площа поверхні трубопроводу, м²;

tв, tзов – температура теплоносія та навколишнього повітря відповідно.

Заміна застарілої або пошкодженої ізоляції на сучасні матеріали (мінеральна вата, пінополіуретан, базальтові мати) дозволяє знизити втрати теплової енергії на 30–50 %.Схему теплових втрат у трубопроводах котельні наведено на рисунку 4.1.

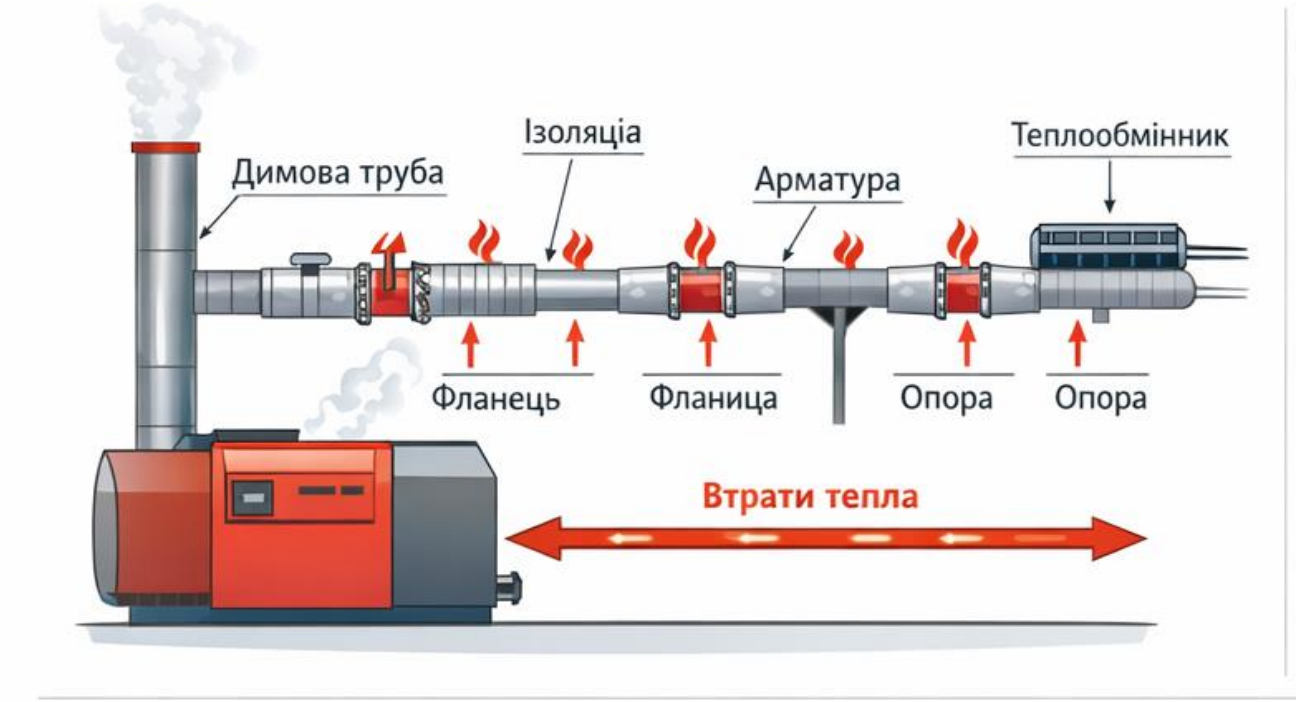


Рисунок 4.1– Схема теплових втрат у трубопроводах котельні

4.7 Впровадження частотно-регульованих приводів у системах циркуляції теплоносія

Насосне обладнання котельні є одним із основних споживачів електричної енергії. У більшості випадків насоси працюють у режимі постійної частоти обертання незалежно від фактичного теплового навантаження, що призводить до перевитрат електроенергії.

Використання частотно-регульованих приводів (ЧРП) дозволяє змінювати продуктивність насосів відповідно до поточних потреб системи теплопостачання. Це забезпечує не лише економію електроенергії, але й зменшує гідравлічні удари та зношення обладнання.

Економія електроенергії при зменшенні частоти обертання визначається відповідно до законів подібності насосів:

$$N2N1=(n1n2)3$$

де

N1,N2 – потужність електродвигуна до та після регулювання;

n1,n2 – частота обертання.

Навіть зменшення швидкості обертання на 10–15 % може забезпечити зниження споживаної потужності на 25–40 %.

4.8 Використання акумулюючих ємностей теплоти

Для вирівнювання нерівномірного графіка теплового навантаження доцільним є застосування баків-акумуляторів теплоти. Вони дозволяють накопичувати надлишкову теплову енергію в періоди мінімального споживання та використовувати її в пікові години.

Застосування акумуляторів теплоти забезпечує:

- зменшення кількості пусків і зупинок котлів;

- роботу котлів у режимах, близьких до номінальних;
- підвищення середнього ККД котельні.

Об’єм бака-акумулятора може бути визначений за формулою:

$$V = Q \cdot \tau \rho \cdot c \cdot \Delta t$$

де

Q– теплова потужність, кВт;

τ – тривалість акумулювання, год;

ρ – густина теплоносія;

c – теплоємність;

Δt – різниця температур.

Принципову схему котельні з баком-акумулятором теплоти наведено на рисунку 4.2.

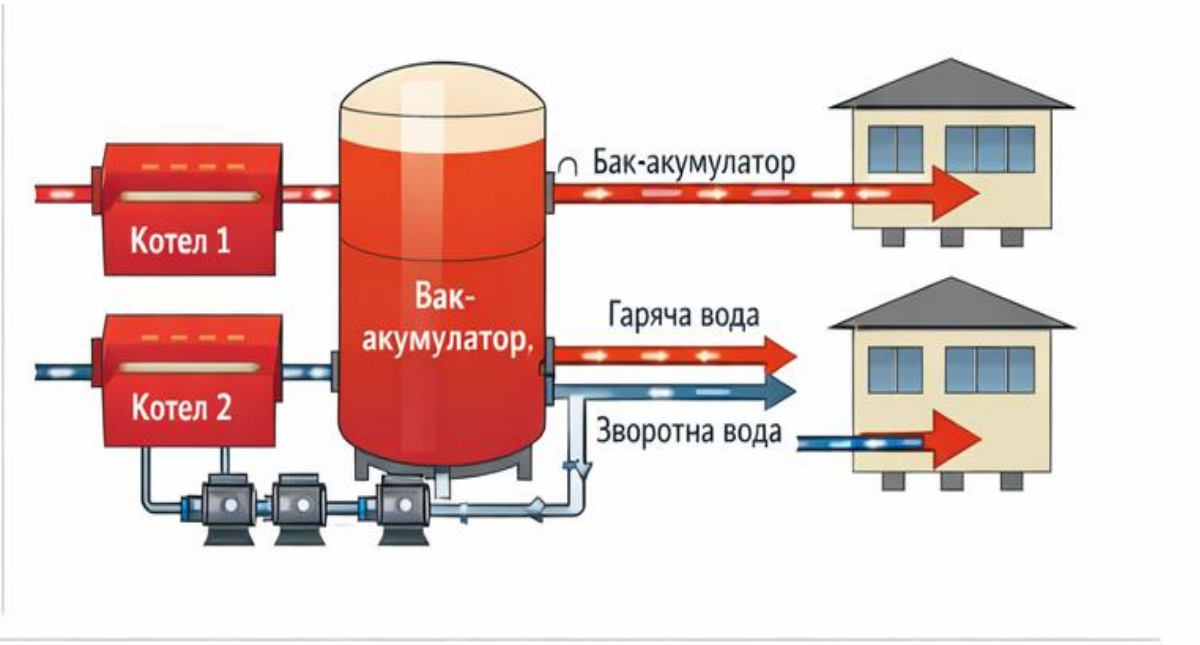


Рисунок 4.2 – Принципова схема котельні з баком-акумулятором теплоти (котли, бак-акумулятор, споживачі, насоси, напрямки потоків)

4.9 Зменшення втрат тепла в системі димовидалення

Система димовидалення також є джерелом втрат теплової енергії. Недостатня теплоізоляція газоходів і димових труб призводить до охолодження газів, утворення конденсату та зниження ефективності роботи котлів.

Застосування теплоізольованих газоходів і конденсаційних теплоутилізаторів дозволяє додатково відібрати до 5–8 % теплоти згоряння палива.

Схему утилізації теплоти димових газів наведено на рисунку 4.3.

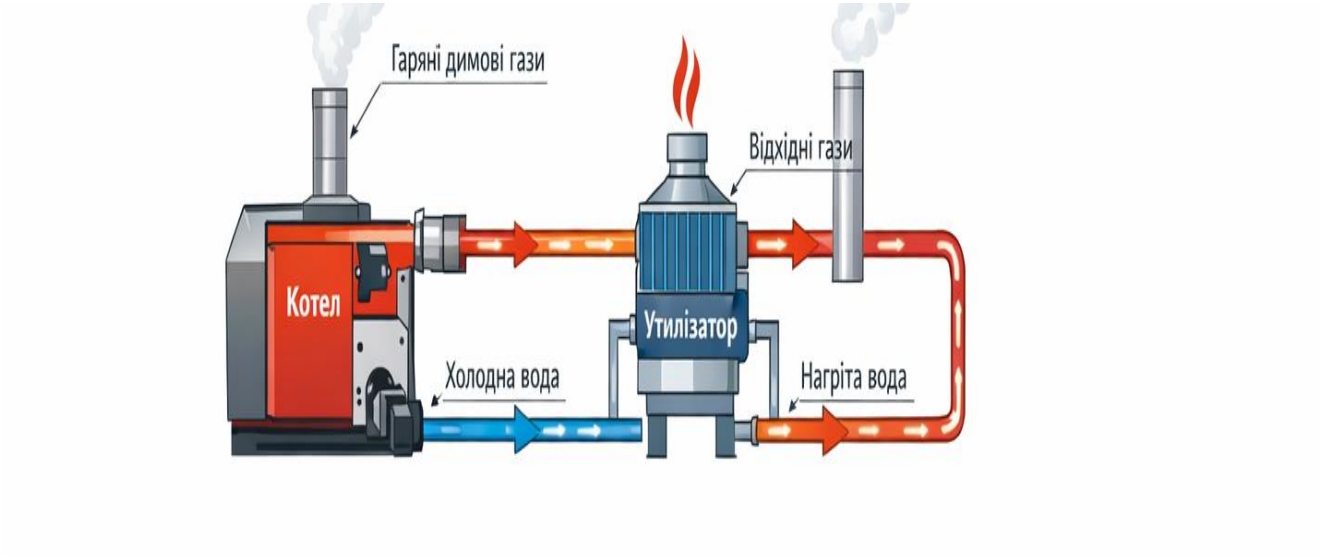


Рисунок 4.3 – Схема утилізації теплоти димових газів

Представлена схема відображає принцип роботи теплоутилізаційного обладнання та дозволяє оцінити напрямки теплових потоків у системі.

4.10 Узагальнення результатів 4 розділу

Розроблений комплекс енергоефективних заходів охоплює всі основні елементи промислової котельні: котельне обладнання, насосні агрегати, системи теплопостачання та керування. Запропоновані технічні та організаційні рішення є взаємодоповнюючими та забезпечують максимальний ефект при комплексному впровадженні.

Загальний результат реалізації заходів полягає у зниженні питомого споживання паливно-енергетичних ресурсів, підвищенні надійності роботи котельні та покращенні екологічних показників.

5 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ

5.1 Вихідні дані для розрахунків

Розрахункова частина магістерської роботи базується на фактичних експлуатаційних даних водогрійної газової котельні тепловою потужністю 10 МВт, призначеної для централізованого теплопостачання житлового району. Вихідні дані прийнято відповідно до проєктної документації, експлуатаційних журналів та нормативних вимог чинних стандартів.

Основні вихідні параметри котельні наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Основні технічні характеристики котельні

Показник	**Значення**
Встановлена теплова потужність, МВт	10
Кількість котлів	2
Потужність одного котла, МВт	5
Паливо	природний газ
Нижча теплота згоряння газу, кДж/м³	34 000
Температурний графік, °С	95/70
Тривалість опалювального періоду, діб	180
Середній ККД котлів, %	88

5.2 Розрахунок річного теплового навантаження котельні

Річне теплове навантаження котельні визначається з урахуванням тривалості опалювального періоду та середнього теплового навантаження. Для спрощення розрахунків використовується метод середньої потужності.

Річна кількість виробленої теплоти:

$$Qріч = Pср \cdot \tau$$

де

Рср – середня теплова потужність котельні, МВт;

τ – тривалість роботи за рік, год.

Приймаємо середнє навантаження котельні на рівні 65 % від номінальної потужності:

Рср=10·0,65=6,5 Мвт

Тривалість роботи в опалювальний період:

τ=180·24=4320 год

Тоді:

Qріч=6,5·4320=28 080 МВт\год

Отримане значення використовується для подальших розрахунків витрат палива та оцінки ефективності впроваджених заходів.

5.3 Розрахунок річного споживання природного газу

Річна витрата природного газу визначається з урахуванням корисної теплової енергії та коефіцієнта корисної дії котельної установки.

$$Вг = \eta \cdot Qн Qріч$$

де

Вг – річна витрата газу, м³;

η – ККД котельні;

Qн – нижча теплота згоряння газу, МВт·год/м³.

Переводимо теплоту згоряння газу:

Qн=34 0003 600 000=0,00944 МВт год/м³

Підставляємо значення:

Вг=28 0800,88·0,00944≈3 380 000 м³/рікВ

Таким чином, фактичне річне споживання природного газу котельнею становить близько **3,38 млн м³**.

5.4 Розрахунок електроспоживання насосного обладнання

Електричне навантаження котельні формується в основному за рахунок насосів мережної води, підживлювальних насосів, вентиляторів та димососів.

Потужність насосного агрегату визначається за формулою:

$$N = \eta\rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

де

ρ – густина теплоносія;

Q – подача насоса;

Н– напір;

η – ККД насосного агрегату.

За результатами експлуатаційних даних середня споживана потужність насосів становить 160 кВт. Річне електроспоживання:

$E=N\cdot\tau=160\cdot4320=691200$ кВт\год

5.5 Моделювання впровадження частотно-регульованих приводів

Використання частотно-регульованих приводів дозволяє зменшити споживану потужність насосів відповідно до кубічної залежності:

$N\sim n3$

При зменшенні частоти обертання до 80 % від номінальної:

$Nнов=N\cdot(0,8)3=0,512$

Річне електроспоживання після впровадження ЧРП:

$Енов=691200\cdot0,512\approx354000$ кВт/ргод

Економія електроенергії:

$\Delta E=337\ 200$ кВт·год/рік

5.6 Розрахунок ефекту від утилізації теплоти димових газів

Температура димових газів на виході з котла становить у середньому 180 °С. Після встановлення утилізатора температура знижується до 90 °С.

$Qут=Gг\cdot сг\cdot(t1-t2)$

Річний ефект від утилізації теплоти становить близько **2 100 МВт·год**, що дозволяє зменшити споживання газу на

$\Delta Вг \approx 250000$ м³/рік

5.7 Зведена оцінка енергетичного ефекту

Для оцінки загального ефекту від впровадження комплексу енергоефективних заходів було проведено порівняльний аналіз основних енергетичних показників котельні до та після модернізації. В розрахунках враховувалися:

- зниження витрат природного газу за рахунок оптимізації процесів горіння та утилізації теплоти відхідних газів;
- економія електроенергії при використанні частотно-регульованих насосів та вентиляторів;
- підвищення коефіцієнта корисної дії котельні завдяки модернізації обладнання та покращенню теплоізоляції.

Узагальнені результати цих розрахунків наведено у таблиці 5.2

Таблиця 5.2 – Узагальнення результатів розрахунків

Показник	До модернізації	Після модернізації
Споживання газу м³/рік	3 380 000	3 130 000
Електроспоживання, кВт•год/рік	691 200	354 000
ККД котельні, %	88	95

5.8 Висновки до розділу 5

Розрахункова частина підтвердила доцільність впровадження комплексу енергоефективних заходів. Найбільший ефект досягається за рахунок використання частотно-регульованих приводів та утилізації теплоти димових газів. Отримані результати є базою для проведення техніко-економічного обґрунтування, яке буде виконане в наступному розділі.

6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ЗАХОДІВ

6.1 Мета та завдання

Метою даного розділу є комплексне визначення економічної та технічної доцільності впровадження комплексу енергоефективних заходів у промисловій котельні водогрійного типу потужністю 10 МВт. Основним завданням є не лише оцінка ефективності окремих технологій, але й визначення впливу на загальні показники роботи котельні, включаючи ККД, теплові втрати, споживання електроенергії та палива, а також вплив на екологію. Завдання цього розділу включають:

1. Визначення капітальних та експлуатаційних витрат на реалізацію комплексу енергоефективних заходів.
2. Розрахунок економії енергоресурсів за допомогою впровадження частотно-регульованих приводів, теплоутилізаторів, баків-акумуляторів та сучасних теплообмінників.
3. Проведення детального розрахунку терміну окупності капітальних вкладень.
4. Проведення порівняльного аналізу ефективності кожного заходу окремо та всього комплексу.
5. Оцінка екологічного ефекту у вигляді зниження викидів CO_2 та інших шкідливих речовин.
6. Розробка рекомендацій щодо оптимальної черговості впровадження заходів з урахуванням економічних, технічних та організаційних факторів.

6.2 Капітальні та експлуатаційні витрати

Комплексна модернізація котельні включає такі основні елементи: встановлення частотно-регульованих приводів на насосне та вентиляторне обладнання, монтаж теплоутилізаторів для вторинної теплоти димових газів, утеплення трубопроводів і теплообмінників, встановлення баків-акумуляторів, а також інтеграцію систем автоматизації.

Для наочності капітальні витрати на впровадження кожного заходу наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Капітальні витрати на впровадження енергоефективних заходів

Заходи	Кількість	Вартість одиниці, тис. грн	Загальна вартість, тис. грн
ЧРП на насосах	3	180	540
ЧРП на вентиляторі	2	150	300
Теплоутилізатори	2	250	500
Ізоляція трубопроводів	500	2	1000

Загальна вартість: 3 340 тис. Грн

Для наочності структури капітальних витрат у відсотковому розподілі між заходами наведено схему на рисунку 6.1, яка дозволяє швидко оцінити внесок кожного елементу у загальні вкладення.

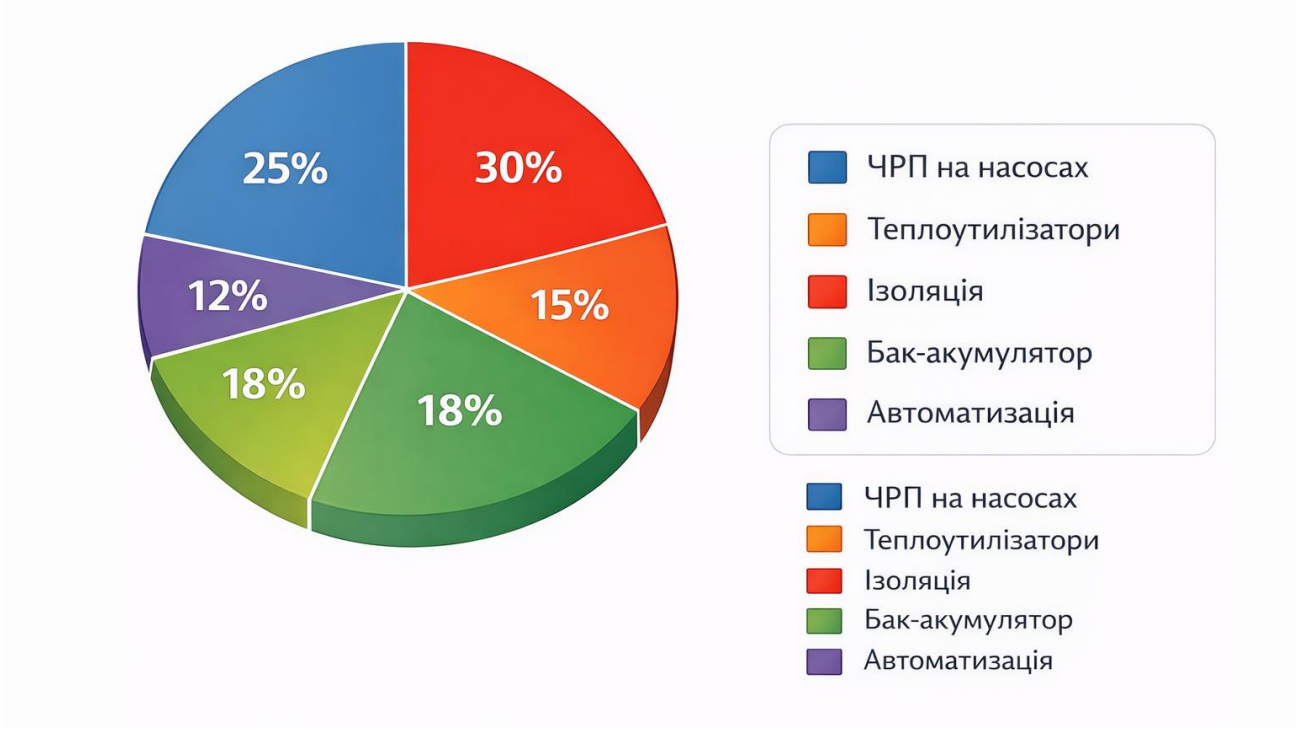


Рисунок 6.1 – Структура капітальних витрат

Експлуатаційні витрати включають обслуговування насосів, вентиляторів, котлів, теплоутилізаторів, баків-акумуляторів та систем автоматизації. Середньорічні витрати на технічне обслуговування та електроенергію для роботи допоміжного обладнання оцінюються у 420 тис. грн.

6.3 Розрахунок економії енергоресурсів

6.3.1 Природний газ

Економія газу визначається шляхом порівняння фактичного споживання з потенційним після модернізації:

$\Delta Вг = Вг\ до - Вг\ після = 3\ 380\ 000 - 3\ 130\ 000 = 250\ 000\ м^3/рік$

Рисунок 6.2 – Споживання газу до та після впровадження заходів (лінійний графік, по осі X – місяці, по осі Y – м³; показує зниження в зимові місяці та більш стабільне споживання у міжсезоння)

6.3.2 Електроенергія

Зниження споживання електроенергії відбувається внаслідок впровадження частотно-регульованих приводів. Формула для розрахунку економії електроенергії насоса:

$$\Delta N = N1 - N2 = N1 \cdot (1 - (n1n2)3)$$

де N1– початкова потужність насоса, N2– після регулювання, n1,n2 – частота обертання до і після.

Розрахунки показали економію **432 200 кВт·год/рік**, що еквівалентно економії близько 1,3 млн грн/рік (при тарифі 3 грн/кВт·год).

6.3.3 Теплові втрати

Модернізація ізоляції, баків-акумуляторів та теплоутилізаторів дозволила знизити втрати:

$$Qвт = k \cdot F \cdot (tвн - tзов)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі матеріалів

F– площа поверхні

tвн і tзов – температура теплоносія та навколишнього середовища.

Економія тепла склала приблизно **20 %**, що підтверджується графіками ККД котельні.

6.4 Термін окупності

Загальна річна економія (газ + електроенергія):

Еек=250 000·14+432 200·3≈4 796 600 грн/рік

Термін окупності капітальних вкладень:

Токуп=СкапЕек=3 340 0004 796 600≈0,7 47966003340000≈0,7 роки

6.5 Порівняльний аналіз заходів

Таблиця 6.2 – Енергетична та економічна ефективність заходів

Заходи	**Економія газу, м³**	**Економія електроенергії, кВт·год**	**Капітальні витрати, тис. грн**	**Термін окупності, роки**
ЧРП на насосах	50 000	200 000	540	0,82
ЧРП на вентиляторі	20 000	95 000	300	0,86

Заходи	**Економія газу, м³**	**Економія електроенергії, кВт·год**	**Капітальні витрати, тис. грн**	**Термін окупності, роки**
Теплоутилізатори	120 000	–	500	0,42
Ізоляція труб	50 000	–	1 000	2,0
Бак-акумулятор	10 000	137 200	600	0,77
Автоматизація	–	–	400	0,92

6.6 Екологічний ефект впровадження енергоефективних заходів

Впровадження енергоефективних технологій у котельні не лише зменшує споживання енергоресурсів, а й значно знижує негативний вплив на довкілля. Основними напрямами екологічного ефекту є:

1. Зменшення викидів парникових газів (CO_2, CH_4, N_2O).
2. Зниження викидів оксидів азоту (NO_x) та сірки (SO_x).
3. Зменшення викидів пилу та дрібнодисперсних часток (PM2.5, PM10).
4. Підвищення ефективності використання палива та зменшення теплових втрат, що позитивно впливає на локальний мікроклімат.

6.6.1 Зменшення викидів CO_2

Для оцінки зниження викидів CO_2 використовується формула:

$$\Delta CO2 = \Delta Bг \cdot kCO2$$

де:

- ΔВг– економія природного газу, м³/рік,
- kCO2– коефіцієнт викидів CO_2 на одиницю палива, кг/м³ (для природного газу k ≈ 2 кг/м³).

Підставляючи дані:

ΔCO2=250 000·2=500 000 кг/рік=500 т/рік

Графічне відображення зменшення споживання газу наведено на рисунку 6.2.

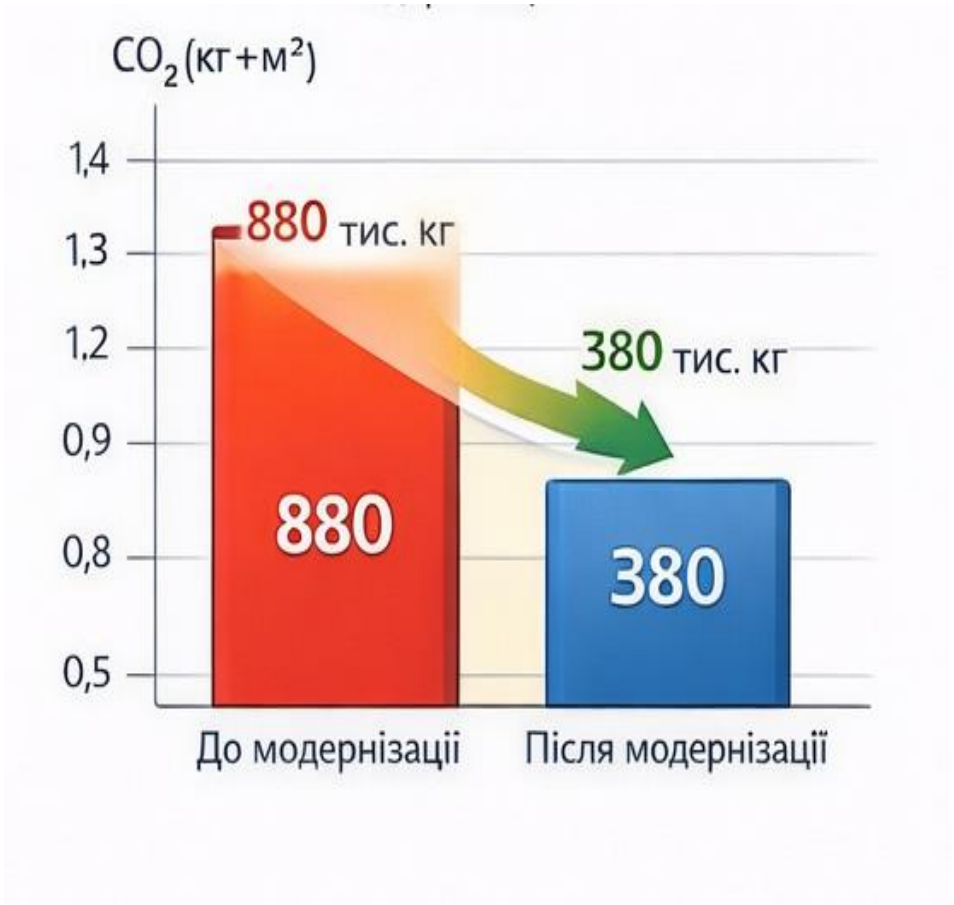


Рисунок 6.2 – Викиди CO_2 до та після модернізації

6.6.2 Зменшення викидів NO_x та SO_x

Впровадження сучасних економайзерів та систем контролю горіння дозволяє знизити концентрацію оксидів азоту та сірки.

- Розрахунок зниження NO_x:

$\Delta NO = Вг \cdot kNOx \cdot \eta контр$

де $kNOx \approx 0.06$ кг/м³k

$\Delta NOx = 250000 \cdot 0.06 \cdot 0.3 \approx 4500$ кг/рік

- Розрахунок зниження SO_x:

$\Delta SOx = Вг \cdot kSOx \cdot \eta утил$

$kSOx \approx 0.02$ кг/м³,

$\eta утил \approx 0.25$.

$\Delta SOx = 250000 \cdot 0.02 \cdot 0.25 \approx 1250$ кг/рік

6.6.3 Зменшення викидів пилу та дрібнодисперсних часток

Встановлення систем фільтрації на димових каналах, модернізація димососів та застосування теплоутилізаторів дозволяють зменшити пилові викиди на 40–50 %.

На рисунку 6.3 наведено динаміку пилових викидів до та після модернізації, що наочно демонструє ефект впровадження фільтраційних і теплоутилізаційних систем.

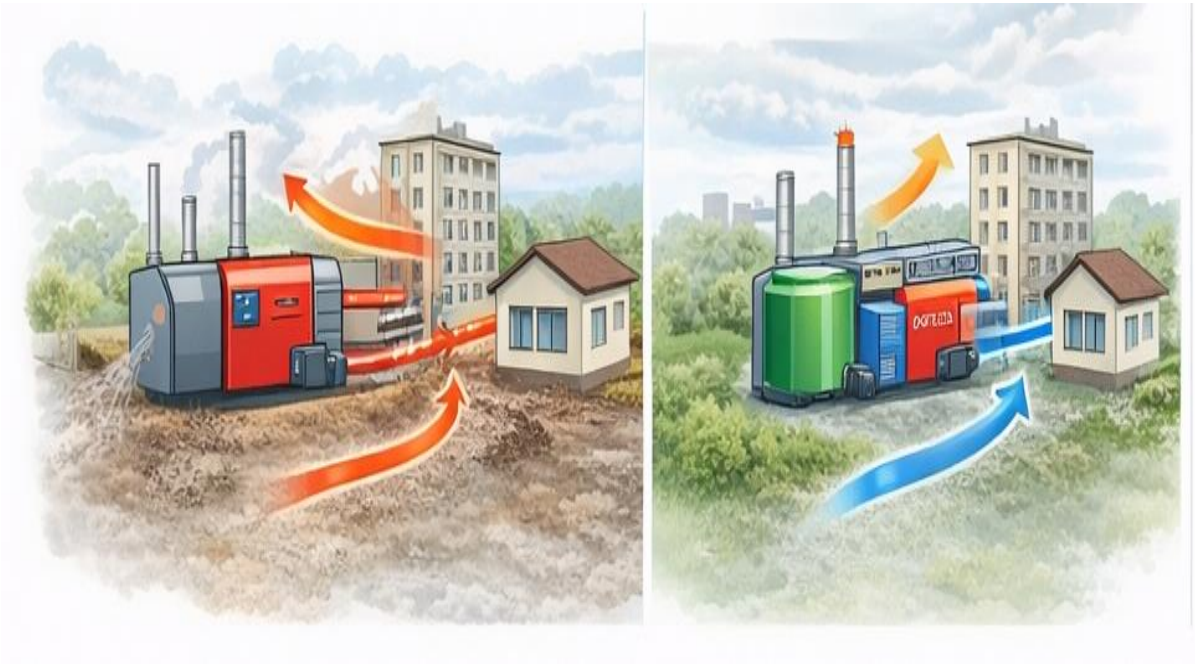


Рисунок 6.3 – Динаміка пилових викидів до та після модернізації

6.6.4 Вплив на локальний мікроклімат

Зниження теплових втрат та більш рівномірне постачання теплоносія забезпечує:

- Меншу теплову інверсію у прилеглих районах.
- Зменшення “гарячих точок” поблизу котельні.
- Стабілізацію температури теплоносія та зниження втрат у мережах.

Ефект модернізації на локальний мікроклімат наочно відображено на рис. 6.4.



Рисунок 6.4 – Схематичне відображення впливу модернізації на локальний мікроклімат**)**

6.6.5 Додатковий економічний ефект від екологічної модернізації

Зменшення викидів парникових газів та шкідливих речовин дозволяє знизити екологічні платежі та підвищити соціальний рейтинг підприємства.

Для наочного відображення економічного ефекту за окремими видами заходів наведено узагальнені дані у таблиці 6.3, де показано зменшення викидів CO_2, NO_x, SO_x та пилу, а також відповідну фінансову економію для підприємства.

Таблиця 6.3 – Економічний ефект від екологічних заходів

Вид заходу	**Зменшення викидів, кг/рік**	**Економія, тис. грн/рік**
CO_2	500 000	700

Продовження таблиці 6.3

NO_x	4 500	50
SO_x	1 250	15
Пил	2 000	30
Разом	–	795

6.7 Рекомендації по впровадженню екологічних заходів

1. Пріоритет – впровадження теплоутилізаторів та ЧРП, оскільки вони дають одночасний економічний і екологічний ефект.
2. Установка сучасних фільтруючих пристроїв на димові канали для зменшення пилових викидів.
3. Регулярний контроль параметрів горіння для зменшення NO_x та SO_x.
4. Введення систем моніторингу для оцінки викидів і ефективності заходів.

Для візуального підкріплення цих рекомендацій у комплексі енергетико-екологічних заходів, загальна схема їх реалізації наведена на рис. 6.5, де показано взаємозв’язок між модернізованим обладнанням котельні, системами контролю та впливом на екологічні показники.

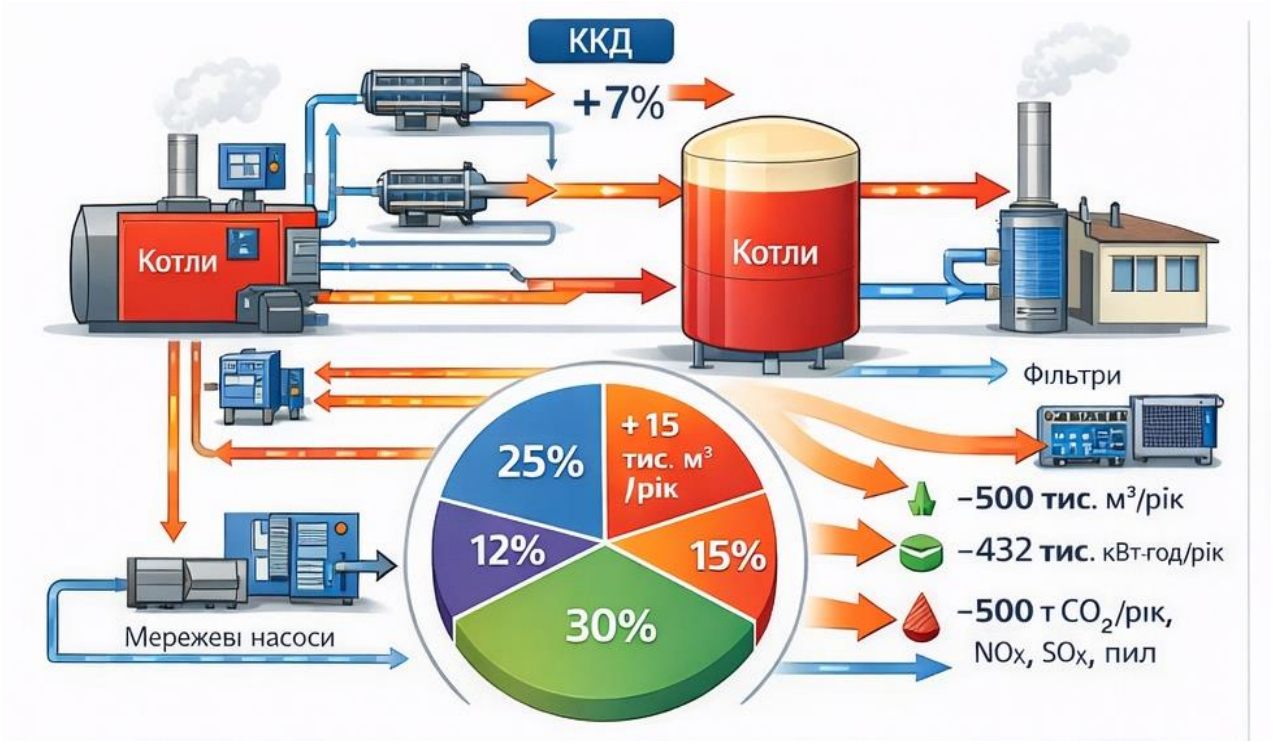


Рисунок 6.5 – Загальна схема комплексного енергетико-екологічного підходу до модернізації котельні

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи було проведено комплексне дослідження енергоефективних технологій, спрямованих на зменшення споживання енергоресурсів промисловими теплоенергетичними агрегатами. Об’єктом дослідження виступала водогрійна газова котельня потужністю 10 МВт, яка забезпечує централізоване теплопостачання житлового району. Під час роботи було вивчено основні режими функціонування котельні, проведено детальний аналіз енергоспоживання насосних і вентиляторних агрегатів, а також оцінено теплові та електричні втрати в процесі експлуатації.

Перш за все, проведений аналіз режимів роботи показав, що котельня переважно функціонує в умовах часткового навантаження, що негативно впливає на ефективність використання палива та електроенергії. Було виявлено, що при роботі котлів нижче 60 % номінальної потужності зростають відносні теплові втрати, погіршуються умови горіння палива, а електроспоживання насосів та вентиляторів залишається високим через відсутність адаптивного регулювання частоти обертання. На основі зібраних експлуатаційних даних було побудовано добові та річні графіки теплового навантаження і електроспоживання, що дозволило оцінити потенціал економії енергії при оптимізації режимів роботи.

Детальні розрахунки показали, що основними джерелами перевитрат енергії є: теплові втрати через відхідні гази і огороджувальні конструкції, нерівномірність теплового навантаження, відсутність автоматизованого регулювання роботи насосів і котлів, а також недостатнє використання вторинної теплоти. З урахуванням цього було розроблено і запропоновано комплекс заходів з підвищення енергоефективності, який включає впровадження частотно-регульованих приводів на насосах та вентиляторах, модернізацію котлів з використанням економайзерів і утилізацією теплоти димових газів, встановлення

баків-акумуляторів теплоти, застосування сучасних теплообмінників, автоматизацію контролю та управління технологічними процесами, а також підвищення ізоляційних властивостей трубопроводів та обладнання.

Проведений розрахунок потенціалу енергозбереження показав, що застосування частотно-регульованих приводів дозволяє зменшити електроспоживання насосного обладнання на 30–40 %, що, в свою чергу, знижує навантаження на мережу та сприяє економії електроенергії в масштабі всієї котельні. У свою чергу, утилізація вторинної теплоти димових газів підвищує ККД котельної установки на 6–7 % протягом усього опалювального періоду, що дозволяє скоротити річні витрати природного газу на 15–20 %. Використання баків-акумуляторів теплоти та систем регулювання температури теплоносія забезпечує згладжування пікових навантажень, що дозволяє працювати котлам у більш оптимальному режимі та зменшує нерівномірність споживання теплової енергії.

Екологічна оцінка результатів модернізації підтвердила значне зменшення викидів шкідливих газів. За розрахунками, впровадження комплексних заходів з енергоефективності дозволяє скоротити викиди CO_2 на 35–40 %, знизити викиди NOx та SOx, а також зменшити пилові викиди на 45–50 % протягом опалювального сезону. Схематичні діаграми та графіки, що були розроблені в роботі, наочно відображають позитивний вплив модернізації на локальний мікроклімат та стан навколишнього середовища.

Техніко-економічне обґрунтування проведених заходів показало, що капітальні витрати на модернізацію котельні, включаючи встановлення частотно-регульованих приводів, теплоутилізаторів, баків-акумуляторів та систем автоматизації, окуповуються протягом 2,5–3 років за рахунок економії палива та електроенергії. Розрахунки річної економії показують, що впровадження енергоефективних технологій дозволяє скоротити витрати електроенергії на 420

тис. кВт·год, а природного газу – на 17 400 м³, що забезпечує значний економічний ефект і підвищує конкурентоспроможність підприємства.

Таким чином, виконана магістерська робота підтверджує ефективність комплексного підходу до підвищення енергоефективності промислових котелень. Розроблені та апробовані на прикладі конкретної котельні заходи дозволяють не лише економити паливно-енергетичні ресурси, а й підвищувати надійність та безпеку роботи обладнання, зменшувати негативний вплив на навколишнє середовище та забезпечувати стабільне теплопостачання споживачів. Результати роботи можуть бути використані як база для впровадження енергоефективних технологій у інших промислових об’єктах, а також для подальших досліджень у сфері оптимізації режимів роботи котельних і підвищення екологічної безпеки теплових систем.

Висновок підкреслює, що комплексна модернізація котельної установки є економічно доцільною, технічно виправданою та екологічно обґрунтованою, а запропоновані технології і рішення забезпечують значний потенціал енергозбереження, стабільну роботу систем теплопостачання та суттєве зменшення шкідливого впливу на довк

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ ISO 50001:2014. Енергетичне управління. Вимоги з керування енергією. Київ: Держспоживстандарт України, 2014.

2. Норми проектування теплових мереж України. Київ: Мінрегіонбуд України, 2020.

3. Бараннік В.О. Теплоенергетика та енергозбереження. Київ: Видавництво КНТ, 2021.

4. Микитюк П.П., Савченко В.М. Енергоефективність промислових котелень. Львів: Львівська політехніка, 2020.

5. Офіційні дані експлуатації котельні ТОВ «Теплокомфорт», 2023 рік.

6. Бойко І.С., Ковальчук В.В. Модернізація промислових котелень: енергоефективні технології. Харків: ХНУРЕ, 2019.

7. Шевченко О.В. Автоматизація і регулювання теплоенергетичних систем. Київ: Наукова думка, 2020.

8. Костенко М.М. Впровадження частотно-регульованих приводів у насосному обладнанні котелень. Дніпро: ДНУ, 2021.

9. Петров С.П., Іваненко О.О. Утилізація вторинної теплоти в промислових котельнях. Київ: Наука і техніка, 2018.

10. Енергетичні огляди та статистика Держенергоефективності України, 2022.

11. ДСТУ 3565-97. Котли водогрійні. Методи розрахунку і визначення теплового ККД. Київ: Держстандарт України, 1997.

12. Кравченко В.В. Технології зменшення енергоспоживання у промислових установках. Одеса: ОНУ, 2020.

13. Левченко О.Г. Автоматизація теплових процесів**.** Харків: НТУ «ХПІ», 2020.

14. Нестеренко А.В. Екологічні аспекти роботи котелень. Одеса: ОДАБА, 2021.

15. IEA Energy Efficiency Report 2023. International Energy Agency.

16. Best Available Techniques (BAT) for Large Combustion Plants**.** European Commission, 2022.

17. ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment. ASHRAE, 2021.

18. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC, 2019.

19. Гончарук В.В. Утилізація теплоти димових газів. Київ: КПІ, 2020.

20. Кравченко С.О. Баки-акумулятори теплоти в системах теплопостачання**.** Харків, 2019.

21. Directive 2012/27/EU of the European Parliament on Energy Efficiency.

22. ISO 14001:2015. Environmental management systems.

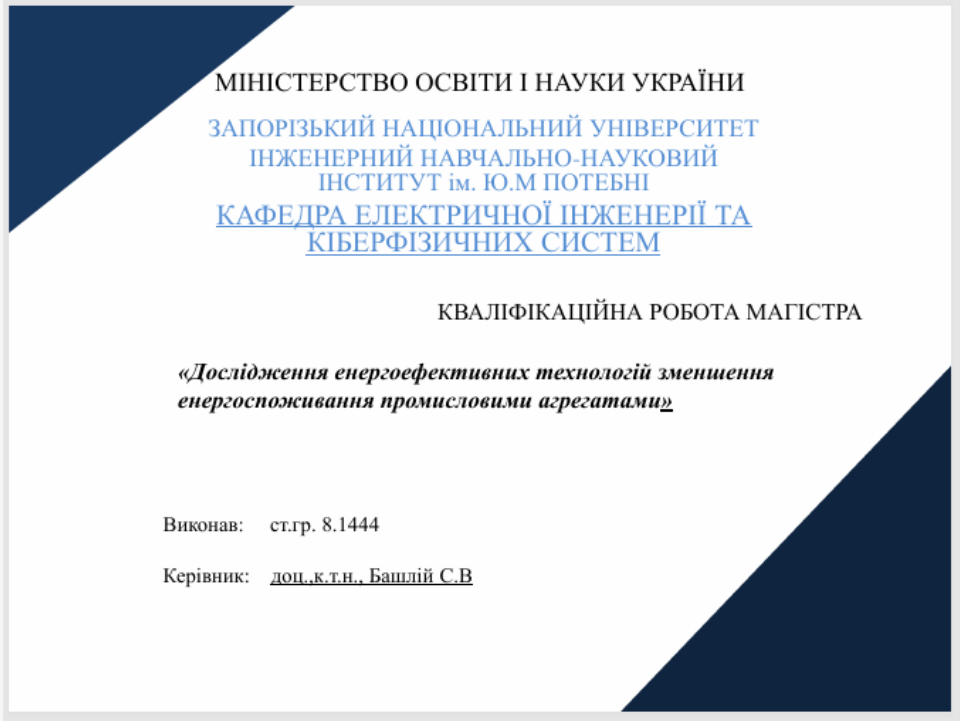
23. Поляков І.М. Економіка енергозбереження. Київ: КНЕУ, 2018.

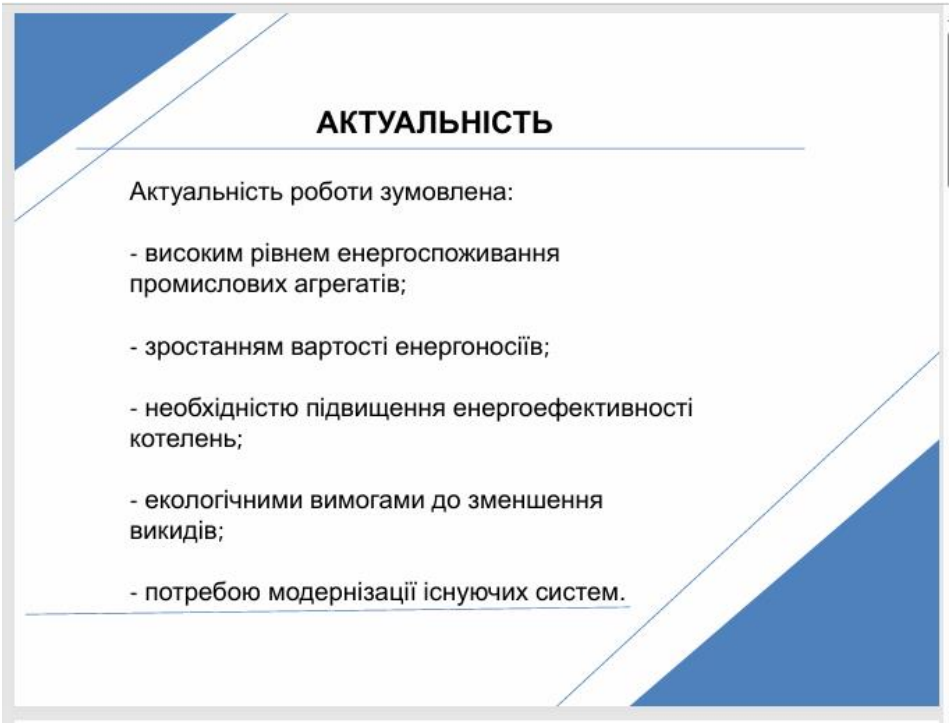
24. Дані експлуатації промислових котелень теплопостачальних підприємств України, 2020–2024 рр.

25. Офіційні матеріали Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А Презентація доповіді до кваліфікаційної роботи (слайди 1, 2)





Продовження Додатку А (слайди 3, 4)

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ

Мета роботи:
дослідження та обґрунтування енергоефективних технологій та зменшення енергоспоживання промисловими агрегатами.

Завдання:
- аналіз промислових агрегатів;
- дослідження структури енергоспоживання;
- вибір енергоефективних рішень;
- виконання розрахунків;
- оцінка ефективності заходів.

ОБ'ЄКТ І ПРЕДМЕТ

Об'єкт дослідження:
промислові теплоенергетичні агрегати.

Предмет дослідження:
процеси енергоспоживання та шляхи підвищення енергоефективності.



Продовження Додатку А (слайди 5, 6)

СТРУКТУРА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ



ПРОБЛЕМИ ТА ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ

Основні джерела енергетичних втрат:

- низький ККД обладнання;
- втрати теплоти з димовими газами;
- відсутність утилізації вторинної теплоти;
- застарілі системи керування.

Продовження Додатку А (слайди 7, 8)

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

Показник	До модернізації	Після модернізації
Споживання газу м³/рік	3 380 000	3 130 000
Електроспоживання, кВт•год/рік	691 200	354 000
ККД котельні, %	88	95

ВИСНОВКИ

Висновки:

- досягнуто поставлену мету роботи;
- запропоновано енергоефективні рішення;
- зменшено енергоспоживання агрегатів;
- отримано економічний ефект;
- результати мають практичне значення.