

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Інститут:** Навчально-науковий інженерно-технічний інститут  
ім. акад. І.С.Гуло

**Кафедра:** Теплоенергетики та холодильної техніки

«До захисту в ЕК»

Директор інституту

\_\_\_\_\_ Сергій БЛАЖЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Валентин ПЕТРЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024р .

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності \_\_\_\_\_ 144 Теплоенергетика  
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Теплоенергетика та енергоефективні технології

на тему: Використання амонійних сполук для зниження викидів забруднюючих речовин в твердопаливному котлі

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ТЕ-1-10М

\_\_\_\_\_ Нерус Анатолій Анатолійович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ Бойко Володимир Олександрович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

Я, як здобувач Національного університету харчових технологій, розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2024 р.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім.акад. І.С. Гулого

Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 144 Теплоенергетика

(код і назва)

Освітньо-професійна програма Теплоенергетика та енергоефективні технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ТЕХТ**

**проф. Петренко В.П.**

“1” жовтня 2024 року

## **З А В Д А Н Н Я**

### **НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА**

Неруса Анатолія Анатолійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Використання амонійних сполук для зниження викидів забруднюючих речовин в твердопаливному котлі

керівник роботи: к.т.н., доц. Бойко Володимир Олександрович

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

затвержені наказом закладу вищої освіти від “1”10.2024 року № 859-к

2. Строк подання здобувачем роботи 02.12.2024 року

3. Вихідні дані до роботи:

матеріали переддипломної практики

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

**ВСТУП**

**1. УТВОРЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В**

**ТВЕРДОПАЛИВНОМУ КОТЛІ.**

**2. ТЕХНОЛОГІЇ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДУ АЗОТУ**

**3. ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ СНКВ В ТВЕРДОПАЛИВНОМУ**

**КОТЛІ CR800DSS-V LN**

**ВИСНОВКИ**

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

5. Перелік графічного матеріалу

презентація Power Point (слайди)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання: 1.10.2024

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
	УТВОРЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В ТВЕРДОПАЛИВНОМУ КОТЛІ	1.10-21.10.24	Виконано
	ТЕХНОЛОГІЇ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДУ АЗОТУ	22.10-25.10.24	Виконано
	ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ СНКВ В ТВЕРДОПАЛИВНОМУ КОТЛІ CR800DSS-V LN	04.11-18.11.24	Виконано
	Оформлення роботи	19.11-25.11.24	Виконано
	Підготовка презентації в Power Point	26.11-2.12.24	Виконано

**Здобувач** \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Нерус А. А.**  
(прізвище та ініціали)

**Керівник роботи** \_\_\_\_\_  
(підпис)

**доцент Бойко В.О.**  
(прізвище та ініціали)

## Зміст

ІНФОРМАЦІЙНИЙ БЛОК	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
АНОТАЦІЯ	7
ВСТУП	9
1. УТВОРЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В ТВЕРДОПАЛИВНОМУ КОТЛІ	11
2. ТЕХНОЛОГІЇ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДУ АЗОТУ	12
2.1. ПРОЦЕСИ ХІМІЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ	13
2.2. СЕЛЕКТИВНЕ КАТАЛІТИЧНЕ ТА СЕЛЕКТИВНЕ НЕКАТАЛІТИЧНЕ ВІДНОВЛЕННЯ	15
2.3. ВИДИ РЕАГЕНТІВ У СНКВ	29
2.4. ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ПРИ ЗАСТОСУВАННІ АМОНІЙНОЇ ВОДИ	39
2.5. СХЕМИ СНКВ-УСТАНОВОК	41
3. ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ СНКВ В ТВЕРДОПАЛИВНОМУ КОТЛІ CR800DSS-V LN	44
3.1 ОПИС ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОТЛА	44
3.2 СХЕМА DENOX ВИЛУЧЕННЯ NOX В ТВЕРДОПАЛИВНОМУ КОТЛІ CR800DSS-V LN	47
3.3 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ	53
ВИСНОВКИ	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	56

## **ІНФОРМАЦІЙНИЙ БЛОК**

### **Актуальність дослідження.**

Підписання Угоди про асоціацію в 2014 році стало поштовхом для України до впровадження європейських екологічних стандартів. Це означає, що українська промисловість має модернізуватися і зменшувати шкідливі викиди, відповідно до Директиви 2010/75/ЄС та Національного плану скорочення викидів.

Зменшення викидів оксидів азоту є одним з пріоритетних завдань у галузі охорони довкілля. Оскільки кількість цих шкідливих речовин залежить від багатьох факторів, пов'язаних з процесом спалювання палива, необхідно проводити комплексні дослідження та розробляти ефективні технології для зниження викидів. Особлива увага повинна приділятися цьому питанню на стадії проектування та модернізації енергетичних установок.

### **Зв'язок дослідження роботи з науковими програмами.**

Робота виконана відповідно плану НДР кафедри ТЕХТ НУХТ на 2024 р.

### **Мета дослідження.**

Впровадження технологій зменшення викидів оксидів азоту на існуючому твердопаливном котлі з метою досягнення відповідності екологічним нормам.

### **Завдання дослідження.**

Оцінка можливості впровадження технологій зменшення викидів оксидів азоту на існуючому твердопаливном котлі з метою досягнення відповідності екологічним нормам.

### **Об'єкт дослідження.**

Механізм утворення оксидів азоту при горінні твердих палив

### **Предмет дослідження.**

Забруднюючі речовини димових газів твердопаливного водогрійного котла.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Результати дослідження слугуватимуть підставою для розробки проекту реконструкції твердопаливного водогрійного котла з метою зниження викидів забруднюючих речовин.

### **Особистий внесок магістранта.**

Магістрант особисто провів аналіз можливих варіантів очистки димових газів від викидів забруднюючих речовин та запропонував для застосування один із них.

### **Публікації.**

За матеріалами даного дослідження відсутні публікації автора.

### **Структура магістерської роботи.**

Магістерська робота складається із вступу, 3 розділів, висновків. Повний обсяг роботи становить 58 стор. Робота містить 3 таблиці та 23 рисунки.

## АНОТАЦІЯ

Мета дослідження полягала у впровадженні ефективної технології очищення димових газів від оксидів азоту для досягнення екологічних стандартів.

У рамках дослідження було здійснено комплексний аналіз сучасних методів зниження викидів оксидів азоту, включаючи детальний огляд технологій селективного некаталітичного відновлення (SNCR). Було проведено порівняльне оцінювання ефективності різних реагентів, що використовуються в процесі SNCR, з урахуванням їхніх екологічних та економічних характеристик.

**Ключові слова:** водогрійний котел, тверде паливо, очищення димових газів, оксид азоту, селективне некаталітичне відновлення.

## ABSTRACT

The goal of the research was to implement an effective technology for cleaning flue gases from nitrogen oxides to meet environmental standards.

The research involved a comprehensive analysis of modern methods for reducing nitrogen oxide emissions, including a detailed review of selective non-catalytic reduction (SNCR) technologies. A comparative assessment of the effectiveness of various reagents used in the SNCR process was conducted, taking into account their environmental and economic characteristics.

**Keywords:** hot water boiler, solid fuel, flue gas purification, nitrogen oxide, selective non-catalytic reduction.

## ВСТУП

Екологічні проблеми є одними з найактуальніших у сучасному світі, оскільки стан довкілля безпосередньо впливає на здоров'я людей, розвиток економіки та, в свою чергу, визначається рівнем технологічного прогресу.

Промислова революція суттєво посилила антропогенний вплив на атмосферу. Зараз теплові електростанції є одними з головних винуватців забруднення повітря у великих містах, забезпечуючи до 43% загального обсягу шкідливих викидів.

Викиди шкідливих речовин, таких як оксиди азоту, вуглецю, сірки та вуглеводнів, становлять серйозну загрозу для навколишнього середовища.

Оксиди азоту не лише шкодять здоров'ю людей, спричиняючи захворювання дихальних шляхів, але й руйнують озоновий шар. Взаємодіючи з атмосферною вологою, вони утворюють кислотні дощі, які закислюють ґрунти та водойми, перетворюючи поживні речовини в форми, недоступні для рослин.

Оксиди азоту становлять серйозну загрозу для здоров'я людей, посилюють парниковий ефект та руйнують озоновий шар. Тому розробка ефективних методів боротьби з цими шкідливими речовинами є надзвичайно важливою.

Енергетичні котли, які забезпечують теплопостачання міст, а також промислові печі, що використовують різні види палива, є основними джерелами викидів оксидів азоту. Ці шкідливі речовини утворюються в результаті складних термогазодинамічних процесів, що відбуваються під час горіння.

Підписавши Угоду про асоціацію в 2014 році, Україна взяла на себе зобов'язання дотримуватися європейських стандартів щодо промислових викидів, зокрема Директиви 2010/75/ЄС. Це зобов'язання також закріплено в Національному плані скорочення викидів, затвердженому урядом. З огляду на це, особливу увагу слід приділити зниженню викидів оксидів азоту, які утворюються під час спалювання палива в енергетичних установках.

Утворення оксидів азоту під час горіння палива залежить від багатьох факторів, таких як склад палива, конструкція котла та умови його роботи. Тому ще на етапі проектування або модернізації котлів проводять розрахунки, щоб визначити, скільки оксидів азоту буде утворюватися. На основі цих розрахунків розробляють заходи, які дозволяють знизити викиди до рівня, встановленого законодавством.

# 1. УТВОРЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В ТВЕРДОПАЛИВНОМУ КОТЛІ

Основною причиною утворення оксидів азоту є процес горіння, який відбувається в печах і котлах під час спалювання різних видів палива. Саме при високих температурах і взаємодії палива з киснем утворюються ці шкідливі речовини.

Під час горіння палива утворюється цілий ряд оксидів азоту, які відрізняються за своїми властивостями та активністю. Однак, для зручності всі ці сполуки зазвичай об'єднують під загальною назвою NO<sub>2</sub>. Кількість утворених оксидів азоту залежить від умов горіння палива.

Існує три основні способи утворення оксидів азоту під час горіння: термічний, швидкий та паливний. Перші два пов'язані з азотом, що міститься в повітрі, а останній – з азотом, який є складовою частиною самого палива.

Термічні оксиди азоту утворюються в результаті окислення азоту повітря вільним киснем при високих температурах. Швидкість цієї реакції значно зростає зі збільшенням температури і концентрації атомарного кисню. Крім того, час перебування газів у зоні високих температур також впливає на кількість утворених оксидів азоту.

Швидкі оксиди азоту утворюються при відносно низьких температурах внаслідок складних реакцій між вуглеводнями та азотом повітря. На відміну від них, паливні оксиди азоту виникають безпосередньо з азоту, який міститься в самому паливі, при температурах близько 625-725°C. Природний газ, як правило, не містить азоту, тому паливні оксиди при його спалюванні не утворюються. Однак при спалюванні мазуту, який часто містить азот, частка паливних оксидів може бути дуже значною.

## 2. ТЕХНОЛОГІЇ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДУ АЗОТУ

Зростаюче забруднення атмосфери спонукало до розробки численних технологій, спрямованих на зниження викидів оксидів азоту. Ці технології зазвичай передбачають зміну процесу горіння палива або обробку димових газів після нього. Результати досліджень показали високу ефективність таких методів, що призвело до їх широкого застосування на електростанціях та в промислових котлах. Метою є досягнення найнижчих допустимих рівнів викидів за оптимальної вартості.

З метою зменшення викидів NOx перед спалюванням палива проводять його підготовку, яка полягає у зниженні вмісту азоту або заміні на паливо з меншим його вмістом.

Технології зниження викидів NOx під час горіння спрямовані на зниження температури в зоні горіння, зменшення кількості кисню на початкових стадіях горіння та зміщення зони високих температур. Для досягнення цих цілей застосовують різноманітні методи, такі як налаштування пальників, оптимізацію котлів, регулювання подачі повітря, використання спеціальних пальників з низьким рівнем викидів NOx, а також рециркуляцію димових газів.

Хоча ці технології досить ефективно зменшують кількість шкідливих оксидів азоту в димових газах, їхнє застосування пов'язане з деякими недоліками, такими як зниження ефективності котла, збільшення кількості незгорілого вуглецю в золі та прискорення корозії внутрішніх поверхонь печі.

Для зменшення викидів оксидів азоту (NOx) у котлах, що працюють на вугіллі, застосовують два основних підходи. Перший передбачає модифікацію самого процесу горіння за допомогою спеціальних малотоксичних пальників, ступеневого подавання повітря та рециркуляції димових газів. Другий підхід полягає у використанні селективних відновників, які перетворюють шкідливі оксиди азоту на безпечний молекулярний азот. Ці відновники можуть бути як каталітичними, так і некаталітичними.

Для зниження викидів оксидів азоту застосовують комплекс заходів, що включають як первинні, так і вторинні методи. Первинні методи, такі як

зниження температури повітря, багатоступеневе спалювання та рециркуляція димових газів, спрямовані на оптимізацію процесу горіння. Однак вони можуть призводити до збільшення викидів чадного газу[1].

Для досягнення суворих екологічних норм щодо викидів оксидів азоту найбільш ефективним є застосування технологій післязгорювальної обробки, які очищають димові гази перед викидом в атмосферу [2, 3].

Вчені прагнуть оптимізувати процес зниження викидів шляхом поєднання різних технологій управління процесом горіння та обробки після згорання палива.

## **2.1. ПРОЦЕСИ ХІМІЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ**

Оксиди азоту здатні відновлюватися до нешкідливого азоту різними речовинами. Найбільш ефективним відновником в умовах надлишку кисню є аміак. Інші відновники, такі як метан, водень або чадний газ, в першу чергу реагують з киснем, що знижує їхню ефективність у відновленні оксидів азоту. Для проведення відновлення аміаком димові гази пропускають через каталітичний реактор, де в присутності каталізатора відбувається реакція між аміаком та оксидами азоту. Одним з найбільш поширених каталізаторів є п'ятиокис ванадію. Аміак вводять у потік димових газів за допомогою перфорованої труби, розміщеної між економайзером та повітропідігрівником. Далі, на відстані кількох десятків сантиметрів, встановлюється каталітичний блок, який сприяє перебігу реакції очищення. Основною проблемою при застосуванні каталітичних методів очищення є зменшення опору каталізатора.

У Японії та США аміачно-каталітичний метод є одним з найбільш поширених способів зниження викидів оксидів азоту в енергетиці. Його ефективність досягає 70-95%. Процес відбувається в кілька етапів: введення аміаку в потік димових газів, змішування реагентів та каталітичне відновлення оксидів азоту. Як каталізатори використовують, як правило, оксиди металів, наприклад, п'ятиокис ванадію. Незважаючи на високу ефективність, метод має певні недоліки: можливість викиду надлишкового аміаку та утворення закису азоту. Крім того, для забезпечення високої ефективності очищення необхідно підтримувати оптимальні умови процесу, такі як температура, концентрація

реагентів та швидкість газового потоку. Сучасні дослідження спрямовані на розробку нових, більш ефективних каталізаторів та оптимізацію умов проведення процесу.

Альтернативним методом очищення димових газів від оксидів азоту є селективне некаталітичне відновлення (СНКВ), відкрите Р. Лайоном у 1978 році. Цей метод передбачає пряме введення аміаку або аміачної води безпосередньо в топкову камеру при температурі 850-1200°C. Ефективність процесу залежить від кількох факторів, зокрема від температури газового потоку, співвідношення кількості аміаку до оксидів азоту, концентрації оксидів азоту та часу перебування реакційної суміші в зоні високих температур. Перевагою СНКВ є відсутність необхідності в застосуванні каталізатора, що спрощує конструкцію очисного обладнання.

Процес селективного некаталітичного відновлення має певні особливості, пов'язані з температурним режимом. Ефективність очищення досягає максимуму при температурі близько 900°C. Зі збільшенням температури зростає витрата аміаку, необхідного для нейтралізації оксидів азоту, що пов'язано з посиленням побічних реакцій. Водночас, частка непрореагованого аміаку, який викидається в атмосферу, зменшується.

Щоб процес очищення димових газів за допомогою СНКВ був ефективним, необхідно підтримувати точну температуру. Якщо температура буде занадто високою або занадто низькою, ефективність знизиться. Крім того, кількість аміаку, який не вступив у реакцію і потрапляє в атмосферу, обмежена нормами. Тому, хоча цей метод і має переваги (низька вартість обладнання), його ефективність має певні обмеження.

В установках для проведення СНКВ аміак піддається випаровуванню в трубі Вентурі за допомогою парового потоку. Отримана пара аміаку подається безпосередньо в зону реакції. Для зниження температури, необхідної для ефективного відновлення оксидів азоту аміаком, застосовують каталізатори. Цей процес відомий як селективне каталітичне відновлення (СКВ) і характеризується високою ефективністю (80-90%). Використання каталізатора

дозволяє оптимізувати стехіометрію реакції, зменшивши витрати аміаку до одного моля на один моль оксидів азоту.

Перед тим, як ввести аміачну воду або сечовину в реактор для селективного каталітичного відновлення (СКВ), їх необхідно піддати процесу конверсії з метою отримання газоподібного аміаку. Технологія СКВ знайшла широке застосування з кінця 70-х років ХХ століття, коли була вперше реалізована в Японії. Сучасні дослідження в цій галузі зосереджені на пошуку шляхів збільшення довговічності існуючих каталізаторів, а також на розробці нових каталітичних систем з покращеними характеристиками.

На сьогоднішній день у світі працює понад 400 установок для очищення димових газів від оксидів азоту за допомогою технології СКВ, і ця цифра стосується тільки теплових електростанцій. Цей метод широко використовується не тільки на теплових електростанціях, але й на газових турбінах, двигунах внутрішнього згорання та установках для спалювання сміття. Крім того, для досягнення максимального зниження викидів оксидів азоту часто поєднують різні технології очищення.

Варто зазначити, що витрати на очищення від оксидів азоту за допомогою каталітичних методів суттєво перевищують вартість методів, спрямованих на зниження їх утворення на початкових етапах процесу. Тому каталітичне очищення, як правило, застосовується як додатковий захід для досягнення більш жорстких екологічних норм. Серед каталітичних методів найбільш поширені селективне каталітичне відновлення (СКВ) та селективне некаталітичне відновлення (СНКВ). СКВ забезпечує більш високу ефективність очищення (близько 90%), ніж СНКВ (50-70%). Однак, ефективність СНКВ може бути значно підвищена шляхом додавання спеціальних добавок, що сприяють відновленню оксидів азоту.

## **2.2 СЕЛЕКТИВНЕ КАТАЛІТИЧНЕ ТА СЕЛЕКТИВНЕ НЕКАТАЛІТИЧНЕ ВІДНОВЛЕННЯ**

### **СЕЛЕКТИВНЕ КАТАЛІТИЧНЕ ВІДНОВЛЕННЯ**

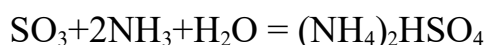
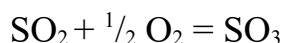
За кордоном на котельнях та теплових електростанціях переважно застосовується каталітичний метод  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}_2 + \text{NO}$ ) для зниження викидів

оксидів азоту (NO<sub>x</sub>). Суть цього методу полягає у відновленні NO<sub>x</sub> за допомогою спеціальних речовин – відновників, які додають до димових газів. Найпоширенішим відновником є аміак, однак також можуть використовуватися карбамід CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>, природний газ та водень.

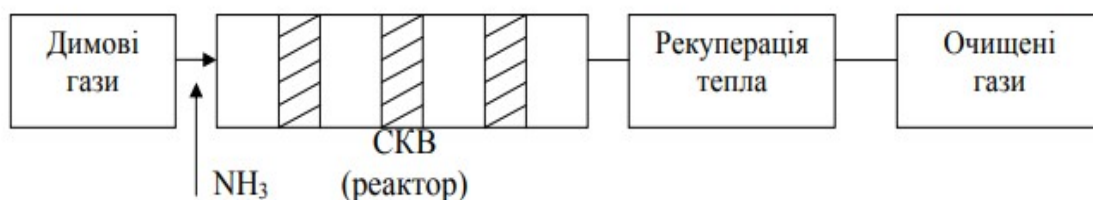
Процес відбувається на поверхні каталізатора, де за рахунок його властивостей відбувається хімічна реакція, в результаті якої шкідливі речовини перетворюються на безпечні:



Поруч йдуть допоміжні (вторинні) реакції:



Супутні реакції забруднюють каталізатор і знижують ефективність відновлення NO<sub>x</sub>. Каталітична технологія має високий ступінь перетворення NO та NO<sub>2</sub> в безпечний азот N<sub>2</sub>. Її можна представити схемою:



**Рис.1. Каталітична технологія відновлення NO<sub>x</sub>**

В димові газі вводиться аміачно-повітряна суміш, яка потім направляється в реактор селективного каталітичного відновлення. З метою підвищення ефективності процесу, димові газі підігріваються перед вступом до реактора. Для утилізації теплової енергії димових газів застосовують регенеративні підігрівачі, які дозволяють відновити частину теплоти і використовувати її повторно. Після рекуперації очищений газ надходить в димову трубу.

Ефективність процесу відновлення оксидів азоту залежить від точного дозування аміаку, оптимальне співвідношення якого до оксидів азоту

становить 0,8-1. Селективність процесу передбачає, що аміак  $\text{NH}_3$  повинен реагувати виключно з оксидами азоту  $\text{NO}_x$ , оскільки окислення аміаку та діоксиду сірки на каталізаторі є небажаним. Наявність кисню в димових газах є необхідною для відновлення оксидів азоту, проте його надлишок може призвести до утворення триоксиду сірки, який взаємодіючи з аміаком, утворює сульфат амінію. Осади сульфату амінію закупорюють пори каталізатора, знижуючи його активність. Для запобігання цього явища, каталізатор встановлюють після систем сіркоочищення, а також використовують каталізатори з низьким ступенем окислення діоксиду сірки.

Щоб очистити димові гази від шкідливих речовин, використовують спеціальні пристрої: реактор СКВ та систему подачі аміаку. Каталізатор, який знаходиться в реакторі, повинен бути дуже ефективним при різних температурах, не боятися шкідливих речовин, бути міцним і довговічним. Також важливо, щоб його можна було безпечно утилізувати після закінчення терміну служби.

Розміщення реактора селективного каталітичного відновлення безпосередньо за економайзером є найпростішим варіантом монтажу, оскільки не вимагає додаткового обладнання для підігріву димових газів. Однак, експлуатація каталізатора в таких умовах (висока температура 300-450 °С, висока концентрація пилу) призводить до його швидкого зношування і, як наслідок, до необхідності частої заміни. Крім того, коливання навантаження котла призводять до зміни температури димових газів, що вимагає застосування систем регулювання температури для забезпечення оптимальних умов роботи каталізатора.

Технологія селективного каталітичного відновлення оксидів азоту є економічно доцільною за умови власного виробництва каталізаторів. Найбільш поширеним є варіант встановлення реактора СКВ після систем сіркоочищення на холодних димових газах. Однак, низька температура димових газів після сіркоочищення 40-50°C вимагає додаткового підігріву для забезпечення ефективності процесу каталітичного відновлення. Для підігріву димових газів використовується спалювання природного газу або мазуту.



**Рис.2. Схема розташування реактора СКВ**

Вторинна обробка димових газів передбачає їх контакт з каталізатором у реакторі. Каталізатор, що складається з пористих пластин з активних металів, забезпечує умови для хімічного перетворення оксидів азоту без участі в реакції. Димові газу, що надходять у реактор, змішуються з аміаком. Аміак, вступаючи в реакцію з оксидами азоту, відновлює їх до молекулярного азоту ( $N_2$ ) і води ( $H_2O$ ).

СКВ базується на процесі, під час якого оксиди азоту перетворюються на нешкідливі речовини за допомогою аміаку. Ця реакція відбувається на поверхні каталізатора і вимагає певного температурного режиму. Оптимальна температура для кожного каталізатора індивідуальна, але зазвичай знаходиться в діапазоні від 505 до 721 Кельвіна.

Більшість каталізаторів для селективного каталітичного відновлення оксидів азоту базуються на діоксиді титану як носії та пентоксиді ванадію як активному компоненті. Діоксид титану забезпечує високу поверхню для взаємодії реагентів і стійкий до дії триоксиду сірки, тоді як пентоксид ванадію каталізує реакцію між аміаком і оксидами азоту. Склад каталізаторів, як правило, є комерційною таємницею. Вибір оптимального каталізатора визначається комплексом факторів, включаючи температурний режим процесу, концентрацію аміаку, необхідний ступінь зниження викидів оксидів азоту, допустимий ступінь окислення діоксиду сірки, наявність інших забруднень у димових газах та очікуваний термін служби каталізатора.

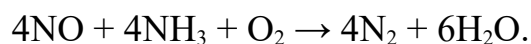
Незважаючи на значні досягнення в розробці реакторів і каталізаторів для селективного каталітичного відновлення, ряд проблем залишається невирішеним. Зокрема, актуальним є питання забруднення каталізаторів отруйними компонентами топкових газів та засмічення каталітичної поверхні великими частинками золи і сажі.

СКВ є ефективним методом очищення промислових викидів, забезпечуючи високий ступінь зниження концентрації оксидів азоту (70-80%) при відносно низьких температурах. Однак, успішна робота системи СКВ залежить від точного дотримання співвідношення між кількістю відновника (NH<sub>3</sub>) та оксидів азоту (NO) у потоці димових газів.

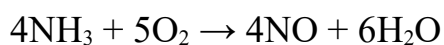
Селективне каталітичне відновлення аміаком, незважаючи на високу ефективність, має ряд суттєвих обмежень. Високі капітальні витрати на установку обладнання та значні експлуатаційні витрати роблять цей метод економічно не вигідним для багатьох підприємств. Крім того, габаритні розміри систем СКВ часто обмежують їх застосування в умовах обмеженого простору.

### СЕЛЕКТИВНЕ НЕКАТАЛІТИЧНЕ ВІДНОВЛЕННЯ

Окрім каталітичних методів, існує й інший спосіб очищення димових газів від оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) - селективне некаталітичне відновлення. Цей процес відбувається при високих температурах (850-1100°C) і не вимагає застосування каталізаторів. Реакція відновлення оксиду азоту має вигляд

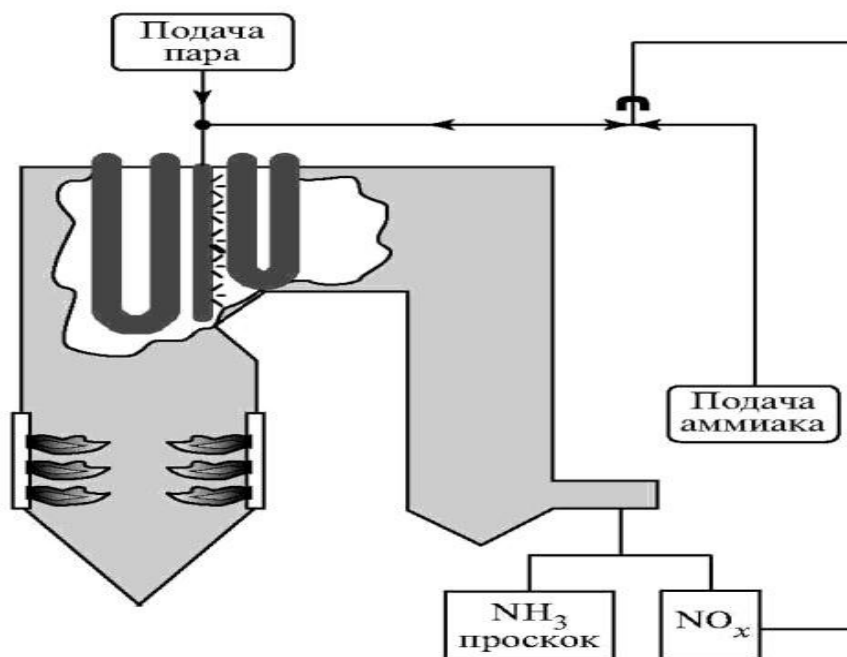


Ефективність процесу очищення залежить від температури. Якщо температура опускається нижче певного рівня, швидкість реакції різко знижується. З іншого боку, при надмірному підвищенні температури починається небажана реакція окислення аміаку, що зменшує ефективність очищення.



Для впровадження методу селективного некаталітичного відновлення необхідно спочатку створити систему для зберігання, охолодження та подачі реагенту, який буде використовуватися для очищення газів. Потім цю систему

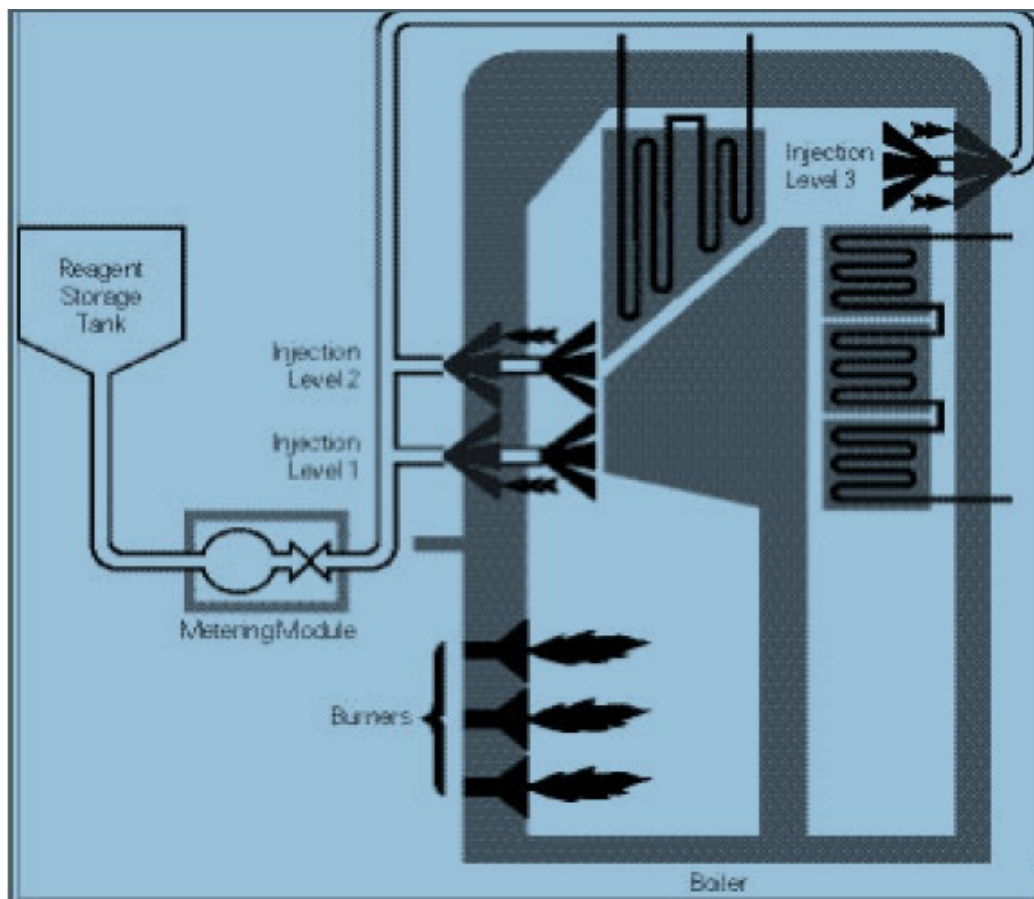
необхідно інтегрувати в котел, забезпечивши точну дозування реагенту в зону реакції, де він вступає у взаємодію з оксидами азоту з утворенням нешкідливих азоту та водяної пари (рис. 3).



**Рис. 3. Реалізація методу СНКВ**

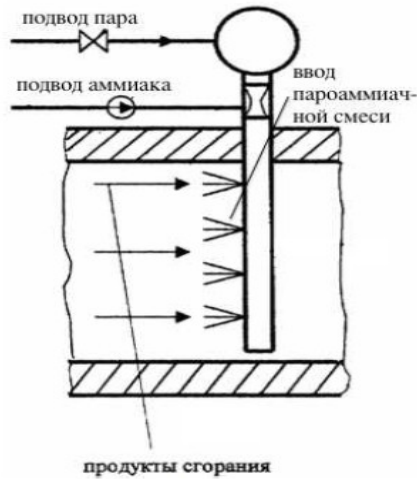
Селективне некаталітичне відновлення — це хімічна реакція, в результаті якої шкідливі оксиди азоту перетворюються на нешкідливі азот, вуглекислий газ (при використанні сечовини) та воду. Для ініціації цієї реакції в газовий потік вводять відновник — зазвичай це безводний аміак або рідка сечовина.

СНКВ – це технологічний процес, в якому шкідливі оксиди азоту перетворюються на безпечні речовини. Для цього в потік гарячих димових газів вводять спеціальний реагент (аміак або сечовину). Без використання каталізатора, при певній температурі, реагент вступає в хімічну реакцію з оксидами азоту, утворюючи нешкідливий азот, вуглекислий газ (якщо використовується сечовина) та водяну пару. Цей процес називається "селективним", оскільки реагент переважно взаємодіє саме з оксидами азоту. Схематичне зображення процесу СНКВ зображено на рис. 4.



**Рис. 4. Схема процесу СНКВ**

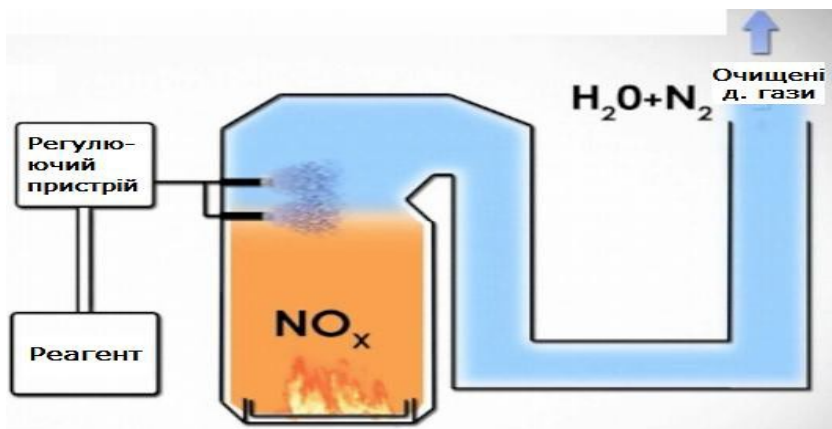
Установка СНКВ являє собою інжектор, розташований у газоході котла. Він забезпечує рівномірний розподіл відновника (аміачної води) по перерізу газоходу шляхом подачі його через систему розподільних труб з вихідними отворами. Змішування відновника з продуктами згоряння в зоні оптимальних температур забезпечує ефективне селективне некаталітичне відновлення оксидів азоту.



**Рис. 5. Локальна схема процесу СНКВ**

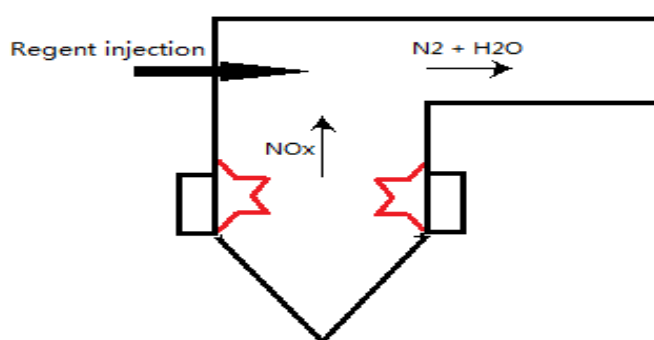
Система СНКВ включає в себе технологічне обладнання, призначене для зберігання, дозування та впорскування відновника. До складу системи входять резервуари для зберігання реагенту, насоси для його перекачування, форсунки для розпилення, розподільні модулі для рівномірного розподілу відновника по перерізу газоходу, а також система автоматичного управління, яка забезпечує оптимальні параметри роботи установки.

Процес очищення димових газів від оксидів азоту відбувається при дуже високій температурі (850-1100 градусів Цельсія). Для цього використовують спеціальний метод, який називається селективне некаталітичне відновлення. Суть методу полягає в тому, що до гарячих газів додають аміак, отриманий з аміачної води. Аміак вступає в реакцію з шкідливими речовинами і перетворює їх на безпечний азот.



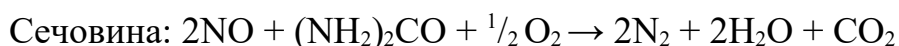
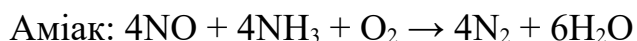
**Рис. 6. Схема концепції СНКВ.**

Селективне некаталітичне відновлення (СНКВ) - це технологія, що полягає у введенні відновника (аміаку або сечовини) в потік димових газів з метою зниження концентрації оксидів азоту. В результаті гомогенної газофазної реакції NO<sub>x</sub> перетворюються на молекулярний азот та водяну пару. Схема загальної концепції СНКВ наведена на рис. 6,7.



**Рис. 7. Схема концепції СНКВ.**

Найчастіше використовують такі реагенти, як аміак NH<sub>3</sub> та сечовина CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> [4]. Необхідна температура для цих реагентів між 852°C і 1177°C [5]. Хімічні реакції СНКВ :



Селективне некаталітичне відновлення (СНКВ) NO<sub>x</sub> передбачає введення відновника в зону горіння при температурі 870-1090°C. Вихід за межі цього температурного вікна призводить до зниження ефективності процесу. При більш високих температурах відновник може окислюватися, а при більш низьких - реакція протікає повільно. Для розширення температурного вікна процесу селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) оксидів азоту застосовують добавки. При використанні сечовини без добавок ефективний діапазон температур становить 925-1035°C. Додавання добавок дозволяє розширити цей діапазон до 815-1148°C. Однак, слід зазначити, що ефективність зниження NO<sub>x</sub> при цьому знижується, а споживання реагентів

збільшується порівняно з селективним каталітичним відновленням [6]. Для ефективного очищення димових газів за допомогою СНКВ, співвідношення між кількістю очищувальної речовини (реагенту) та кількістю шкідливих речовин (NOx) має бути приблизно 2:1. Це означає, що для нейтралізації однієї частини NOx необхідно дві частини реагенту. Перевагою СНКВ є відсутність необхідності в каталізаторі, що знижує початкові витрати на обладнання. Найчастіше як реагенти використовують аміак або сечовину. Сечовину можна зберігати як у твердому вигляді, так і у вигляді водного розчину.

Незважаючи на високу ефективність селективного каталітичного відновлення (СКВ) оксидів азоту, цей метод має ряд суттєвих недоліків, таких як висока вартість обладнання, значні експлуатаційні витрати, обмежений термін служби каталізатора, чутливість до забруднень та великі габарити установок. На відміну від СКВ, селективне некаталітичне відновлення (СНКВ) позбавлене цих недоліків. СНКВ є більш економічним, простим в експлуатації та обслуговуванні, може працювати в умовах підвищеної забрудненості та легко модернізуватися. Завдяки своїм перевагам, СНКВ широко застосовується в різних галузях промисловості, особливо в країнах, що розвиваються. Незважаючи на низьку вартість, ефективність методу СНКВ обмежена деякими факторами, такими як вузький температурний діапазон, проскокування аміаку та низька ефективність використання реагентів. Для вирішення цих проблем до реагентів (сечовини або аміаку) додають спеціальні добавки. Дослідження [7] показали, що навіть невелика кількість таких добавок може значно підвищити ефективність очищення димових газів і зменшити витрати на реагенти.

Продуктивність системи селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) значною мірою залежить від точності дозування реагенту і якості його змішування з димовими газами. Оптимальні результати досягаються при стабільних умовах горіння.

На ефективність селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) впливають такі фактори, як температура в зоні введення реагенту, час

контакту реагенту з димовими газами, концентрація кисню, сірки, оксиду азоту, а також вміст вологи та чадного газу в димових газах. Для досягнення високої ефективності СНКВ необхідно забезпечити оптимальні умови проведення процесу, такі як підтримання заданого температурного режиму, забезпечення достатнього часу контакту реагенту з димовими газами, дотримання стехіометричного співвідношення реагентів та якісне змішування реакційної суміші.

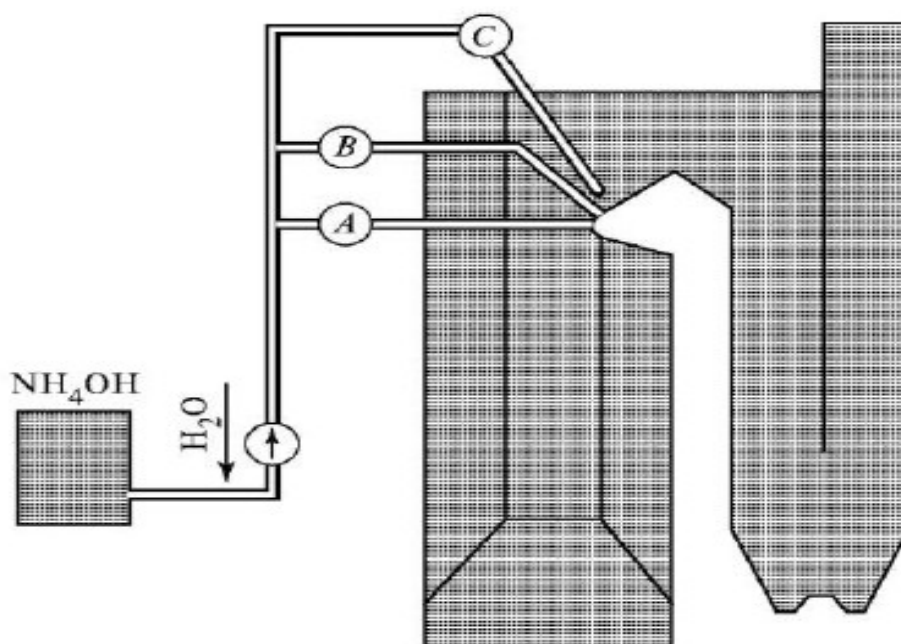
### ТРУДНОЦІ ІЗ СИСТЕМАМИ СНКВ

Однією з труднощів реалізації цього методу є наявність температурного градієнта в потоці димових газів. Незважаючи на те, що середня температура відповідає оптимальному діапазону для проведення реакції, в різних точках перерізу газового тракту температура може виходити за межі цього діапазону, що негативно впливає на ефективність процесу.

Динамічний характер процесу горіння, що проявляється у зміні навантаження котла та нерівномірності концентрацій оксидів азоту в потоці димових газів, ускладнює підтримання стабільного стехіометричного співвідношення реагентів у реакційній зоні.

З метою підвищення адаптивності системи СНКВ до змінних умов експлуатації були розроблені схеми з мультиточковим введенням реагенту. Розподілене введення аміаку дозволяє більш рівномірно розподілити його по перерізу газоходу і забезпечити оптимальне співвідношення реагент/ $\text{NO}_x$  в широкому діапазоні навантажень котла (рис. 8).

Мультиточкове введення аміаку спричинило ускладнення конструкції системи і підвищення вимог до її експлуатації. Для забезпечення ефективного змішування реагенту з димовими газами необхідно було оптимізувати гідродинамічні параметри вдування аміачної води і підібрати оптимальний діаметр крапель. Занадто інтенсивне випаровування дрібних крапель призводило до передчасного розкладання аміаку, а повільне випаровування великих крапель – до зниження ефективності відновлення  $\text{NO}_x$ .



**Рис. 8. Схема СНКВ з трьома місцями введення аміачної води**

Альтернативними носіями реагенту для СНКВ можуть бути стиснене повітря або водяна пара. Комбіновані схеми введення реагенту, що передбачають його подачу разом з третинним повітрям або рециркульованими димовими газами, дозволяють оптимізувати процес змішування і підвищити ефективність зниження викидів  $\text{NO}_x$ .

Вибір реагенту для процесу селективного некаталітичного відновлення має суттєвий вплив на ефективність і безпеку технології. Сечовина, незважаючи на зручність транспортування і зберігання, має ряд недоліків. При термічному розкладанні сечовини утворюється значна кількість закису азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ), який є потужним парниковим газом і руйнує озоновий шар. Крім того, використання сечовини підвищує ризик корозійних процесів в обладнанні.

Ефективність селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) значною мірою залежить від рівномірності розподілу реагенту (аміаку, сечовини тощо) по перерізу газоходу. Температурний режим є критичним фактором для протікання реакції: для аміаку та каустику амонію оптимальний діапазон температур становить  $850\text{-}1000^\circ\text{C}$ , а для сечовини –  $800\text{-}1100^\circ\text{C}$ . Час контакту реагенту з димовими газами в оптимальному температурному вікні має становити від 200 до 500 мілісекунд. Збільшення мольного

співвідношення  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  сприяє підвищенню ефективності процесу, однак призводить до зростання проскоку аміаку і, відповідно, до забруднення конвективних поверхонь нагріву. Оптимальним вважається мольне співвідношення  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  в діапазоні 1,5-2,5.

Метод селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) найчастіше застосовується як додаткова технологія зниження викидів оксидів азоту, оскільки його ефективність, як правило, нижча порівняно з іншими методами. Оптимальними умовами для застосування СНКВ є стабільні режими роботи котла і постійні характеристики палива. Зміни навантаження і якості палива негативно впливають на ефективність процесу СНКВ і ускладнюють досягнення високих показників очищення димових газів.

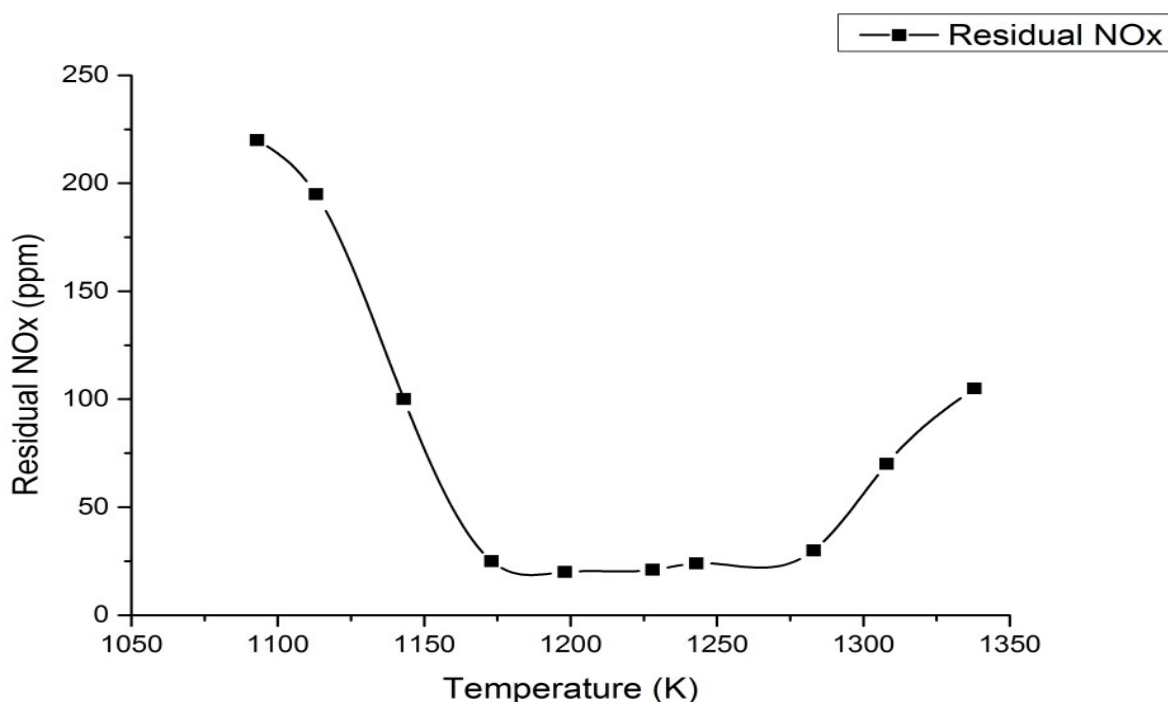
Вартість впровадження системи селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) безпосередньо залежить від технічних характеристик котла. За приблизними оцінками, для вугільного котла потужністю 250 МВт, що працює 4000 годин на рік, зниження викидів оксидів азоту на одну тону обходиться в середньому в 2500 євро. Інші дослідження свідчать, що при ефективності очищення від 20 до 60% і терміні окупності 10 років, вартість зниження викидів  $\text{NO}_x$  на одну тону може досягати 10 000 доларів США. Варто зазначити, що ці витрати включають в себе утилізацію побічних продуктів очищення, таких як зола. Незважаючи на це, СНКВ є економічно більш вигідним рішенням порівняно з іншими технологіями очищення димових газів.

Головні виклики, з якими стикаються сучасні системи селективного некаталітичного відновлення (СНКВ), полягають у вузькому температурному вікні, в якому процес очищення є найбільш ефективним, та ризику непрореагованого аміаку. Теоретично, за ідеальних умов СНКВ здатне забезпечити зниження викидів оксидів азоту на 70-80%.

Оптимальна температура для проведення реакції селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) за допомогою аміаку становить близько  $962^\circ\text{C}$ . Ефективний температурний діапазон процесу обмежений інтервалом  $900-1000^\circ\text{C}$  ([8] та [9]), (рис. 9). Зниження температури нижче оптимального

значення призводить до зниження швидкості реакції через недостатню концентрацію радикалів гідроксилу та кисню. При підвищенні температури понад оптимальне значення зростає ймовірність окиснення аміаку до оксидів азоту. Дослідження показують, що додавання лужних сполук дозволяє розширити температурний діапазон і підвищити ефективність процесу СНКВ на 30% [10].

В якості альтернативи аміаку та сечовини в процесах селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) розглядаються такі сполуки, як монометиламін, диметиламін, триметиламін та гідразин [11]. Дослідження показали, що використання гідразину дозволяє знизити оптимальну температуру процесу до 500-600°C за умови низького вмісту кисню. Додавання різних добавок також дозволяє розширити температурний діапазон СНКВ і знизити оптимальну температуру до 525°C. Це свідчить про перспективність використання альтернативних реагентів для покращення ефективності процесу СНКВ.



**Рис. 9. Температурне вікно процесу СНКВ з використанням аміаку з молярним співвідношенням  $(\text{NO}_2 / \text{NO}_i) = 1,5$ .**

Непрореагований аміак, який утворюється в процесі селективного некаталітичного відновлення (СНКВ), є одним з основних забруднювачів повітря. Кількість непрореагованого аміаку, або так званий проскок аміаку, є важливим показником ефективності системи відновлення NOx, а також впливає на споживання реагенту і швидкість реакції.

Непрореагований NH<sub>3</sub> впливає на:

- утворення солей амонію, що зазвичай включає бісульфат аміаку (NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>), сіль, що викликає забруднення нагрівачів повітря та інших поверхонь, розташованих далі по ходу у котлі;
- шлейф хлориду амонію з топки;
- запах аміаку з золи;
- викиди газоподібного аміаку, якщо рівень проскакування високий.

Утворення бісульфату амонію в процесі селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) призводить до корозії теплообмінних поверхонь і зниження ефективності котла. Високий рівень проскоку аміаку, як правило, пов'язаний з неправильним дозуванням реагенту, недостатнім змішуванням реагенту з димовими газами та виходом реакційної зони за межі оптимального температурного вікна. Нестабільна робота котла може додатково ускладнювати процес СНКВ.

Незважаючи на ряд проблем, пов'язаних з утворенням побічних продуктів і необхідністю точного дозування реагенту, технологія селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) вважається економічно вигідною завдяки відносно низьким капітальним і експлуатаційним витратам порівняно з іншими методами зниження викидів NOx.

### **2.3. ВИДИ РЕАГЕНТІВ У СНКВ**

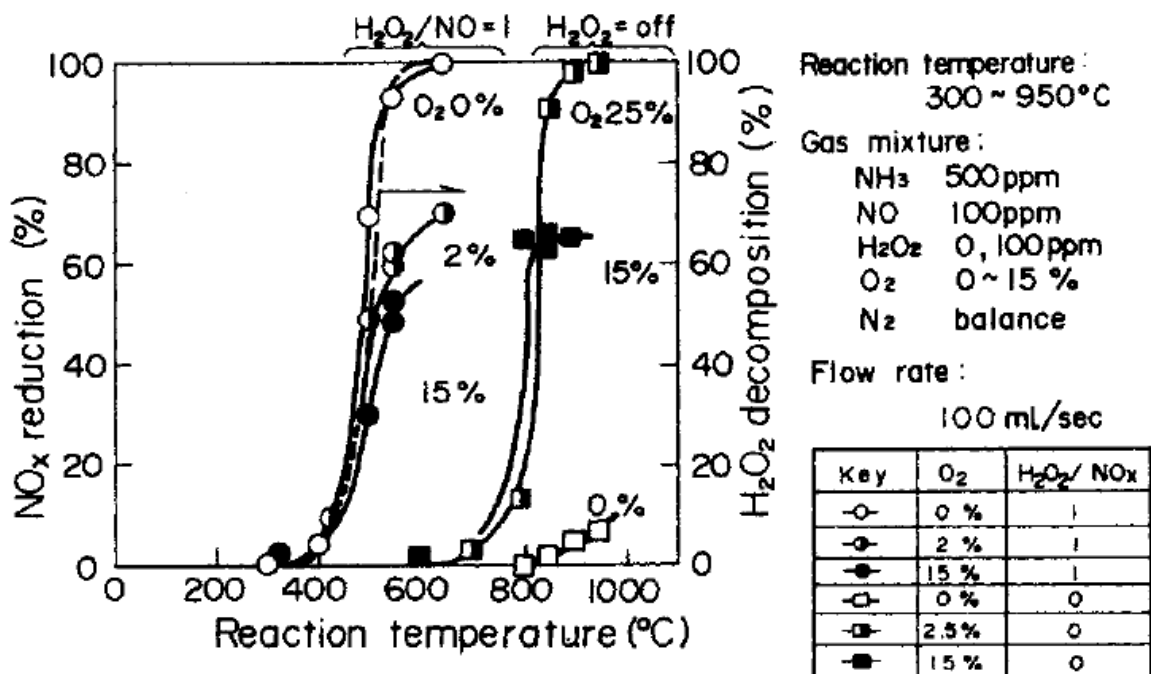
#### **АМІАК**

З 1975 року аміак (NH<sub>3</sub>) активно використовується для очищення промислових викидів від оксидів азоту (NOx) за допомогою технології селективного некаталітичного відновлення (СНКВ). Однак, постійні дослідження спрямовані на вдосконалення цього процесу. Одним із

перспективних напрямків є додавання до аміаку різних добавок, які можуть значно покращити ефективність очищення.

Так, у 1975 році Ліон виявив, що додавання водню до аміаку дозволяє знизити оптимальну температуру реакції, при якій відбувається очищення від  $\text{NO}_x$  [12], та зменшити кількість непрореагованого аміаку, що викидається в атмосферу. Навіть невеликі кількості водню забезпечують суттєве покращення.

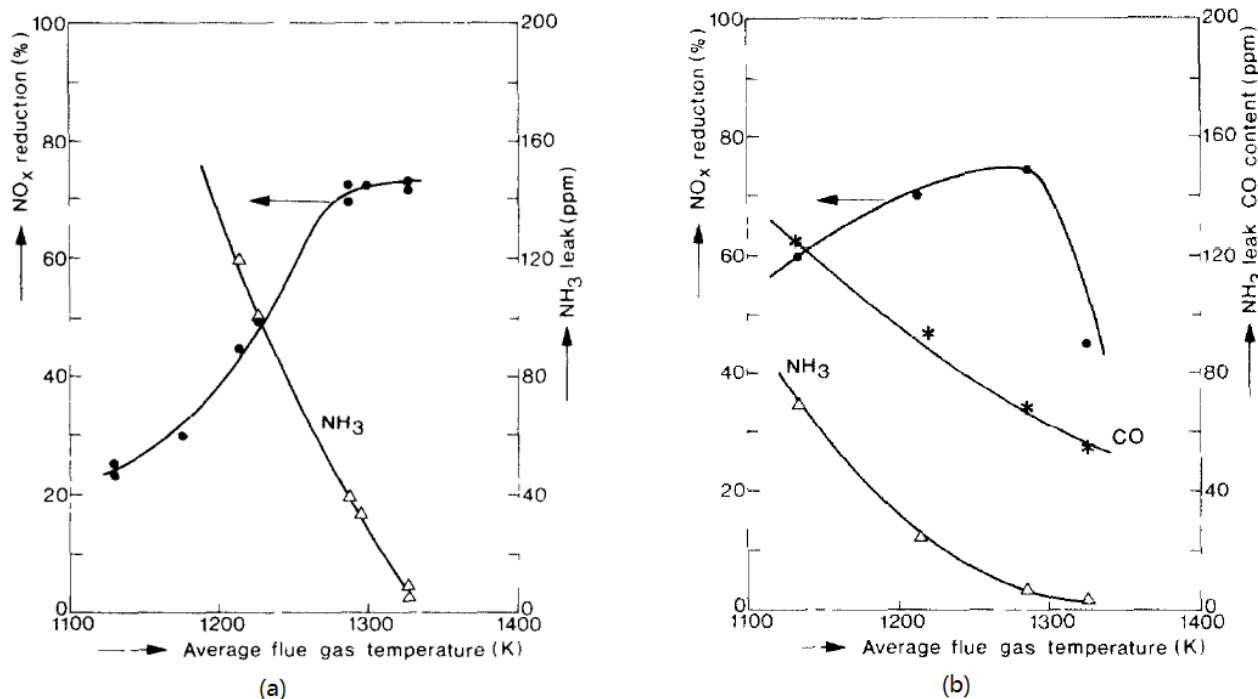
Інші дослідження показали, що використання перекису водню ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) також є ефективним способом зниження  $\text{NO}_x$ . Наприклад, при температурі  $552^\circ\text{C}$  вдалося досягти 90% зниження  $\text{NO}_x$  шляхом впорскування пероксиду водню. Цей процес дозволяє розширити температурний діапазон, при якому ефективно працює система СНКВ. Співвідношення  $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{NO}$  менше 1,0 було достатньо для зміщення СНКВ температурного діапазону на  $27^\circ\text{C}$ , це видно з результатів дослідження (рис. 10).



Ри

с. 10. Взаємозв'язок ефективності відновлення  $\text{NO}_x$  і температури за Azuhata [13]. Газова суміш: 100 ppm  $\text{NO}$ , 500 ppm  $\text{NH}_3$ , 0 або 100 ppm  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 0 ~ 15%  $\text{O}_2$ .

Впорскування природного газу, етану ( $C_2H_6$ ) та монооксиду вуглецю разом з  $NH_3$  можливо зниження оптимальної температури реакції на 150 К – 200 К, досягаючи ефективності видалення  $NO_x$  до 75% (рис. 11).



**Рис. 11. Швидкість зниження  $NO_x$  у порівнянні із середньою температурою димових газів за Лоддером та Леферсом [14].  $[NH_3] / [NO_x]$  в = 1,5,  $O_2 = 1\%$ . (a) - Не вводять добавки; (b) - вводиться CO.**

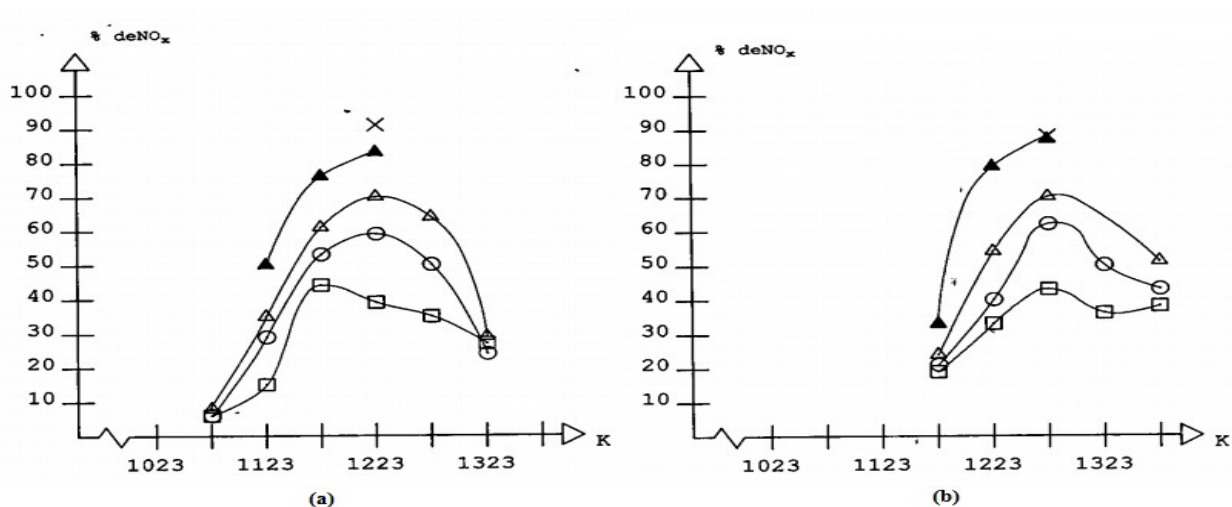
Wenli [15] та його колеги виявили, що додавання вуглеводнів (метану, етану, бутану, етилену) до аміаку в системах селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) дозволяє розширити температурний діапазон процесу і досягти високих ступенів зниження  $NO_x$ . Однак, Lekner та співавтори [16] отримали протилежні результати в умовах циркуляційних котлів з киплячим шаром.

Одним із напрямків досліджень у галузі СНКВ є зниження проскоку аміаку. Було показано, що додавання метану при температурі близько  $846,85^\circ C$  дозволяє досягти значного зниження концентрації непрореагованого аміаку в димових газах при збереженні високої ефективності відновлення  $NO_x$ . Оптимальне співвідношення  $CH_4/NH_3$  для досягнення такого ефекту становить близько 2,4.

Використання аміаку в системах СНКВ є економічно доцільним, однак має ряд недоліків. Низька ефективність при низьких температурах, підвищений рівень проскоку аміаку та його токсичність є основними обмеженнями для широкого застосування цього реагенту.

### СЕЧОВИНА

Ще у 1980 році Саліміан та Хенсон досліджували потенціал сечовини як альтернативного реагенту для селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ). Вони виявили, що сечовина забезпечує порівнянну швидкість відновлення  $\text{NO}_x$ , але має більш широкий температурний діапазон порівняно з аміаком. Зокрема, в котлах на природному газі СНКВ на основі сечовини дозволяє досягти до 70% зниження  $\text{NO}_x$  при температурі 1016-1056 °С. Оптимальна температура для відновлення  $\text{NO}_x$  сечовиною була експериментально визначена на рівні близько 1000 °С, що на 50 К вище, ніж для аміаку (рис.12).

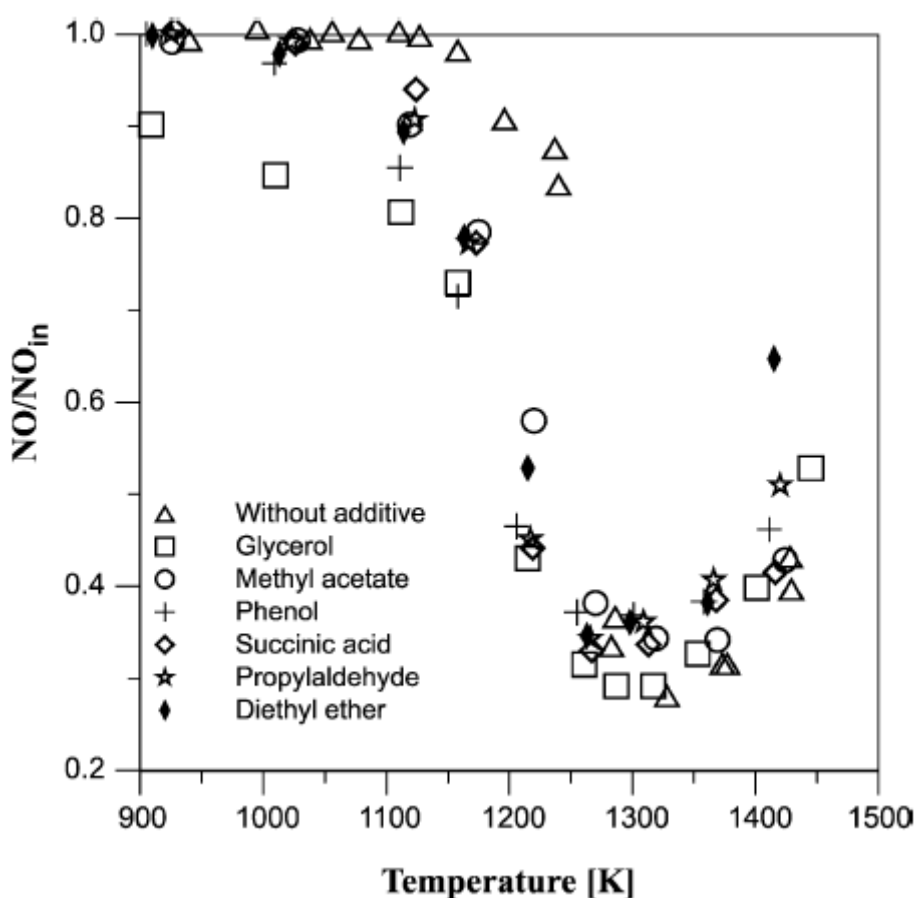


**Рис. 12. Швидкість відновлення  $\text{NO}_x$  у порівнянні з температурою при різному молярному співвідношенні. (а) Використання аміаку як відновника; (б) Використання сечовини як відновника. Молярне співвідношення:  $\square = 0,7$ ;  $\circ = 1,0$ ;  $\triangle = 1,3$ ;  $\blacktriangle = 1,6$ ;  $\times = 2,2$ . [18]**

Ефективність селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) за допомогою сечовини може бути значною мірою залежною від використання різних добавок. Дослідження показали, що такі добавки, як

метан, різні вуглеводні, окис вуглецю та інші, впливають на ефективність відновлення  $\text{NO}_x$ . При цьому, швидкість введення добавки є критичним фактором, який визначає ефективність процесу.

Результати експериментального реактора говорять, що всі види добавок, що досліджувалися в реакторі, могли розширити діапазон температури реакції сечовини при збереженні ефективність видалення  $\text{NO}_x$ . [19] (рис. 13)



**Рис. 13. БЕЗ зниження рівня сечовини та сечовина + добавки. Умови на вході:  $\text{NO} = 500 \text{ ppm}$ ; сечовина =  $600 \text{ ppm}$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 19\%$ ;  $\text{O}_2 = 1,7\%$ ; добавка =  $60 \text{ ppm}$ ; азот = баланс; час проживання =  $200 / T \text{ c}$ ;  $P = 1 \text{ бар}$**

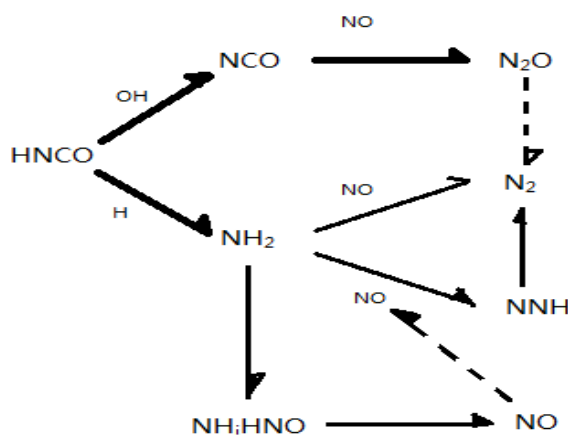
Незважаючи на переваги сечовини як реагенту в системах селективного некаталітичного відновлення (СНКВ), існують певні проблеми, пов'язані з її застосуванням. До них відносяться утворення додаткових викидів закису азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ) та оксиду вуглецю, а також ризик корозії обладнання. З іншого боку,

сечовина є безпечною, стабільною та невибухонебезпечною речовиною, що спрощує її використання.

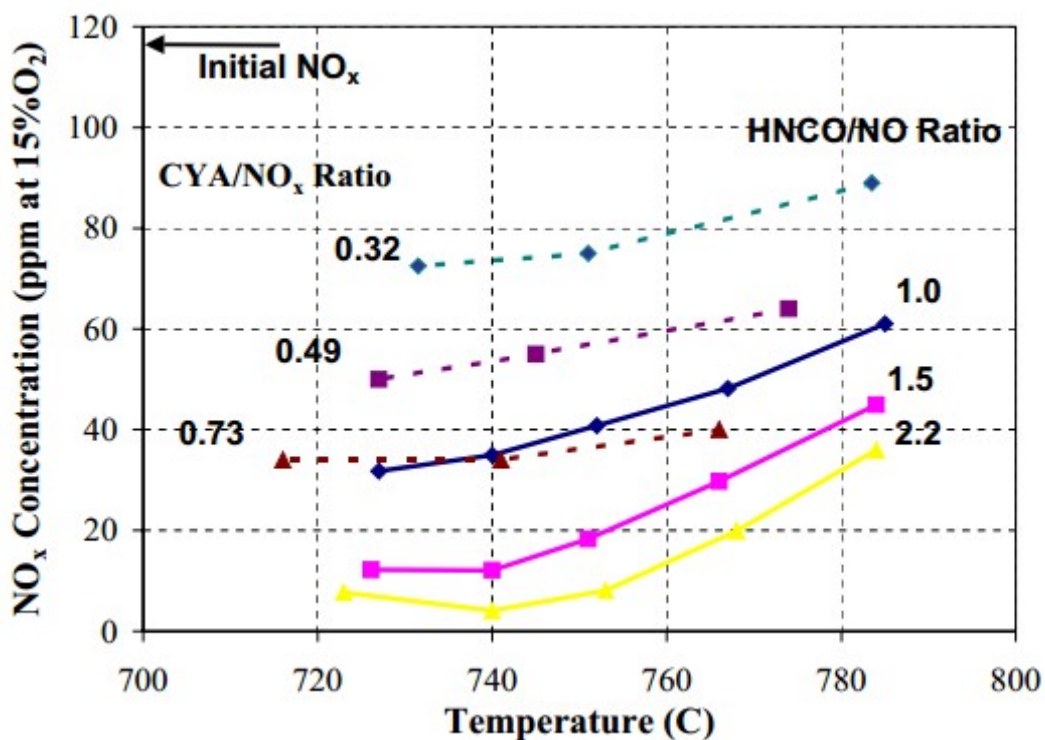
## ЦИАНУРОВА КИСЛОТА

Цианурова кислота (СУА) вперше була досліджена як потенційний реагент для селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) у 1986 році Перрі та Зіберсом [20]. Результати експериментів показали, що СУА має вищі показники відновлення  $\text{NO}_x$  порівняно з аміаком ( $\text{NH}_3$ ) в умовах високих концентрацій кисню та оксиду вуглецю у відпрацьованих газах. На основі цих досліджень був розроблений комерційний процес RAPRENO $_x$  і було запатентовано в 1988 р. Перрі [21].

Вчені детально вивчили, як саме відбувається очищення диму за допомогою цианурої кислоти. Цей процес можна представити у вигляді схеми (рис. 15). Завдяки цим дослідженням вдалося досягти дуже високої ефективності очищення – до 85% шкідливих речовин було видалено при температурах від 696 до 796 градусів за Цельсієм (див. рис. 15).



**Рис. 14. Діаграма шляху реакції, що ілюструє первинні етапи для видів азоту в поточному RAPRENO $_x$  механізмі**



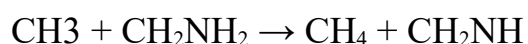
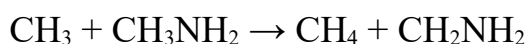
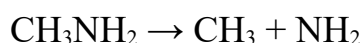
**Рис. 15. Експериментальне та чисельне відновлення NO<sub>x</sub> за допомогою СYA.**

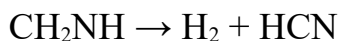
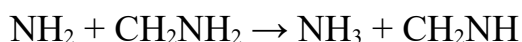
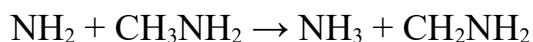
Суцільні лінії - це числові результати, а риси - експериментальні значення.

Використання ціанурової кислоти для очищення диму від шкідливих речовин має кілька переваг. По-перше, цей метод дозволяє уникнути утворення інших шкідливих речовин. По-друге, він дуже ефективний. І, нарешті, ціанурова кислота відносно недорога. Однак, є й недолік: під час цього процесу може утворюватися інший шкідливий газ – закис азоту.

#### МОНОМЕТИЛАМІН

Дослідження метиламіну або монометиламіну (ММА) [22] [23] виявили, що ММА можна термічно розкласти до Н<sub>2</sub>, ціаністого водню (HCN), СН<sub>4</sub> і NH<sub>3</sub> при температурах в діапазоні від 556°C до 676°C. Потім, вивчавши термічне розкладання ММА в ударній трубці при температурах в діапазоні від 1000°C до 2125°C, запропоновано механізм розкладання, як показано нижче:





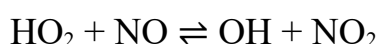
ММА демонструє високу ефективність у зниженні концентрації NO при температурах до 525 °С, характеризуючись широким температурним вікном реакції. Однак, суттєвим недоліком застосування ММА є утворення значних кількостей HCN, що обмежує його використання в системах управління NOx.

Незважаючи на обмежену кількість досліджень щодо застосування ММА для селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) оксидів азоту (NOx) в котлах, результати лабораторних експериментів та досліджень на дизельних двигунах вказують на перспективність використання ММА як реагенту для СНКВ.

#### ПОРІВНЯННЯ МОДЕЛЮВАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ РЕАГЕНТІВ

Порівняння з точки зору ефективності відновлення NO<sub>x</sub> для ММА, сечовини, СУА та сульфату амонію [24] представлено, як результати моделювання (рис. 16–18).

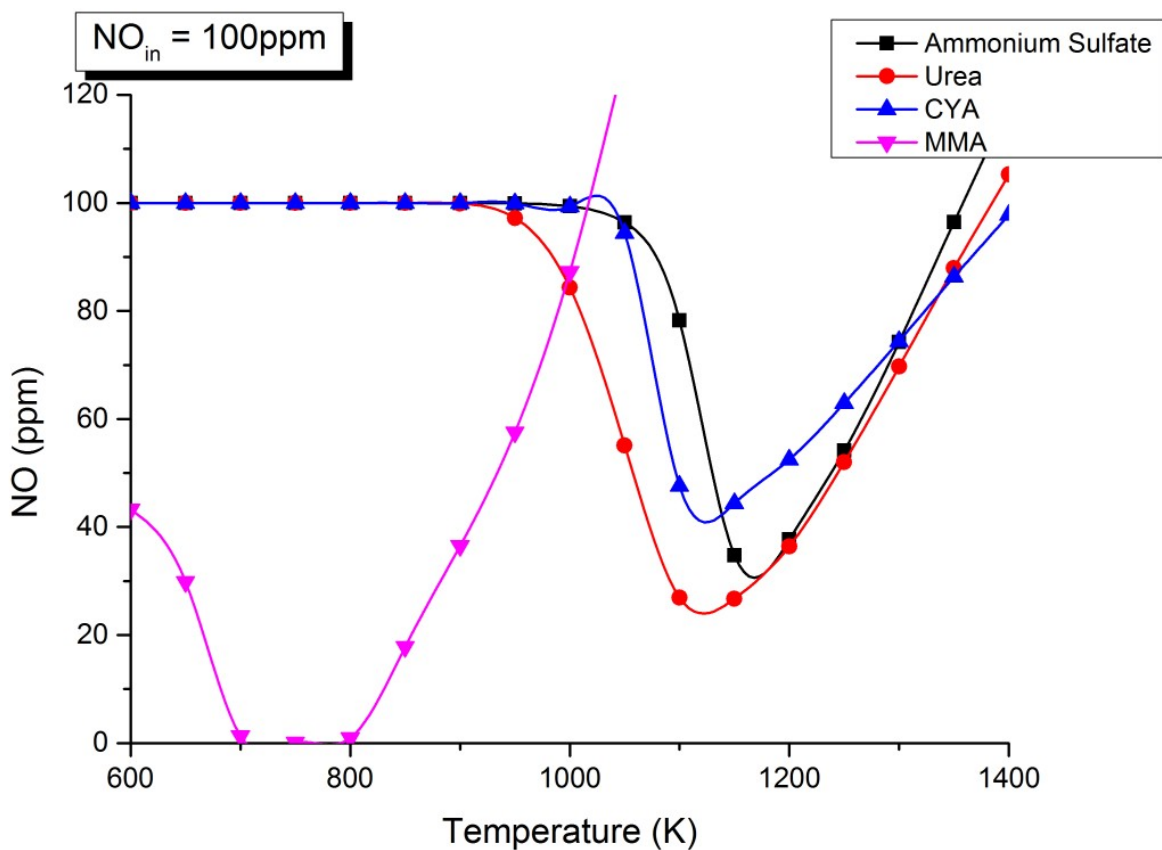
Результати, представлені на рисунку 16, демонструють значну перевагу ММА у зниженні концентрації NO при значно нижчих температурах порівняно з іншими реагентами. Оптимальна температура впорскування ММА становить близько 425 °С, тоді як для інших реагентів цей показник складає близько 825°С. Більш низька робоча температура дозволяє вводити ММА після конвективної трубчастої секції котла, що спрощує конструкцію системи. Ширший температурний діапазон ММА є додатковою перевагою. Однак, слід зазначити, що при використанні ММА спостерігається підвищене утворення NO<sub>2</sub>. Це результати реакцій:



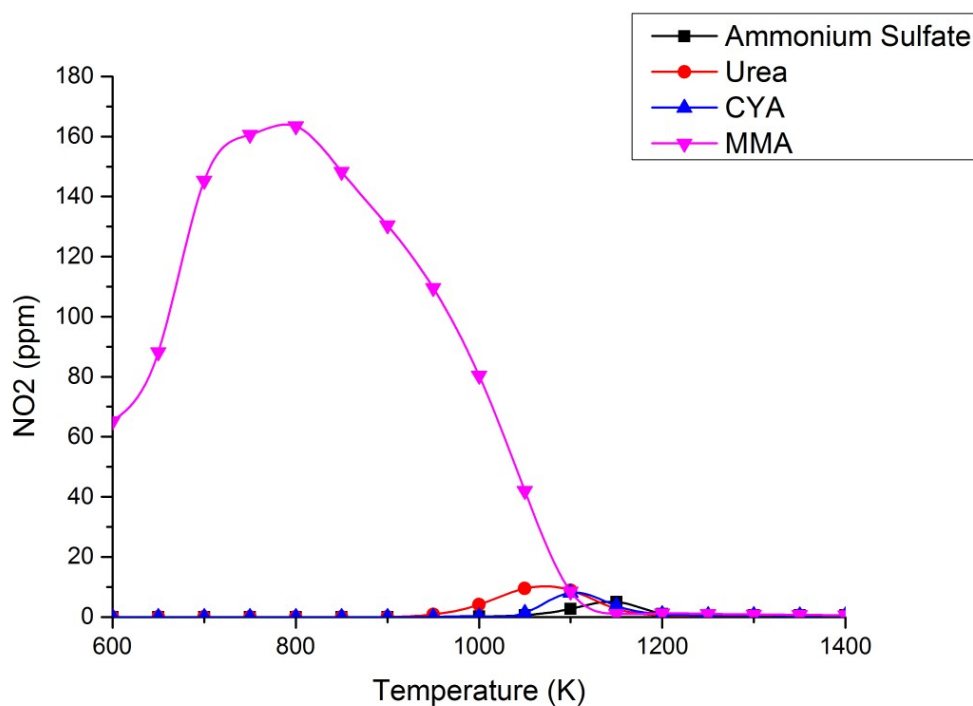
Надлишок HO<sub>2</sub> генерується наведеним нижче шляхом розкладання CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub>:



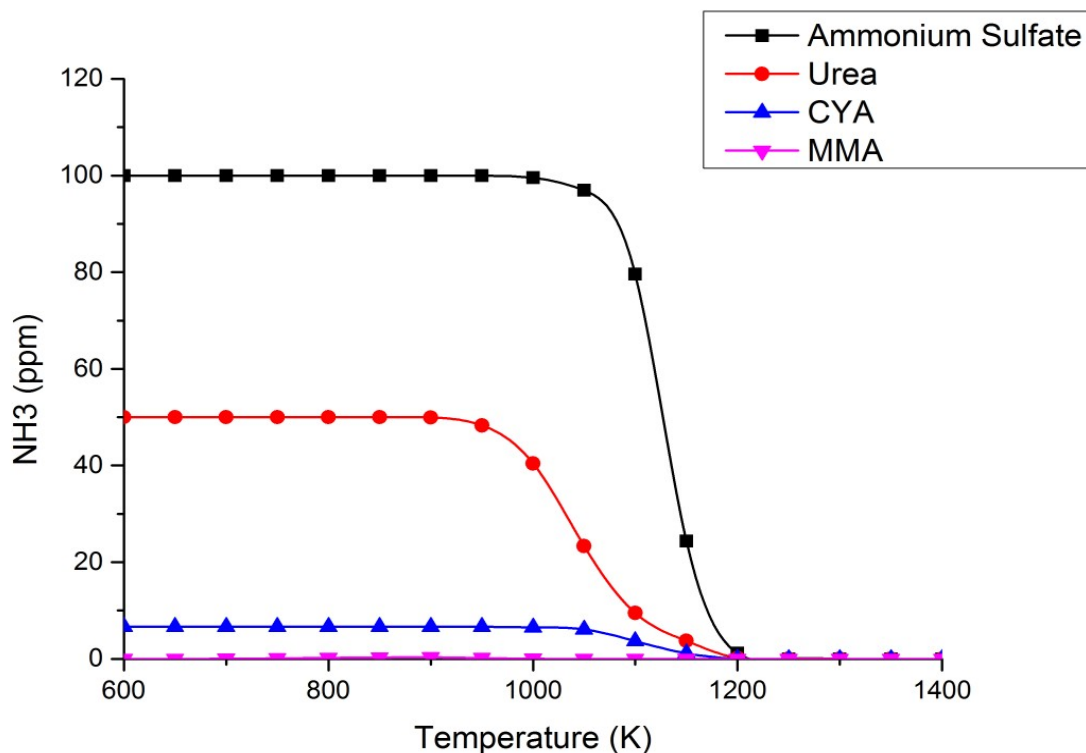
Наукові дослідження показали, що під час процесу очищення диму за допомогою речовини MMA утворюється шкідлива сполука NO<sub>2</sub>. Це відбувається через реакцію між іншими речовинами, які використовуються в цьому процесі. На жаль, утворення NO<sub>2</sub> знижує ефективність очищення повітря. Тому вчені продовжують досліджувати цей процес, щоб знайти способи зменшити утворення NO<sub>2</sub>. Рівень проскоку NH<sub>3</sub> для всіх досліджених реагентів був нижчим за встановлений норматив 5 ppm. Для MMA рівень проскоку NH<sub>3</sub> був стабільним у всьому діапазоні температур, що свідчить про відсутність проблеми проскоку аміаку при використанні MMA в якості реагенту в процесі відновлення NO<sub>x</sub>.



**Рис. 16. Прогнози концентрації NO на виході з використанням різних реагентів, передбачених відповідними моделями кінетики**



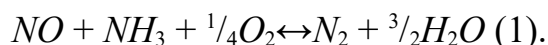
**Рис. 17. Прогнози концентрації NO<sub>2</sub> на виході з використанням різних реагентів, передбачених відповідними моделями кінетики**



**Рис. 18. Прогнози концентрації NH<sub>3</sub> на виході з використанням різних реагентів, передбачених відповідними модель кінетики**

## 2.4. ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ПРИ ЗАСТОСУВАННІ АМОНІЙНОЇ ВОДИ

Для зниження викидів оксидів азоту на існуючих вугільних котлах ТЕС і ТЕЦ перспективним є застосування технології селективного некаталітичного відновлення. Цей метод передбачає введення аміаку в зону температур 1100-850°C, де відбувається реакція відновлення оксидів азоту до молекулярного азоту та води.



Щоб вводити аміак у котел, пропонують використовувати аміачну воду. Це розчин, де вміст аміаку не перевищує 25%. Такий розчин безпечний для використання і зберігання, і не потребує спеціальних заходів безпеки.

Константа газофазної швидкості реакції буде пропорційна добутку концентрацій оксиду азоту та амоніаку:

$$k = k_0 \exp(-E_a/RT) \cdot c_{NO} \cdot c_{NH_3},$$

де  $k_0$  – передекспоненціальний множник, пропорційний кількості зіткнень молекул оксиду азоту та амоніаку;

$E_a$  – енергія активації реакції (1), кДж/моль;

$R$  – універсальна газова стала, 8.31 кДж/(моль·К);

$T$  – абсолютна температура, К.

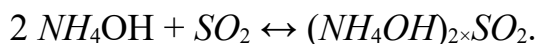
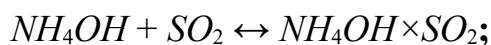
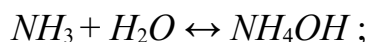
Метод селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) дозволяє очистити до 60% шкідливих оксидів азоту в димових газах. Але для досягнення такого результату важливо, щоб аміак, який використовується в цьому процесі, повністю вступив у реакцію і не потрапив у повітря. Крім того, кількість аміаку має бути меншою за необхідну для повної реакції з оксидами азоту.

Щоб зменшити кількість шкідливих оксидів азоту в димових газах з великого значення (1300-1500 мг/нм<sup>3</sup>) до дозволеного (200 мг/нм<sup>3</sup>), необхідно, щоб очищувальне обладнання було дуже ефективним – воно має очищати повітря щонайменше на 87%.

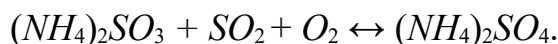
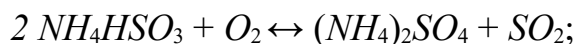
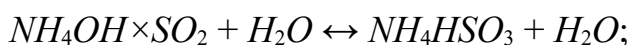
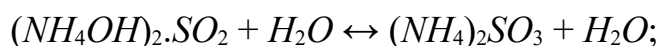
Для досягнення більш високої ефективності очищення димових газів від оксидів азоту можна збільшити мольне співвідношення NH<sub>3</sub>/NO понад 1.

Надлишковий аміак може бути додатково використаний для зв'язування діоксиду сірки в системі сіркоочищення. Експериментальні дані свідчать про те, що збільшення вмісту водяної пари суттєво підвищує ефективність зв'язування діоксиду сірки аміаком у газовій фазі.

При наявності в димових газах водяної пари в кількості, що перевищує вміст аміаку, відбувається реакція утворення сульфіту амонію ( $NH_4OH \times SO_2$ ) та гідросульфіту амонію ( $(NH_4OH)_2 \times SO_2$ ) внаслідок взаємодії аміаку, діоксиду сірки та водяної пари:



При потраплянні цих сполук у краплі водив установах напівсухого або мокрого сіркоочищення відбувається повне їх розчинення з утворенням сульфіту, гідросульфіту і сульфату амонію (в залежності від рН розчину):



Аміак розчиняється у воді набагато краще, ніж діоксид сірки. Тому, коли ми використовуємо воду для очищення димових газів від сірки за допомогою аміаку (цей процес називається мокрою амонійною десульфурізацією), дуже мала ймовірність того, що незареагувавший аміак потрапить в атмосферу.

В установах напівсухої десульфурізації, де аміак взаємодіє з діоксидом сірки для утворення сульфату амонію, кінцевий продукт – це сухий порошок, який має високу цінність як мінеральне добриво. Таким чином, цей процес дозволяє не тільки знизити викиди шкідливих речовин, але й отримати корисний побічний продукт. Застосування амонійної води в таких установах забезпечує виконання вимог Директиви 2010/75/ЄС щодо викидів оксидів азоту та сірки [25].

## 2.5. СХЕМИ СНКВ-УСТАНОВОК

Розглянемо принципові технологічні схеми двох експериментальних азотоочисних установок. Перша установка використовує скраплений аміак як реагент для очищення димових газів. Друга установка базується на застосуванні розчину сечовини. Схеми цих установок наведені на рисунках 19 і 20 відповідно. Ці установки були одними з перших, що демонстрували можливість використання аміаку та його сполук для зниження викидів оксидів азоту [26].

Установки можна розділити на три технологічних вузла:

- склад обладнання для підготовки реагентів залежить від обраного типу реагенту. Для скрапленого аміаку необхідні ємності для зберігання та випарник. Для сечовини – силоси та розчинний вузол. Аміачна вода може зберігатися в ємностях або піддаватися термічній десорбції для отримання газоподібного аміак;
- вузлом дозованої подачі реагенту здійснюється точне дозування реагенту і його подача в зону реакції. Тип дозатора залежить від фізико-хімічних властивостей реагенту. Для скрапленого аміаку використовується регулюючий клапан, для рідких розчинів - дозуючий насос. Після дозування реагент змішується з носієм (пара, повітря, газу рециркуляції) і подається в котел;
- вузлом розподілу суміші реагенту здійснюється введення суміші в топку котла в зону високих температур (900-1100°C). Для цього використовуються розподільні пристрої, такі як сопла, які можуть бути розташовані на стінах або всередині котла. Для захисту розподільних пристроїв від перегріву застосовується охолодження носієм (пара, повітря, газу рециркуляції). Можливі схеми з багатоточковою подачею суміші.

Перші частини системи очищення димових газів досить стандартні і їх проектування не викликає труднощів. Однак, проектування системи, яка вводить очищуючу речовину безпосередньо в котел, є більш складним

завданням. Для цього потрібно провести спеціальні дослідження, щоб визначити:

- де саме в котлі температура найкраще підходить для очищення;
- наскільки велика область з такою температурою (щоб очищення відбувалося достатньо довго);
- як змінюються температура, концентрація шкідливих речовин та швидкість газів в різних місцях котла.

Отримання повного обсягу даних, необхідних для розрахунку оптимальної конструкції вузла розподілу реагенту, є складним завданням. Як правило, конструкція цього вузла уточнюється в процесі пуско-налагоджувальних робіт [26].

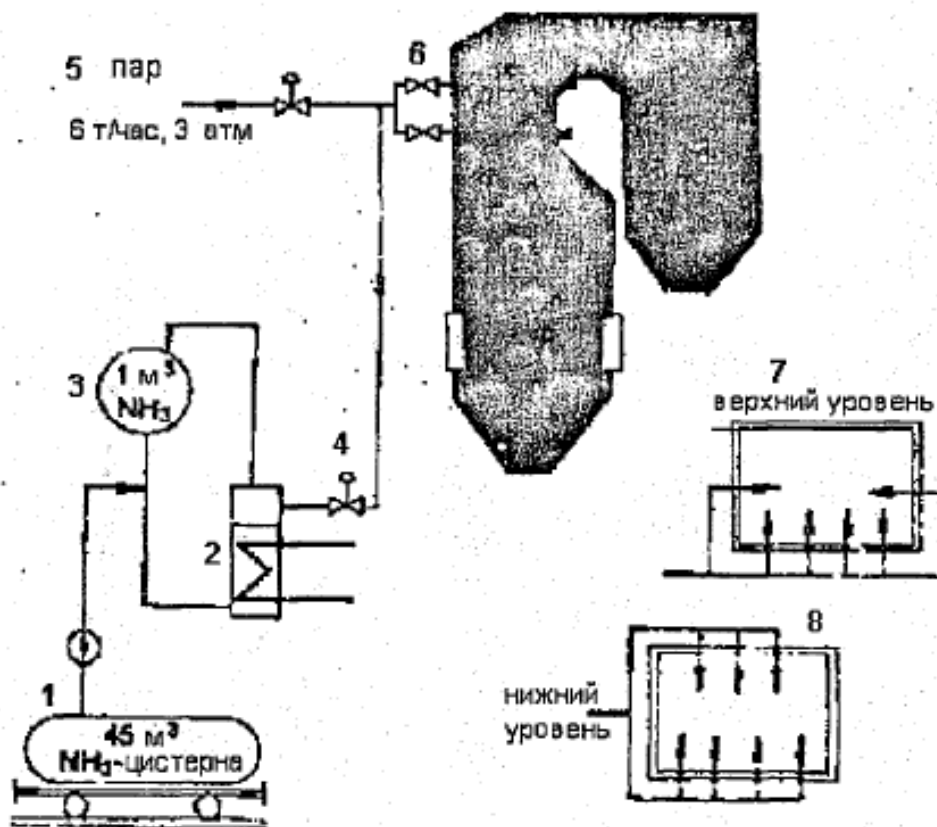
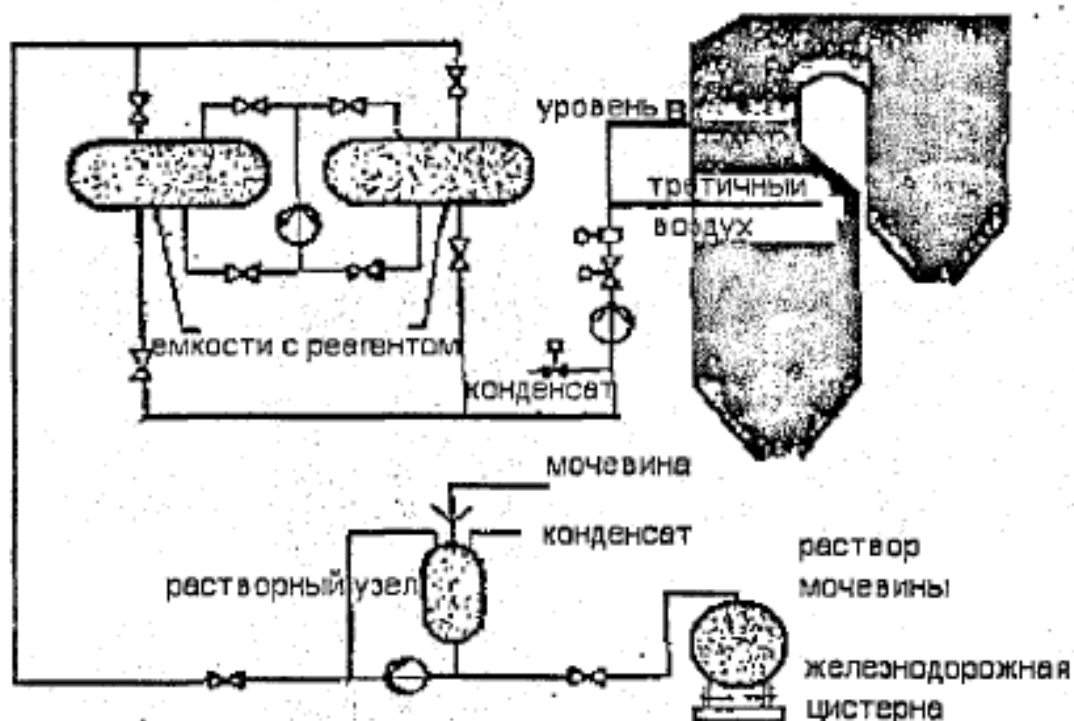


Рис.19. Принципова технологічна схема експериментальної установки

На рис.19 зображена принципова технологічна схема експериментальної азотоочістної установки і розташування форсунок для верхнього і нижнього рівнів роздачі пароамміачної суміші на ТЕС Andra (котел 110Мвт, 330 т / год):

- 1 - ємність для зберігання зрідженого аміаку;
- 2 - випарник аміаку;
- 3 - видаткова ємність з зрідженим аміаком;
- 4 - регулюючий клапан;
- 5 - пар низького тиску;
- 6 - система роздачі реагенту по перетину котла;
- 7 - схема розміщення форсунок на верхньому рівні;
- 8 - схема розміщення форсунок на нижньому рівні.



**Рис.20. Принципова технологічна схема азотоочістної установки з використанням сечовини на ТЕС Andra**

### 3. ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ СНКВ В ТВЕРДОПАЛИВНОМУ КОТЛІ CR800DSS-V LN

#### 3.1.ОПИС ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОТЛА

В роботі розглянуто водогрійний жаротрубний котел на біопаливі фірми "COMPT-E-R", тип CR 800 DSS-V LN одиничною тепловою потужністю не менше 7,0 МВт, що використовується для покриття потреб тепла.

Таблиця 1

#### Характеристика котла CR 800 DSS-V LN

№	Найменування величини	Одиниця виміру	Величина
1	Номінальна теплова потужність	МВт	7,0
2	Коефіцієнт корисної дії, не менше	%	90
3	Допустимий робочий тиск	бар	6
5	Максимальна температура теплоносія, не більш	°С	105
6	Мінімальна температура води на вході в котел	°С	70
7	Габаритні розміри ДхШхВ	мм	8895x3334x10956
8	Діаметр газоходу	мм	900
9	Водяний об'єм котла	м <sup>3</sup>	26,1
10	Гідравлічний опір	мм.в.ст.	1800
11	Робочий діапазон потужності котла	%	30-100
12	Маса котла (без води)	кг	112270

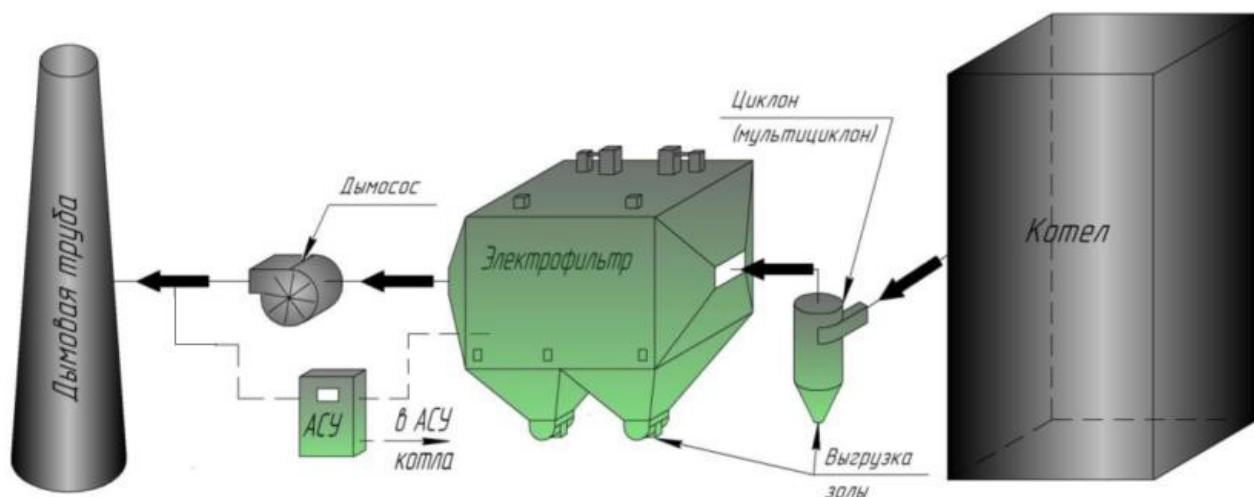
Параметри відпуску теплоносія від котельні до споживача:

- взимку:  $T_1 = 115 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- влітку:  $T_1 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Система газоповітряного тракту складається із системи газоходів, вентиляторів, димососа та димової труби і призначається для видалення з попередньою очисткою димових газів в атмосферу.

Висота димової труби перевищує необхідну висоту визначену на підставі аеродинамічного розрахунку газоповітряного тракту, висоти найближчих будинків, споруд, з умови розсіювання шкідливих речовин в атмосферу.



**Рис. 21. Загальна схема димовидалення та очистки димових газів**

Передбачено очистка димових газів після котла встановлюється мультициклонний фільтр виробництва фірми «СОМРЕ-R» та електрофільтр типу ЕГУ1-8/400-7,2-7/4,48-1-20 виробництва ТОВ «БМЗ» ПРОГРЕС».

Основні технологічні характеристики мультициклона наведені в табл. 2.

**Таблиця 2**

**Технологічні характеристики мультициклона**

№ п/п	Параметр	Характеристика
1	Продуктивність, м3/ч	26400
2	Коефіцієнт очистки, %	95
3	Розрахункова температура, °С	220
4	Аеродинамічний опір, Па	1200
5	Запиленість газів (на виході), мг/м3	не більше 300
6	Маса, кг	2400

Основні технологічні характеристики електрофільтру тип ЕГУ1-8/400-7,2- 7/4,48-1-20 наведені в табл. 3.

## Технічні характеристики електрофільтру

№ пп.	Найменування показника на од. обладнання	Од. вим.	Величина
1	2	3	4
1	Продуктивність газу	м <sup>3</sup> /год нм <sup>3</sup> /год	30 800 17 110
2	Температура газів, що очищаються	°С	130-200
3	Запиленість (зола) на вході	мг/нм <sup>3</sup>	300 мг/нм <sup>3</sup> при 3% О <sub>2</sub> (250 мг/нм <sup>3</sup> при 6%О <sub>2</sub> )
4	Запиленість (зола) на виході	мг/нм <sup>3</sup>	не більше 30 мг/нм <sup>3</sup> при 3% О <sub>2</sub> (не більше 25 мг/нм <sup>3</sup> при 6% О <sub>2</sub> )
5	Кількість ЕФ	шт.	1
6	Кількість секцій	шт.	1
7	Кількість полів	шт.	1
8	Площа перерізу	м <sup>2</sup>	20
9	Висота активного перетину	м	7,2
10	Міжелектродний проміжок	мм	400
11	Кількість газових проходів	шт.	8
12	Активна довжина електродної системи	м	4,48
13	Кількість елементів в осаді електрода	шт.	7
14	Кількість коронуючих елементів в коронуючому електроді	шт.	8
15	Загальна площа осадження	м <sup>2</sup>	516
16	Загальна довжина коронуючих електродів	м	1612
17	Швидкість газу в активному перерізі	м/с	0,37
18	Середня швидкість дрейфу частинок в ел. полі	см/с	3
19	Час перебування часток в активному перерізі	с	12,06
20	Питома поверхня осадження частинок	м <sup>2</sup> /(м <sup>3</sup> /с)	60,3
21	Габаритні розміри корпусу (попередньо)	м	5,5 x 4 x 12
22	Високовольтні агрегати типу «KRAFT» Номинальний струм: I = 300 мА Номинальна напруга: U= 90 кВ (в піку)	Кільк.	1

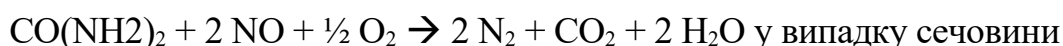
Дія електрофільтру заснована на осадженні заряджених частинок золи в високонапруженому електростатичному полі. Основними конструктивними елементами електрофільтру є система осаджувальних і коронних електродів, корпус, вузли підведення і відведення газів, що очищаються, пристрої для видалення уловленої золи з електродів, пристрої для виведення пилу з електрофільтру, вузли електричного живлення і автоматичної підтримки оптимальної напруги.

### 3.2.СХЕМА DENOX ВИЛУЧЕННЯ NOx В ТВЕРДОПАЛИВНОМУ КОТЛІ CR800DSS-V LN

Розглянемо застосування системи СНКВ DENOX на даному котлі.

Принцип полягає в видаленні NOx, присутнього в димових газах, шляхом приведення його в контакт з відновником. Використовуваний процес - селективне некаталітичне відновлення (SNCR); в якості відновника використовується сечовина "CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>" в рідкій формі.

Загальна хімічна реакція має вигляд :



Процес SNCR здійснюється при температурі від 850 до 1050°C в проміжній камері (див. схему нижче).

Реакції відновлення між розчином сечовини та забруднюючими оксидами азоту (NOx) перетворюють їх на молекули азоту та води.

Розчин сечовини розпилюється стисненим повітрям на виході з інжекторних форсунок, розташованих по обидва боки газового проходу в камері згоряння.

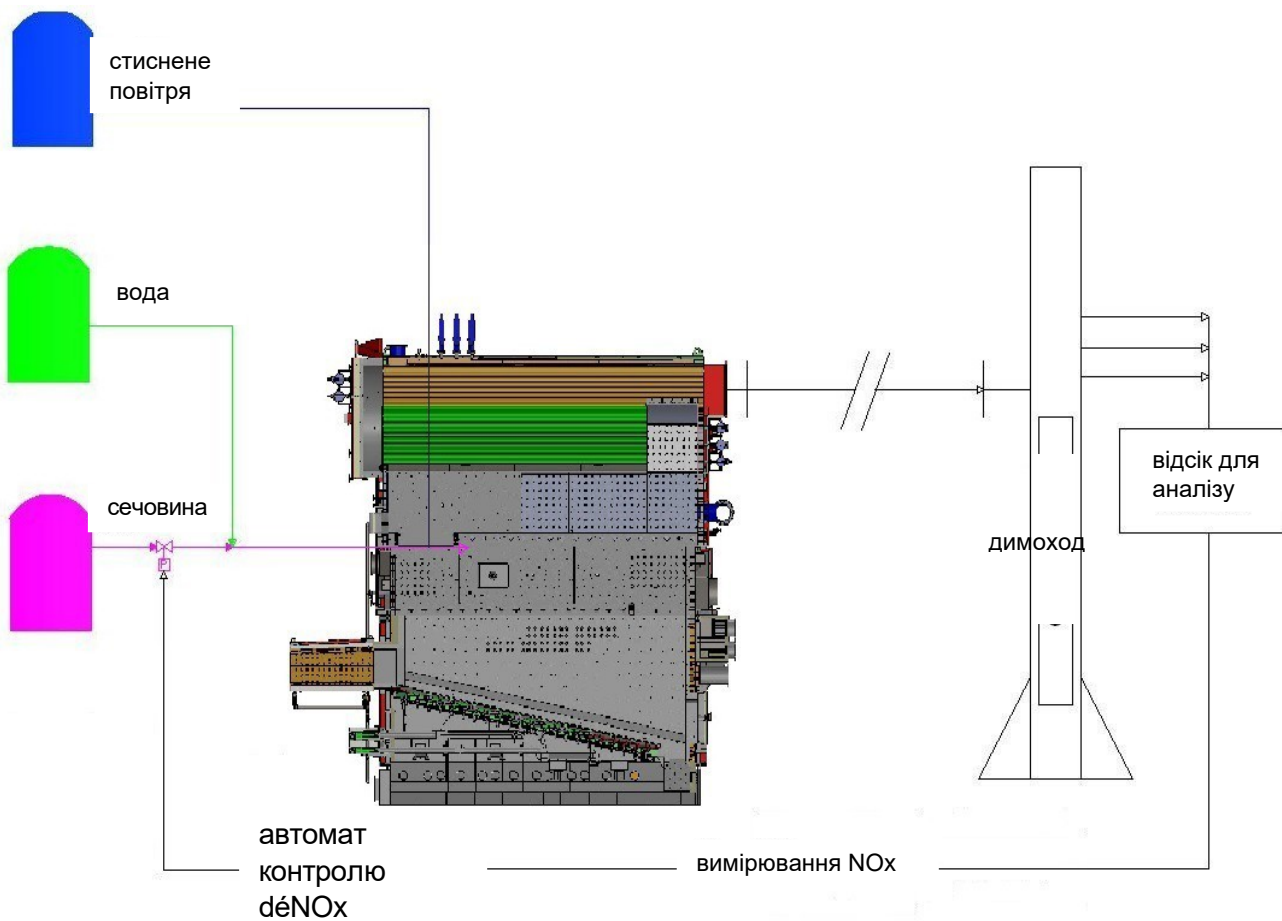
Сечовина зберігається в резервуарі, розміщеному в котельні.

Пом'якшена вода подається в резервуар через поплавковий клапан; насос забирає воду з цього резервуара і вводить воду під тиском по всій системі труб.

Витрата води регулюється автоматичним клапаном відповідно до фіксованого заданого значення потоку, що відповідає сумі потоків води та сечовини.

Тиск стисненого повітря встановлюється на рівні 5 бар за допомогою регулюючого клапана, а фіксована швидкість потоку становить 15 Нм<sup>3</sup>/год на форсунку.

Вода і сечовина змішуються перед подачею в розпилювачі, і на кожному форсунку впорскується повітря для розпилення крапель суміші води і сечовини в камері згоряння.



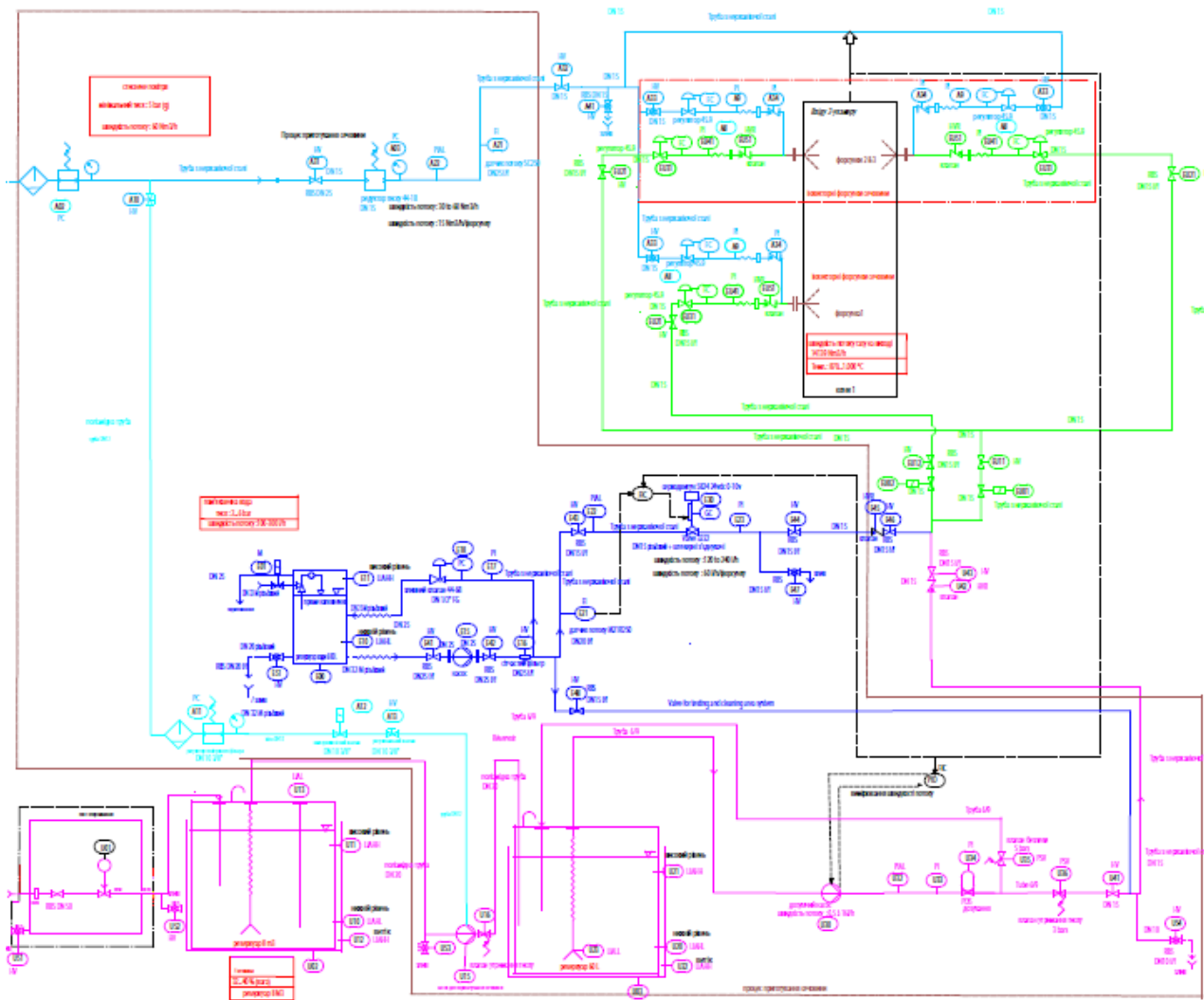
**Рис. 22. Схема DENOX КОТЛА CR800DSS-V LN**

### СХЕМА ТРУБОПРОВОДІВ ТА ПРИБЛАДІВ УСТАНОВКИ DeNOx

Пристрій є зовнішнім по відношенню до котла і оснащений:

- обладнанням, що дозволяє підготувати реагент, готовий до впорскування; він складається з : циркуляції пом'якшеної води, що зберігається в резервуарі для води та подається водяним насосом [EA 20], циркуляції сечовини, що зберігається в резервуарі для сечовини та буферному резервуарі і що живиться дозуючим насосом [UR 30], циркуляції стисненого повітря.
- пристроєм попереднього впорскування, в якому вода і сечовина змішуються і направляються до форсунок для впорскування,
- форсунок для впорскування, де суміш води і сечовини розпилюється в камеру за допомогою стисненого повітря.

Резервуари з водою та сечовиною зберігаються перед обладнанням для їх подачі (рис 23).



**Рис. 23. Схема трубопроводів системи DENOX КОТЛА CR800DSS-V LN**

DeNOx вводиться в експлуатацію, якщо :

- Навантаження котла вище заданого значення,
- Температура в камері вище заданого значення,
- Значення NOx вище заданого значення,
- Кнопка ON на дисплеї шафи DeNOx увімкнена.

На дисплеї шафи DeNOx можна змінювати задані значення.

Дозвіл роботи системи DeNOx здійснюється через Ethernet-зв'язок.

## СИСТЕМА СЕЧОВИНИ

Станція розвантаження [U 1] дозволяє вантажівці подавати сечовину в резервуар для зберігання; електромагнітний клапан зупиняє наповнення резервуара, як тільки досягається високий рівень.

Резервуар об'ємом 8 м<sup>3</sup> складається з датчика високого рівня [U 11], датчика низького рівня [U 10] і датчика витоку [U 12]. Він заповнюється за допомогою вантажівки. Аналоговий детектор [U 13] дозволяє дізнатися про рівень заповнення контейнера і сигналізує про низький рівень, що вимагає нової поставки сечовини вантажівкою.

Перекачувальний насос [U 15] використовується для перекачування сечовини з резервуара об'ємом 8 м<sup>3</sup> в буферний резервуар. Ручний регулювальний клапан [U 12] використовується для управління потоком повітря і, відповідно, подачею сечовини в буферний резервуар.

Цей буферний резервуар також складається з високого рівня [U 21], низького рівня [U 20] і датчика витоку [U 22]. В середині нього знаходиться всмоктувальний насос для живлення насоса-дозатора [UR 30]. Рівень всмоктувального насоса [U 23] повинен бути нижчим за низький рівень буферного резервуара [UR 20], щоб запобігти несправності пристрою SNCR при виявленні цього низького рівня.

Заповнення буферного резервуара дозволяється при дотриманні наступних умов:

- Кнопка заповнення увімкнена,
- Досягнуто низького рівня резервуара,
- не виявлено витоку.

При досягненні високого рівня в буферному резервуарі заповнення припиняється.

Дозуючий насос [UR 30] всмоктує сечовину з буферного резервуара і подає її до форсунок для впорскування; він отримує сигнал 4-20 мА від контролера DeNOx і живиться від мережі 230 В.

Цей дозуючий насос працює, якщо :

- Виконані умови для запуску DeNOx,

- Рівень сечовини в буферному резервуарі не є низьким [U 20],
- дозуючий насос [U 30] не є несправним,
- Водяний насос [E 20] працює належним чином.

В іншому випадку насос перестає працювати

Під час запуску сечовина, що виходить з дозуючого насоса, підтримується під встановленим вручну тиском витримки. Для контролю тиску в трубопроводі використовується датчик тиску на виході [U 32].

## СИСТЕМА ВОДИ

Резервуар для води також містить високий рівень [E 11] і низький рівень [E 10]. Він заповнюється автоматично з системи промивання. Електромагнітний клапан (E 1) подачі води блокує подачу води, якщо натиснута кнопка зупинки або якщо виникла несправність.

Водяний насос [E 15] вмикається одразу після запуску системи DeNOx. Робота водяного насоса повинна відповідати наступним умовам:

- На дисплеї водяного насоса не повинно з'являтися жодних повідомлень про несправності,
- Низький рівень води в резервуарі для води не повинен бути досягнутий,
- Швидкість потоку і тиск повітря вище встановлених значень (див. параграф нижче).

Швидкість потоку води контролюється витратоміром [EA 21], який дозволяє регулювати цей параметр за допомогою регулювального клапана [EA 30]; ця швидкість потоку залежить від робочих параметрів двох електромагнітних клапанів [EU01 та EU02], які визначають кількість використовуваних форсунок. Надлишок води повертається в бак, що контролюється регулятором тиску [EA 18].

Два індикатори тиску [E 22 і E 23] встановлені перед і після клапана регулювання швидкості потоку води [EA 30] для перевірки тиску в трубопроводі.

Щоб запобігти можливим засміченням і, відповідно, проблемам з потоком води, встановлено два мінімальних порогових значення:

- На витратомірі [E 21] з мінімальною витратою 26 л/год.
- На значенні тиску з індикатора потоку [E 22] з мінімальним значенням 4 бар.

Якщо ці порогові значення не дотримуються під час автоматичної роботи DeNOx протягом однієї хвилини, пристрій припиняє роботу.

## СИСТЕМА СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ

Потік стисненого повітря регулюється за допомогою ручного регулятора тиску [A 3]. Датчик тиску [A 22] і витратомір [A 21], встановлені після цього регулятора, дозволяють відображати тиск і швидкості потоку повітря і, таким чином, контролювати регулювання тиску.

На дисплеї шафи відображаються мінімальні порогові значення тиску та швидкості потоку повітря: нижче цих значень пристрій для впорскування сечовини не може працювати.

Регулятори швидкості потоку повітря [A 8], які можна змінювати вручну, слугують для підтримання однакової швидкості потоку повітря для кожної з використовуваних форсунок.

Повітря використовується для розпилення водно-сечовинної суміші, а також для охолодження впорскувальних форсунок. Тому необхідно, щоб циркуляція повітря в контурі до стрижнів була постійною, щоб зберегти їх стан.

## СИСТЕМА СУМІШІ ВОДА/СЕЧОВИНА

Суміш води та сечовини подається в інжекторні форсунки: швидкість потоку цієї суміші можна регулювати для кожної інжекторної форсунки за допомогою регуляторів потоку [EU 31].

### 3.3. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Основний вид: пелета з лушпиння соняшника, кг/год - 1576;

Альтернативна пелета з деревини, кг/год – 608;

Річна витрата твердого біопалива:

- Основний вид: пелета з лушпиння соняшника, т/рік - 11 687,6;

- Альтернативна- пелета з деревини, т/рік - 11 925.

Розраховуємо кількість газів які підлягають очищенню за формулою

$$G_2^k = V_2 \times B_p$$

$$G_2^k = 11,76 \text{ м}^3/\text{кг} \times 1576 \text{ кг/год} = 18533,76 [\text{м}^3/\text{год}]$$

Розмір платежу за викиди в атмосферу забруднюючих речовин стаціонарними джерелами забруднення визначається за формулою (8.2) [30]:

$$П_{BC} = M \times H_{II} \times K_{HAC} \times K_{\Phi}$$

де  $M$  - фактичний обсяг викиду забруднюючої речовини в тонах (т);

$H_{II}$  - проіндексовані нормативи збору (нормативи збору) у поточному році за тону забруднюючої речовини,  $H_{II} = 2574,43$  грн/т (Стаття 243 Податкового кодексу України);

$K_{HAC}$  - коригуючий коефіцієнт, який встановлюється залежно від чисельності жителів населеного пункту,  $K_{HAC} = 1,55$ ;

$K_{\Phi}$  - коригуючий коефіцієнт, який встановлюється залежно від народно-господарського значення населеного,  $K_{\Phi} = 1,25$ .

Річну кількість викидів оксидів азоту котлоагрегатом при їх концентрації у вихідних газах  $C = 400 \text{ мг/м}^3$  розраховуємо за формулою (8.3):

$$M_{NO_x}^2 = G_2^k \times \tau_p \times C \times 10^{-9}$$

$$G_2^k \times \tau_p = 11 687,6 \times 10^3 \text{ кг/рік}$$

$$M_{NO_x}^1 = 11 687,6 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{рік} \times 400 \times 10^{-9} \text{ т/м}^3 = 4,68 \text{ т/рік}$$

Економічний збиток від забруднення без очищення димових газів

$$П_{BC}^1 = 4,68 \times 2574,43 \times 1,55 \times 1,25 = 23 318,9 \text{ грн/рік}$$

Приймаємо зниження викидів оксидів азоту при впровадженні СНКВ – 60%, тоді

$$M_{NO_x}^2 = 4,68 - 60\% = 1,87 \text{ т/рік}$$

Економічний збиток від забруднення з використанням СНКВ

$$\Pi_{BC}^2 = 1,87 \times 2574,43 \times 1,55 \times 1,25 = 9327,7 \text{ грн/рік}$$

Корисний економічний ефект від впровадження СНКВ:

$$\epsilon = \Pi_{BC}^1 - \Pi_{BC}^2 = 23318,9 - 9327,7 = 13991,34 \text{ грн/рік}$$

## ВИСНОВКИ

Впровадження системи СНКВ дозволить виконати вимоги Директиви 2010/75/ЄС щодо рівнів викидів оксидів азоту, зменшивши існуючий рівень викидів до встановлених норм. Також впровадження СНКВ має економічний ефект.

Для потреб системи азотоочищення димових газів котла **CR800DSS-V LN** пропонується використовувати аміак водний технічний 25 % (аміачна вода) – розчин технічного аміаку у воді, негорюча і невибухонебезпечна рідина. Вже готовий розчин буде доставлятися на майданчик ТЕЦ залізничним транспортом.

За рахунок встановлення системи СНКВ економічний ефект від зменшення екологічного податку становить 13 991,34 грн/рік.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Sarofim A.S. and Flagan R.C., *Progress in Energy and Combustion Science*, 2, 1-25 (1976)
- [2] Rosenberg H.S., Curran L.M., Slack A.V., Ando J. and Oxley J.H., *Progress in Energy and Combustion Science*, 6, 287-302 (1980)
- [3] Bowman C.T., *Proceedings of Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, (1992) pp859-878.
- [4] Arand, J. K., Muzio, L.J., and Sotter, J. G., 1980, "Urea reduction of NO<sub>x</sub> in Combustion Effluents." U.S. Patent 4208386.
- [5] Tayyeb Javed, M., Irfan, N., and Gibbs, B. M., 2007, "Control of Combustion - Generated Nitrogen Oxides by Selective Non-catalytic Reduction," *Journal of Environmental Management*, 83(3), pp. 251-289.
- [6] Moo B.C. and Chin F.C., *The Science of the Total Environment*, 198:1, 73-78 (1997)
- [7] Zamansky V.M., Lissianski V.V., Maly P.M., Ho L., Rusli D., and Gardiner W.C.Jr., *Combustion and Flame*, 117, 821-831(1999).
- [8] Poole, D. R., and Graven, W. M., 1961, "Kinetics of the Reaction of Ammonia and Nitric Oxide in the Region of Spontaneous Ignition<sup>1</sup>," *Journal of the American Chemical Society*, 83(2), pp. 283-286.
- [9] Wise, H., and Frech, M. F., 2004, "Kinetics of Oxidation of Ammonia by Nitric Oxide," *The Journal of Chemical Physics*, 22(8), pp. 1463-1464.
- [10] Lee, G. W., Shon, B. H., Yoo, J. G., Jung, J. H., and Oh, K. J., 2008, "The Influence of Mixing between NH<sub>3</sub> and NO for a De-NO<sub>x</sub> Reaction in the SNCR Process," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 14(4), pp. 457-467.
- [11] Muzio, L. J., Arand, J. K., and Teixeira, D. P., 1977, December, "Gas phase decomposition of nitric oxide in combustion products," *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 16, pp. 199-208.
- [12] Lyon, R. K., 1975, "Method for the Reduction of the Concentration of No in Combustion Effluents Using Ammonia." U.S. Patent 3900554 A.

- [13] Azuhata, S., Akimoto, H., and Hishinuma, Y., 1982, "Effect of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> on Homogeneous Gas Phase NO Reduction Reaction with NH<sub>3</sub>," *AICHE Journal*, 28(1), pp. 7-11.
- [14] Lodder, P., and Lefers, J. B., 1985, "Effect of Natural gas, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> and CO on the Homogeneous Gas Phase Reduction of NO<sub>x</sub> by NH<sub>3</sub>," *The Chemical Engineering Journal*, 30(3), pp. 161-167.
- [15] Wenli, D., Dam-Johansen, K., and Østergaard, K., 1989, "The Influence of Additives on Selective Non-catalytic Reduction of Nitric Oxide with NH<sub>3</sub>," *ACHEMASIA*, Beijing, P. R. China.
- [16] Leckner, B., Karlsson, M., Dam-Johansen, K., Weinell, C. E., Kilpinen, P., and Hupa, M., 1991, "Influence of Additives on Selective Noncatalytic Reduction of Nitric Oxide with Ammonia in Circulating Fluidized Bed Boilers," *Industrial & engineering chemistry research*, 30(11), pp. 2396-2404.
- [17] Salimian, S., and Hanson, R. K., 1980, "A Kinetic Study of NO Removal from Combustion Gases by Injection of NHi-Containing Compounds," *Combustion Science and Technology*, 23(5-6), pp. 225-230.
- [18] Jodal, M., Nielsen, C., Hulgaard, T., and Dam-Johansen, K., 1989, "A Comparative Study of Ammonia and Urea as Reductants in Selective Non-Catalytic Reduction of Nitric Oxide," *Achemasia*, Beijing, P. R. China.
- [19] Rota, R., and Zanoelo, E. F., 2003, "Influence of Oxygenated Additives on the NO<sub>x</sub>OUT Process Efficiency," *Fuel*, 82(7), pp. 765-770.
- [20] Perry, R. A., and Siebers, D. L., 1986, "Rapid Reduction of Nitrogen Oxides in Exhaust Gas Streams," *Nature*, 324(6098), pp. 657-658.
- [21] Perry, R. A., 1988, "NO Reduction Using Sublimation of Cyanuric Acid," U.S. Patent 4731231.
- [22] Jolley, L. J., 1934, "The Thermal Oxidation Of Methylamine," *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, pp. 1957-1966.
- [23] Emeléus, H. J., and Jolley, L. J., 1935, "Kinetics Of The Thermal Decomposition of Methylamine," *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, pp. 929-935.
- [24] Chen, S. L., Cole, J. A., Heap, M. P., Kramlich, J. C., McCarthy, J.

M., and Pershing, D. W., 1989, December, "Advanced NO<sub>x</sub> Reduction Processes Using-NH and-CN Compounds in Conjunction with Staged Air Addition," Symposium (International) on Combustion, Vol. 22, pp. 1135-1145.

[25] Вольчин І. А. Перспективи застосування амонійної води для зниження викидів забруднюючих речовин на ТЕС. УДК 66.074.5. Тези доповідей, Проблеми експлуатації обладнання, модернізації і технічного переоснащення енергетичних установок, Секція 3, , ,

[26] Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук «Разработка и освоение технологии очистки дымовых газов тэс от оксидов азота методом селективного некаталитического восстановления аммиаком», Алфеев Альберт Андреевич, Москва 1999 г

[27] Липов, Ю.М. Котельные установки и парогенераторы: учебник для вузов/ Ю.М. Липов, Ю.М. Третьяков. – М.: 2011

[28] Тепловой расчет котлов: нормативный метод – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство НПО ЦКТИ, 2010.

[29] Александров, А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара/А. А. Александров, Б. А. Григорьев. – М.: Изд-во МЭИ, 2012.

[30] Інструкція про порядок обчислення та сплати збору за забруднення навколишнього природного середовища, затверджена наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України, Державна Податкова Адміністрація України від 19.07.1999 №162/379