

УДК 504.61:621.311.22

М.П.Кулик, к.т.н.

АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА МЕТОДІВ ЗМЕНШЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Проведений аналіз технологічних процесів теплової енергетики, як забруднювача атмосферного повітря. Показано, що найбільш небезпечними забруднювачами атмосферного повітря є не тільки процес помолу твердого палива, а також процес його спалювання. Апаратні методи зменшення об'єму забруднюючих речовин є досить ефективними, але перспективнішими є методи зменшення шкідливих речовин в джерелі виникнення. При цьому можна підвищити коефіцієнт корисної дії ключового блока – паливні.

Ключові слова: шкідливі викиди, продукти згорання, рециркуляція димових газів, двохстадійне спалювання, паливник, відновлення окислів азоту,

Вступ.

Основою сучасної енергетики є теплові електростанції (ТЕС), які виробляють майже 50 % всієї електроенергії, а теплоелектроцентралі (ТЕЦ) також є основними виробниками тепла, тому їх розташовують поблизу великих міст та промислових центрів.

На сьогоднішній день у світі має місце різке зменшення запасів рідкого та газоподібного палива, що поступає на ТЕС, які працюють на твердому паливі, мають хорошу часову перспективу, адже запасів кам'яного вугілля, при теперішньому рівні споживання повинно вистачити на 400 – 450 років.

Постановка проблеми.

Коефіцієнти використання палива на ТЕС (коефіцієнти корисної дії) є невисоким і на сучасних теплоелектростанціях сягає 40%, а на ТЕС, які побудовані 30-40 років цей коефіцієнт не перевищує 30-35 %. Разом з тим ТЕС у кожному регіоні України належать до потенційно небезпечних об'єктів з точки зору охорони навколишнього середовища, крім того по зношеності основного технологічного устаткування, яке здебільшого вичерпало свій нормативний ресурс, є не тільки лідерами по викидам величезної кількості шкідливих інгредієнтів в атмосферу, а також джерелами теплового забруднення, а також забруднюють ґрунти на території розташування ТЕС. Газоподібні продукти згорання органічного палива, що використовується на ТЕЦ, ТЕС та котельнях [1-4] спричиняють парниковий ефект та призводять до кліматичних змін.

Окремою проблемою місцевості є підвищене споживання величезної кількості повітря, яке йде на спалювання вугілля, інколи досить низької якості, що потребує ще більшої кількості повітря і призводить до утворення так званої «кисневої ями».

Виділення не вирішеної задачі.

Процес виробництва теплової та електричної енергії можна розділити умовно на такі типові технологічні процеси:

- помол вугілля в млинах до необхідних розмірів (тонини та дисперсності);
- спалювання підготовленого вугілля в котельному агрегаті з втратою теплоти з димовими газами;
- отримання перегрітої водяної пари високих параметрів нагрівом спеціально підготовленої води в котлах;
- розширення перегрітої водяної пари (робочого тіла) у паровій турбіні з виробленням певної кількості механічної енергії;
- генерування електричної енергії електричним генератором турбіни.

В процесі помолу вугілля в млинах основним небезпечним для навколишнього природного середовища інгредієнтом є вугільний пил, кількість викидів якого з організованих джерел залежить від герметичності технологічного устаткування. При зберіганні та транспортуванні вугілля після операції помолу також має місце виділення вугільного пилу. Для зменшення таких викидів використовуються різноманітні емульсії на основі синтетичних полімерних

матеріалів, відходів целюлозно-паперового виробництва та продуктів і відходів нафтопереробки. Найбільш дешевими та простими по складу є водомазутні емульсії у співвідношенні один до одного. Поверхнево-активні речовини, які містяться у мазутних відходах утворюють міцну плівку, яка зв'язує дрібні фракції вугілля. В подальшому всі компоненти згорають і не впливають на рівень небезпеки газових викидів.

При спалюванні вугілля в котельних агрегатах (ТЕЦ, ТЕС та котельнях) в атмосферу поступає величезна кількість токсичних речовин, серед яких тверді шкідливі компоненти, зокрема, зола потрапляння якої в повітря та ґрунти впливає негативним чином на навколишнє середовище.

Збитки завдані забрудненням повітря населенню, житловим та промисловим будівлям, врожайності сільськогосподарських культур (особливо садовим деревам, лісам і паркам) складають декілька мільярдів доларів в рік і заходи по захисту повітряного басейну від забруднень в цілому для економіки окремої держави не можуть бути збитковими.

При спалюванні вугілля в котельних агрегатах (ТЕС, ТЕЦ, промислових печах та котельнях) в атмосферу поступає велика кількість токсичних речовин, до яких відносяться:

- тверді частинки – пил, зола, сажа;
- шкідливі гази – оксиди сірки (SO_2 , SO_3); оксиди азоту (NO , NO_2); оксид вуглецю (CO);
- оксиди деяких важких металів, що можуть знаходитись у вхідній сировині.

На сучасних теплових електростанціях потужністю, наприклад 2400 Мвт спалюється за добу до 20 тисяч тонн вугілля і при цьому викидається близько 100 тонн твердих частинок і до 120 тонн окислів азоту.

Сучасні електрофільтри можуть [5,6]забезпечити ступінь очистки повітря від твердих частинок на рівні 99.9 %, але у випадку ТЕС фільтри мають бути із високоякісної сталі і вагою до 2 тис. тонн, вартість яких може становити до 50 млн. доларів.

Викиди оксидів азоту можна зменшити на етапі спалювання вугілля шляхом модернізації котлоагрегатів, зокрема вдосконалюючи конструкцію пальників[7] для спалювання вугільного пилу.

Зменшення утворення оксиду вуглецю можна досягти інтенсифікацією процесу спалювання, але об'єми його утворення лімітуються коефіцієнтом надлишку повітря, так як процес згорання органічного палива ведеться при надлишку повітря більше 1.

Технологічні процеси отримання перегрітої водяної пари, розширення її в паровій турбіні і генерування електричної енергії генератором є в меншій ступені екологічно небезпечними, але небезпечні фактори, що характерні для них, можуть бути небезпечними для обслуговуючого персоналу та працівників, задіяних в проведенні ремонтно-профілактичних робіт.

Із вищенаведеного витікає, що найбільш небезпечним для довкілля є технологічний процес спалювання вугілля в паливній котельній агрегаті. Всі продукти неповного згорання органічного палива є шкідливими, але на сучасному технічному рівні обсяги утворення шкідливих речовин можна звести до певного мінімуму і забезпечити вимоги природоохоронного законодавства.

Токсичність всіх шкідливих речовин визначається гранично допустимою концентрацією (ГДК), яка може бути максимально разовою і середньодобовою. Крім того, в деяких ситуаціях використовується таке поняття, як гранично допустимий викид, що представляє собою такий валовий викид шкідливого інгредієнта від окремого одиночного джерела викиду, при якому завдяки існуючим умовам розсіювання на межі санітарно-захисної зони забезпечується така концентрація шкідливого інгредієнта, яка не перевищує значення ГДК. Для деяких продуктів згорання такі значення гранично допустимих концентрацій приведені в таблиці 1.

Значну кількість сірчистого ангідриду, що може утворитися в процесі спалювання можна зменшити попередньою очисткою кам'яного вугілля від сполук сірки, або зв'язуванням сірчистого ангідриду при допомозі вапняку в разі спалювання вугілля в киплячому шарі.

Серед приведених в таблиці 1 характеристик витікає, що найбільш небезпечним інгредієнтом є діоксид азоту. Зменшення кількості його викидів при збільшенні потужності енергетичних блоків і виробленої із тої ж кількості спалюваного вугілля може зменшити екологічне навантаження на навколишнє середовище об'єктів теплової енергетики.

Таблиця 1

ГДК продуктів згорання вугілля в повітрі населених пунктів.

Шкідливий інгредієнт	Концентрація (мг/м ³)		Клас небезпеки
	Максимально разова	Середньо - добова	
Пил вугільний	0,5	0,15	3
Сірчистий ангідрид	0,5	0,05	3
Оксид вуглецю	5,0	3,0	4
Діоксид азоту	0,085	0,04	2
Сажа	0,15	0,05	3

Шляхи вирішення поставленої задачі.

Механізм утворення окислів азоту детально розглянутий в роботах [8,9]. Із аналізу основних факторів впливу на їх утворення витікають і основні методи направлення на зменшення утворення даних окислів в паливні. До таких методів відносяться: - рециркуляція димових газів в паливню; двох- стадійне спалювання палива, подача води чи водяної пари в зону горіння; використання пальників спеціальної конструкції; відновлення окислів азоту шляхом подачі аміаку.

Кожен із приведених методів характеризується своїми конкретними перевагами та недоліками.

Рециркуляція димових газів в паливню. По результатам перевірки в промислових умовах впливу рециркуляції димових газів на утворення окислів азоту можна зробити наступні висновки:

а) ефективним способом зниження утворення окислів азоту в паливні є рециркуляція димових газів в повітропровід подачі повітря, що подається на спалювання палива чи в пальник;

б) ефективність зниження утворення окислів азоту від рециркуляції зростає при високих навантаженнях котлів і коефіцієнту рециркуляції (тобто відношення об'єму рециркуляційних газів до загального об'єму газів є меншим 20%);

в) використання рециркуляції димових газів і подача в загальний канал чи в канал первинного повітря на котельний агрегат, який вже оснащений рециркуляційними димосмоками і каналами, вимагає незначної реконструкції і може знайти широке застосування ;

г) ефективність рециркуляції тим більша, чим вища температура в зоні горіння, при цьому вона знижується при зменшенні навантаження котельного агрегату; збільшенні коефіцієнта надлишку повітря; зменшенні температури згорання палива та підвищенні вмісту азотовмісних сполук в паливі. Максимальна ефективність рециркуляції досягається при спалюванні природного газу і невеликих значень коефіцієнта надлишку повітря. При подачі одного відсотка газів рециркуляції коефіцієнт корисної дії котельного агрегату електростанцій для номінальних умов дещо підвищується

Двохстадійне спалювання палива. Суть методу спалювання палива в дві стадії полягає в тому, що в первинну зону згорання подається повітря менше, ніж необхідно теоретично ($\alpha = 0.7 - 0.9$), в результаті чого відбувається зниження максимальної температури в зоні факела, зниження вмісту кисню в ядрі факела, зменшення швидкості реакції утворення окислів азоту.

Масштабна перевірка спалювання палива в дві стадії на котельних агрегатах вітчизняного та зарубіжного виробництва дозволяє зробити такий висновок:

- двохстадійне (або багатостадійне) спалювання палива є дешевим, надійним і практично універсальним методом зниження виходу окислів азоту при спалюванні природного газу, мазуту та вугілля;

- при спалюванні природного газу і мазуту стадійний процес спалювання може бути організований шляхом подачі меншої від розрахункової кількості повітря в окремі пальники (чи в ряди пальників) і надлишкової кількості повітря в пальники, що розташовані вище; або шляхом створення спеціальних пальників для спалювання в дві стадії.

Метод стадійного спалювання перевірений протягом двох-трьох років в експлуатаційних умовах на котлах ТП-100 енергоблоків 200 Мвт і ТП-92 енергоблоків (!%) Мвт., та котлах ПТВМ і може бути рекомендований до застосування. В той же час досить перспективним є розроблений в Європі паливний пристрій для спалювання вугілля в три стадії.

Подача води чи водяної пари в зону згорання. Подача води чи водяної пари в зону згорання приводить до зниження утворення окислів азоту так як водяна пара впливає на кінетику їх утворення. Крім того така подача пари інтенсифікує реакцію згорання і забезпечує догорання оксиду вуглецю за рахунок додаткової кількості гідроксильного радикалу ОН.

Цікавим методом (і практичного мало затратним) є використання подачі водяної пари, так як вона впливає на кінетику утворення окислів азоту і знижує їх утворення.

Подача води чи водяної пари в зону згорання для зниження утворення оксидів азоту викликає значне зацікавлення із наступних міркувань:

а) витрата подавляючого компоненту є порівняно невеликою, та не потребує побудови трубопроводів великого діаметра, як це необхідно при подачі газів рециркуляції, а значить процедура є відносно дешевою;

б) позитивним впливом води або пари в зоні горіння є не тільки зниження утворення оксидів азоту, а догорання у факелі оксиду вуглецю і 3,4-бензапірену;

в) можливість використання при спалюванні твердого палива.

Використання пальників спеціальної конструкції. Що стосується використання спеціальних пальників з пониженим утворенням оксидів азоту, то треба звернути увагу на такі конструкції:

- пальники двохстадійного спалювання розроблені інститутом технічної теплофізики АН України для промислових котлів;

- пальники двохстадійного спалювання для котлів ПТ ВМ ;
- пальники двохстадійного спалювання промислових енергоблоків ;
- пальники з рециркуляцією для котлів промислових енергоблоків;
- щільніні подові пальники промислових і опалювальних котлів.

Відновлення окислів азоту шляхом подачі аміаку Розвиток промисловості і енергетики в містах з великою концентрацією виробництв (підприємств), де фонові значення шкідливих інгредієнтів вже близькі до значень ГДК, привело до пошуків нових методів очищення димових газів від оксидів азоту. Найбільший розвиток очищення димових газів від оксидів азоту отримали різноманітні методи, що застосовуються в хімічній промисловості.

Ці методи можна поділити на три основні групи:

а) окислення, що забезпечує окислення оксиду азоту в діоксид азоту з наступним поглинанням різними адсорбентами;

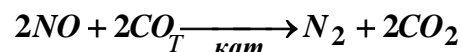
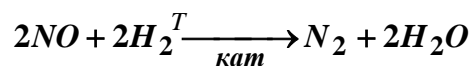
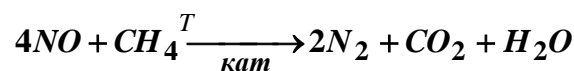
б) відновлення, що забезпечує відновлення оксиду азоту до азоту і кисню з застосуванням каталізаторів:

в) адсорбційні процеси, основані на поглинанні оксидів азоту різними сорбентами (наприклад, адсорбція діоксиду азоту цеолітами, торфом, водними розчинами лугів).

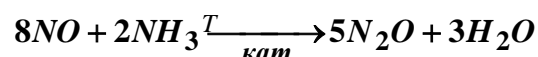
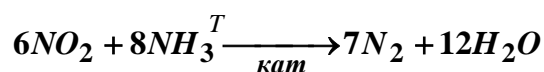
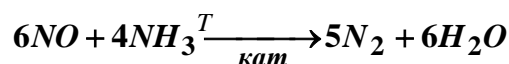
Для очищення димових газів застосовуються відновлювальні методи. Однак очищення димових газів шляхом відновлення оксиду азоту до азоту і кисню на каталізаторах є складним технічним завданням в зв'язку з наступним:

- наявність в димових газах золи, оксидів сірки, що забруднюють і отруюють каталізатор;
- необхідність використання на каталізаторі більш високих температурних режимів ніж за системою золотловлювання (близько 400 °С).

Методи відновлення оксиду азоту природним газом, воднем або оксидом вуглецю базуються на наступних реакціях:



У зв'язку з тим, що всі ці відновлювачі можуть вступати в реакцію з оксидами азоту тільки при відсутності кисню в продуктах згорання, використання останніх при значеннях температурі 250 - 400 °С при наявності каталізатора не знайшли широкого застосування в котлах, головним чином у зв'язку з тим що аміак є єдиним доступним відновлювачем оксиду азоту до азоту (або малотоксичної закиси азоту) при наявності кисню:



Дослідження відновлення оксиду азоту в димових газах мартенівських печей ще в 70-х роках ХІХ ст. було проведено в Донецькому філіалі ВНДІПЧорметенергоочистка. Димові гази мали наступний склад (% об.): - $CO_2 \longrightarrow 5 \div 10$; $O_2 \longrightarrow 10 \div 15$; $SO_2 \longrightarrow 0.04$; $CO \longrightarrow 0.1$ а

$NO_x \longrightarrow 0.01 \div 0.15$, решта N_2 і H_2O .

Відновлення оксиду азоту до азоту і кисню проводилось на каталізаторі з п'ятиокису ванадію, який насичений активним γ - оксидом алюмінію (каталізатор АВК-10), який мав вигляд гранул 1-5мм і був стійкий до дії сірчистих сполук.

Виконання досліджень на нерухомому шарі каталізатора при не запиленому газі (концентрація пилу менше 100 мг/м^3) показали, що при коефіцієнті надлишку аміаку $1,05 \div 1,17$ забезпечується зниження оксидів азоту в димових газах з 0,05 до 0,01%.

Спроби забезпечити відновлення оксидів азоту в запиленних газах (до 10 г/м^3) на тому ж каталізаторі, що знаходиться у врівноваженому стані, не дали позитивних результатів. Навіть при продувці стиснутим повітрям кожні 8-12 годин ступінь очистки була не вище 25%, так як активність каталізатора знижувалась із-за адсорбції пилу.

Донецьким філіалом ВНДІПЧорметенергоочистка були проведені промислові дослідження з відновлення оксидів азоту аміаком в котлі з паропродуктивністю 20 т/год , що працює на коксовому газі.

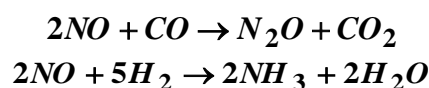
Конструктивно аміачно-каталітична очистка здійснюється наступним чином. В потік димових газів між економайзером і повітрянагрівачем котла, вводиться колектор – перфорована труба, через отвори в якій поступає аміак. На відстані $0,5 - 1,5 \text{ м}$ від неї розташована касета з каталізатором

(V_2O_5). Одна з головних задач в цьому методі – зниження гідравлічного опору каталізатора.

В США, ФРГ і особливо Японії, починаючи з кінця 70-х років минулого століття, аміачно-каталітичний метод досить широко використовувався для очистки від NO_x димових газів котлів енергоблоків і ряду міських ТЕЦ. Ступінь відновлення складає 71-95%. Недоліком цього методу є викид в атмосферу з продуктами згорання надлишкового аміаку, що підвищує токсичність продуктів згорання. При цьому опір шару каталізатора невисокий і складає $245 - 390 \text{ Па}$.

Використовується різне виконання каталізатора у вигляді пластин, таблеток і сот. Зменшення ступені відновлення пояснюється в значній мірі тим, що поряд з азотом утворюється і N_2O .

Треба зазначити, що викид N_2O і аміаку спостерігається і при відновленні оксиду азоту на каталізаторах продуктами згорання, наприклад, у вихлопних газах автомобіля.



Вартість очистки газів шляхом відновлення аміаком перевищує вартість очистки методом рециркуляції так і методом двохстадійного спалювання $10 - 30$ раз.

Іншим напрямком очистки димових газів є пряме вдування аміаку в паливню, що дає найбільший ефект в області температур $950 - 1000^\circ\text{C}$. Цей процес, розробка якого вперше була почата фірмою "ЕССО", дозволяє відмовитись від застосування каталізатора.

Дослідження, які були проведені при безпосередньому введенні аміаку в паливню в області температур $850 - 1200^\circ\text{C}$ показали, що ступінь відновлення NO залежить від ряду факторів, основні з яких

- температура, співвідношення NH_3 / NO , концентрація NO , час реакції.

Роботи, що були проведені в ВТІ ім. Ф.Е. Дзержинського, показали що необхідно не лише підтримувати співвідношення NH_3 / NO в межах $0,5$ з відхиленням не більше 10% , але подавати аміак рівномірно по перерізу газоходу. Використовуючи котли БКЗ – $160 - 100 \text{ ГМ}$ Кіровокавської ТЕЦ, ВТІ ім. Ф.Е. Дзержинського і Харківського філіалу Главенергоремонту, було розроблено схеми подачі аміаку в суміші з паром (через розподільчий пристрій в районі ширмового перегрівача) з газами рециркуляції через сопла в стінках газоходу поворотної камери. Ступінь

очистки на дослідно – промисловій установці складає 70 – 75%.

В останній час робились спроби використання інших присадок (крім NH_3) до палива з метою зниження виходу оксиду азоту при згоранні. Але, враховуючи проведені фірмою “ESSO” ґрунтовні дослідження, очікувати значного (більше 30%) зниження виходу оксидів азоту за рахунок використання інших присадок не слід.

У кінці 1982 р. на Молдавській ГРЕС була введена в експлуатацію дослідно – промислова установка очистки димових газів від оксидів сірки і азоту, яка розроблена ВТІ. Метод оснований на окисленні NO і SO_2 до N_2O_5 і SO_3 , які потім розчиняються у воді. Розчини цих кислот нейтралізуються аміаком, в результаті чого вдається отримати сульфат амонію і аміачну селітру, які можна використовувати як добрива. Установка збудована на енергоблоці 200 МВт, що працює на вугіллі АШ і розрахована на очистку від 90% NO_x і 80% SO_2 і витрату 25 %-го розчину аміаку. Одним із суттєвих недоліком такої установки є істотна корозія обладнання.

Останнім часом в тепловій енергетиці України дискутується проблема використання комбінованих парогазових енергетичних установок [10,11]. Використання комбінації парового та газового циклу може мати перспективу як в екологічному плані, так і в технологічному. Основною перевагою такої комбінованої установки є підвищення вихідного коефіцієнта корисної дії на 10 % і більше. Таке зростання ефективності приведе до збільшення загальної потужності, при цьому питомі валові викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря. Слід зауважити, що в цьому випадку для роботи газової частини енергетичної установки не використовується дороге газотурбінне паливо, а газова турбіна працює на продуктах газифікації твердого палива [12] Газифікація вугілля проводиться за різноманітними схемами, в тому числі і в циркуляційному киплячому шарі.

Висновки.

Підсумовуючи вищезазначене треба підкреслити, що відомі методи зменшення екологічної небезпеки теплової енергетики можуть забезпечити необхідний рівень викидів шкідливих речовин, але витрати на апаратну очистку газів тільки від оксидів азоту є досить дорогими. Методи зменшення шкідливих викидів в джерелі виникнення є значно ефективнішими та менш затратними. Орієнтовно, апаратні методи мінімум як на 1-2 порядки перевищують вартість методів зменшення їх в джерелі утворення. Вирішуючи задачу зменшення утворення шкідливих речовин в джерелі виникнення можна паралельно досягнути підвищення ефективності ключового технологічного процесу – спалювання палива та подальшої передачі теплоти теплоносію.

Список літературних джерел.

1. Рихтер Л.А., Волков Э.П. Охрана водного и воздушного бассейна от выбросов ТЭС. М.: Энергоиздат, 1981.
2. Охрана окружающей среды. Под ред. Белова С.В., М.: Высшая школа, 1991
3. Катин В.Д., Маслцова Т.Г. Защита атмосферы от выбросов вредных веществ из трубчатых печей и котлов на НПЗ. М.: Тематический обзор, ЦНИИПИнефтехим, 1988.
4. Бузников Е.Ф., Верес А.А., Грибков В.Б. Пароводогрейные котлы для электростанций и котельных. М., Энергоатомиздат., 1989.
5. Здановский В.Г., Молчанов В.М., Федоренко Г.М. Пути повышения эффективности электрофильтров ТЭС Украины.// Новости энергетики.-2003,-№5,-с. 17-25
6. Здановский В.Г. Создание предпосылок для технического перевооружения электрофильтров крупных ТЭС Украины.//Электрические сети и системы.- 2004,-№1-2.- с.71-75/
7. Здановский В.Г. Модернизация котлоагрегатов тепловой электростанции. К., «Техника», 1990,104с.
8. Шницер И.Н., Литовкин В.В. Образование и снижение содержания окислов азота в пылеугольных котлах. К., Техника, 1986, 109с.
9. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Л., Недра, Ленинградское отд. 1988., 311с.
10. Кулик М.П. Підвищення ефективності роботи комбінованих паро газотурбінних енергетичних установок та зменшення забруднення навколишнього середовища.// Вісник Вінницького політехнічного інституту. -2005,№5, с. 107-110.
11. Здановський В.Г. Перспективи застосування парогазових установок з врахуванням особливостей енергетики України.// Наукове видання ”Теплова енергетика – нові виклики часу”, за заг. ред. Омеляновського і Мисака Й., с.235-242.
12. Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І., Гапонич Л.С., Чернявський М.В., Топал О.І., Засядько Я.І. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України.// Київ, 013308с. .