УДК 62.784.2 : 620.93

Дубовенко К.В.

Технологічні перспективи застосування імпульсної енергетики для плазмохімічного очищення повітря

За останні десятиріччя вплив діяльності людини на навколишнє середовище призвів до глобальних негативних наслідків. Зараз щорічно в атмосферу Землі викидається біля 150 млн. т оксиду сірки та більш як 50 млн. т оксидів азоту. Тільки енергетичне обладнання щорічно викидає в атмосферу більш як 200 млн. т попелу та біля 60 млн. т сірчаного ангідриду. Енергетика і транспорт є головними чинниками антропогенного впливу на атмосферу, оскільки споживання енергії людством прямо чи побічно визначає істотну зміну газового складу атмосфери і призводить до цілої низки глобальних негативних явищ, що класифікуються як небезпечні та шкідливі фактори середовища проживання людини [1,2].

Ця проблема безпосередньо стосується і України. На території нашої країни знаходиться 23 теплові електростанції, 16 коксохімічних заводів, 6 найважливіших центрів нафтопереробки, 4 великі підприємства хімії органічного синтезу та багато інших промислових підприємств, викиди яких негативно впливають на стан атмосфери.

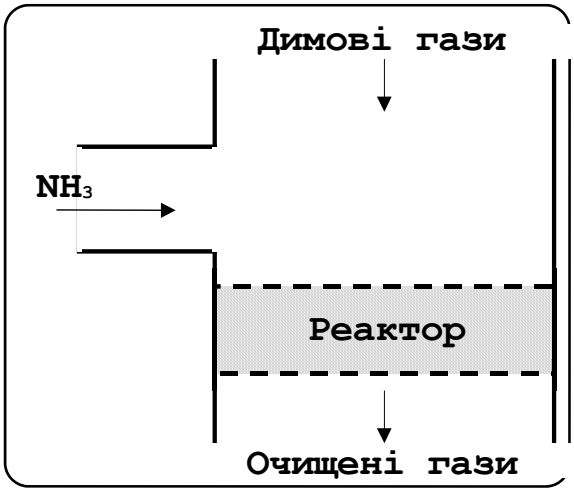
Зараз відомо багато методів очищення виробничих газів. До традиційних методів газоочищення належать, наприклад, методи сухого інерційного очищення, охолодження і вологого очищення, фільтрування, електричне очищення газів статичним коронним розрядом.

Всі ці методи дають змогу очистити виробничі гази від попелу і пилу. При цьому шкідливі компоненти газоподібні, як і раніше, викидаються в атмосферу. На сьогодні найбільш опрацьованими є технології очищення газу від отруйних газоподібних речовин з використанням хімічних методів. Однак, ці технології є дуже витратними [3], у зв'язку з чим продовжується пошук інших, більш економічних методів.

На теперішній час найбільші перспективи очищення повітря від забруднюючих газоподібних сполук пов'язані з методами, які базуються на застосуванні пристроїв імпульсної енергетики, що генерують коронні газові розряди та електронні пучки у режимі розсіяння. Оскільки ці методи розробки полягають в іонізації газового середовища, що підлягає очищенню, яке супроводжується хімічними реакціями в іонізованому об'ємі, вони отримали назву плазмохімічних. Вивчення цих методів поки що обмежується дослідженнями на лабораторному устаткуванні. Але про перспективність їх свідчить те, що, розпочавшись у 80-х роках у США та Німеччині, ці дослідження у 90-х роках розгорнулися у багатьох країнах з потужним науковим потенціалом [2-7]. У певній мірі роботи у цьому напрямку стимулюються також законодавствами країн, завдяки чому підприємствам та фірмам стає вигідним вкладати кошти у галузі науки і техніки, пов'язані з екологічною безпекою, аби не сплачувати великі податки і уникати санкцій через забруднення ними навколишнього середовища.

За звичайних умов типовий склад димових газів, що підлягають обробці на підприємствах вуглепаливної енергетики, вміщує $N_2 \approx 75\text{-}80\%$,
$O_2 \leq 5\%$, $H_2O \approx 10\text{-}15\%$, $CO_2 \approx 4\text{-}5\%$, $SO_2 \approx 0{,}2\%$, $NO_x \approx 0{,}1\%$ [3]. Склад відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згоряння відрізняється значно меншою кількістю оксиду сірки і значною кількістю вуглеводневих сполук, що є результатом неповного згоряння палива [5].

Переваги застосування імпульсних коронних розрядів та електронних пучків полягають, головним чином, у тому, що вони, на відміну від інших типів електричного розряду, по-перше, можуть бути утворені у великих об'ємах, відповідних до об'ємів промислових технологічних плазмохімічних реакторів, а по-друге, досить легко формуються у газоподібних середовищах у широких діапазонах тисків і температур, генеруючи електрони, вільні радикали, збуджені молекули та ультрафіолетове випромінювання, тобто ті фактори, що активізують плазмохімічні процеси.



Імпульсна стримерна корона являє собою розряд, що розвивається від електродів у вигляді багатьох окремих тонких плазмових ниток з радіусом 0,1-1 мм уздовж напряму силових ліній зовнішнього електричного поля. Швидкість їх проростання досягає

10^4-10^5 м/с, а довжина може дорівнювати 1 м. Таким чином, в об'ємі реактора може утворюватися слабко іонізована плазма з неоднорідним розподілом характеристик у просторі. При проходженні димових газів через таку область відбувається їх очищення від оксидів азоту і сірки та інших шкідливих газоподібних речовин.
Принцип плазмохімічного очищення зображено на рисунку. На ньому робочий об'єм реактора, тобто зону збудженого середовища, в якій відбуваються хімічні реакції, зображено затіненою областю Безпосередньо процес видалення SO_2 та NO_x розподіляється на 3 стадії [3-7].
На першій з них при збудженні димових газів виникають хімічно активні вільні радикали:

$N_2\ O_2$, $H_2O \rightarrow$ N, H, O, OH, HO_2 і т. ін.

На другому етапі вільні радикали взаємодіють з оксидами азоту і сірки з утворенням азотної та сірчаної кислот:

$(SO_2\ , NO_x) + (O, OH, HO_2) \rightarrow (H_2SO_4\ , HNO_3)$.

На третій стадії у димові гази додається аміак, який у присутності вільного кисню і парів води доокислює частину SO_2, а також нейтралізує кислоти, що утворилися з виходом нітратів та сульфатів амонію у твердому стані:

$$(SO_2\ , H_2SO_4\ , HNO_3) + (NH_3\ , O_2\ , H_2O) \rightarrow$$
$$\rightarrow ((NH_4)_2\ SO_4\ , NH_4\ NO_3).$$

Технічний процес очищення полягає у такому:

7. Димові гази фільтруються від частинок і охолоджуються водою до температури 60-120°С.
8. До газів додається стехіометрична кількість аміаку.
9. Димові гази обробляються джерелом збудження у камері реактора.Продукти реакції видаляються з газу, що обробляється за допомогою фільтрів.

1 Успішне впровадження методів плазмохімічного очищення у промисловість значною мірою залежить від ефективності перетворення енергії у плазмохімічних процесах та від надійності обладнання імпульсної енергетики, що створюється. Для генерації коронних розрядів і електронних пучків можуть бути застосовані імпульсні джерела енергії різних типів: з ємнісними або індуктивними накопичувачами енергії, електричні машини імпульсної дії, хімічні джерела тощо.
Найперспективнішими для вирішення проблеми, що розглядається, слід вважати ємнісні накопичувачі. Імпульсні системи на їх основі здатні забезпечити створення імпульсів не тільки з високою енергією та потужністю, але і з крутим фронтом і високою частотою циклів заряд-розряд.
2 Найбільш цікавим з точки зору перспектив застосування плазмохімічних технологій є дослідження залежності ступеня очищення димових газів від NO_x розсіяним електронним пучком від поглинутої енергії (дози) у різних робочих умовах. Експериментальні дані, що наведені у роботах [3, 5], свідчать про те, що плазмохімічне очищення у межах 80-90% досягається для сполук NO_x при дозах, що приблизно дорівнюють 0,01 Мрад на одну мільйонну частку (мч) їх концентрації. При характерних початкових концентраціях $[NO_x]_0$
$\approx$ 500 (мч) це відповідає дозі у 5 Мрад. Вигляд залежності ступеня очищення для SO_2 є подібним до залежностей для оксидів азоту [3]. Привертає увагу більший діапазон розкиду даних, ніж для оксиду азоту, що пояснюється тим, що SO_2 може видалятися в деякій мірі і без радіолізу, шляхом прямих реакцій SO_2 з молекулами H_2O та NH_3. Щодо чисто плазмохімічного очищення від SO_2 (у відсутності NH_3), то при характерних значеннях початкової концентрації $[SO_2]_0$ = 1000 мільйонних часток ефективність очистки, що дорівнює 90%, досягається при дозах до 2 Мрад, тобто при менших витратах енергії, ніж для NO_x.
3 Експериментальні результати, отримані у роботі [3] при очищенні димових газів імпульсним коронним розрядом, дозволяють сподіватися, що витрати енергії на рівні 14 Вт·год/$м^3$ є достатніми для ліквідації 70% викидів NO_x у атмосферу.
4 Ці дані дуже добре співпадають з результатами публікації [7], у якій при очищенні коронним розрядом викидів NO потужних дизельних двигунів на 63% отримано значення витрат енергії 15 кіловат-годин на кожен кілограм NO, що проходить крізь плазмохімічний реактор. Тобто при молекулярній масі NO у 30 кг/кмоль питомі витрати енергії у цьому випадку дорівнюють значенню 20 Вт·год/$м^3$. Ці та інші результати дають змогу стверджувати про достатньо помірні витрати енергії при плазмохімічному очищенні димових газів. Але потрібно проведення комплексних досліджень щодо виявлення оптимальних параметрів цього технологічного процесу.

5 Впровадження технологічних процесів плазмохімічного очищення потребує розробки удосконаленого імпульсно-енергетичного обладнання, створеного на базі генераторів імпульсних напруг. Головними елементами цих генераторів є імпульсні високовольтні конденсатори та розрядна комутаційна апаратура [8,9]. На теперішній час ресурс (у імпульсах) найкращих зразків цих елементів при енергії в імпульсі 0,1-1 кДж, тривалості імпульсу до 0,5 мкс, частоті зарядно-розрядних циклів 50-100 Гц складає 10^8. Тобто для успішного технологічного використання обладнання цей показник потребує збільшення на 1-2 порядки. Тому при подальшій розробці таких систем найбільшу увагу слід приділити, головним чином, розробці вдосконалених конструкцій та елементів обладнання, методам визначення міцності високовольтної ізоляції та технологічним заходам щодо її збільшення, сучасним методам випробування та контролю [8-11].

6 Таким чином, вже зараз можна стверджувати, що упродовж останніх років у лабораторіях різних країн винайдено і вдосконалюється метод плазмохімічного очищення повітря від забруднення газоподібними шкідливими продуктами згоряння вугільного та вуглеводневого палива безпосередньо біля джерела їх виникнення. У порівнянні з іншими методами він характеризується принциповою простотою і досить помірними витратами енергії. Проблема широкого впровадження цього методу має три аспекти. Перший аспект є фізичним і полягає у необхідності отримання результатів щодо виявлення оптимальних з точки зору забезпечення мінімальних питомих витрат енергії параметрів та режимів роботи установок. Другий аспект – технічний. Він пов'язаний з удосконаленням обладнання імпульсної енергетики, підвищенням надійності та тривалості його експлуатації. І, нарешті, третій, юридичний аспект. Впровадження технологій очищення навколишнього середовища від забруднення супроводжується додатковими капітальними витратами, та витратами, енергії на очищення.

7

8 Тому потрібно створення такої правової бази, за якою підприємствам паливно-енергетичного комплексу і транспорту було б вигідніше вкладати кошти у розробку і впровадження очисного устаткування, ніж потерпати від санкцій через забруднення ними навколишнього середовища.

9 Література

7. Літвак С.М., Михайлюк В.О., Доній В.М. Безпека життєдіяльності. – Миколаїв: МФ НаУКМА, 1998. – 188 с.
8. Electron beam processing of combustion flue gases. Final report of consulting meeting, Karlsruhe, 27-29 October, 1986. – JAEA, Vienna, 1987. – 289 p.
9. Валуев А.А., Каклюгин А.С., Норман Г.Э., Подлипчук В.Ю. Радиационно плазмо-химические методы очистки дымовых газов // Теплофизика высоких температур. – 1990. – Т. 28. – № 5. – С. 995-1008.
10. Non-thermal plasma techniques for pollution control: Part B – Electron beam and electrical discharge processing / Edited by B.M.Penetrante and S.E.Schultheis. – Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1993. – 173 p.
11. Penetrante B.M. Removal of NO_x from diesel generator exhaust by pulsed electron beams // 11-th IEEE Intl. Pulsed Power Conference. Digest of Technical Papers, vol. 1. – Baltimore, MD, USA, 1997. – p. 91-96.
12. Korzekwa R., Rosocha L., Falkenstein Z. Experimental results comparing pulsed corona and dielectric barrier discharges for pollution control // Ibid. – p. 97-102.
13. Van Heesch E.J., Smulders H.W., Van Paasen S.V., et al. Pulsed corona for gas and water treatment // Ibid. – p. 103-108.
14. Dubovenko K.V., Kurashko Yu.I. Design, fabrication and testing of a closing switch for compact electrical discharge industrial equipment // Ibid., vol. 2. – p. 868-875.
15. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В. Генераторы Аркадьева-Маркса для сильноточных ускорителей // Физика и техника мощных импульсных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 165-179.
16. Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 265 с.
17. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. – Новосибирск: Наука, 1982. – 255 с.