

## ТЕХНОЕКОЛОГІЯ

УДК 504.3.054:662.613.53

DOI: 10.31471/2415-3184-2018-2(18)-73-82

*Г. В. Кошлак, А. М. Павленко  
Івано-Франківський національний  
технічний університет нафти і газу*

### ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ $\text{NO}_x$ ВУГІЛЬНИМИ ТЕС

Переважно енергоблоки українських ТЕС були спроектовані для спалювання кам'яного вугілля вітчизняного видобутку, однак на сьогоднішній день через фізичну зношеність, вони функціонують у непроектних маневрено-пікових режимах, що призводить до збільшення питомих витрат умовного палива і зростання шкідливих викидів у довкілля.

Метою досліджень є розробка рекомендацій щодо вибору оптимальних технічних рішень для скорочення викидів оксидів  $\text{NO}_x$  при реалізації, на діючих котлах Бурштинської ТЕС, режимно-технологічних заходів.

В статті проаналізовані основні підходи до розробки і вибору технологічних методів скорочення викидів вугільними ТЕС та визначені перспективи їх роботи відповідно до сучасних екологічних вимог. Визначено закономірності трансформації зв'язаного нітрогену органічного палива при нагріванні. Запропоновано режимно-технологічний підхід попередньої термічної обробки пиловугільної суміші для зменшення кількості викидів  $\text{NO}_x$  у продуктах згорання. Наведено результати термохімічних досліджень зразків вугілля, які використовуються на Бурштинській ТЕС. Визначено інтервали температур при яких відбувається максимальне виділення летких горючих компонентів до досягнення верхньої межі займання пиловугільної суміші.

Встановлено, що в умовах протікання реальних топкових процесів має місце чітка послідовність виходу летких компонентів і горіння коксового залишку: прогрів пилоподібної суміші палива; виділення й займання летких; їх горіння; прогрів коксового залишку до його займання; вигорання коксового залишку. При спалюванні пиловугільного потоку, що вводиться у топку без попереднього змішування з повітрям, прогрів паливних частинок і їх дегазація відбуваються при дефіциті кисню в зоні безпосередньо прилеглої до розрізу пальника, в умовах поступового збільшенні його концентрації по потоку.

Режимно-технологічні заходи гальмування утворення оксидів  $\text{NO}_x$  шляхом попередньої термічної обробки пиловугільної суміші дозволяють отримати максимальне виділення летких горючих компонентів до досягнення верхньої межі її займання. Як з'ясувалося термічну обробку необхідно проводити при температурах від 540–580°C. Саме при цих температурах відбувається максимальне виділення летких компонентів. Далі спалювання може відбуватися в практично безкисневому середовищі з паралельно конкуруючими реакціями утворення летких компонентів та молекулярного азоту. Зазначений спосіб дозволяє зменшити концентрацію оксидів азоту у димових газах майже у два рази.

**Ключові слова:** скорочення викидів  $\text{NO}_x$ , теплові електричні станції, технології спалювання палива, термічна обробка.

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями.** В останні роки в Україні на теплових електростанціях виробляється приблизно 40% від загального об'єму електроенергії. Через зростання цін на імпортований природний газ спостерігається тенденція до скорочення об'ємів спалювання природного газу шляхом використання в якості основного енергоресурсу низькосортного вугілля газової групи власного видобутку та переобладнання роботи ТЕС з антрацитового на газове вугілля [1]. Так, до 2035 року планується збільшити частку вугілля в балансі теплової енергетики майже в 1,5 рази (до 70–75%). Очікується, що на ТЕС до 2030 року виробництво енергії зросте майже вдвічі – до 282 млрд кВт·год. Переважно енергоблоки українських ТЕС були спроектовані для спалювання кам'яного вугілля вітчизняного видобутку, однак на сьогоднішній день через фізичну зношеність,

вони функціонують у непроектних маневрено-пікових режимах, що призводить до збільшення питомих витрат умовного палива і зростання шкідливих викидів у довкілля.

В останні роки для українських ТЕС дуже гостро постала проблема скорочення викидів. Покращення екологічної ситуації в зонах впливу ТЕС та збереження довкілля можливе при умові дотримання і виконання національного плану скорочення викидів основних забруднювальних речовин в Україні від великих установок спалювання відповідно до рішення Енергетичного співтовариства D/2013/05/MC-EnC [2] від 24 жовтня 2013 року, директив 2001/80/ЄС [3] та 2010/75/ЄС [4] (табл.1).

Таблиця 1

**Технологічні нормативи допустимих викидів [2, 3, 4] для установок номінальна теплова потужність яких перевищує 500 МВт**

Установки	Гранично допустимі викиди відповідно до наказу Міністерства екології та природних ресурсів № 62 від 16.02.2018, мг/м <sup>3</sup>			Гранично допустимі викиди відповідно директиви 2001/80/ЄС (LCPD), мг/м <sup>3</sup>			Гранично допустимі викиди відповідно директиви 2010/75/ЄС, мг/м <sup>3</sup>		
	Суспендовані тверді частинки, 2018 р.	NO <sub>x</sub> , 2018 р.	SO <sub>2</sub> , 2018 р.	Суспендовані тверді частинки, 2023 р.	NO <sub>x</sub> , 2023 р.	SO <sub>2</sub> , 2023 р.	Суспендовані тверді частинки, 2027 р.	NO <sub>x</sub> , 2027 р.	SO <sub>2</sub> , 2027 р.
Існуючі	50	200	5100	50	200	400	20	200	200
Нові	10	150	400	30	200	200	10	150	150

Зменшити викиди до нормативних показників планується шляхом модернізації теплосилових установок, обмеження годин роботи морально застарілих енергоблоків з подальшим їх виведенням з експлуатації, оснащення модернізованих потужностей з продовженим робочим ресурсом більш ніж 15-20 років вискоелефективним газоочисним обладнанням. Невиконання міжнародних зобов'язань може привести до економічної та екологічної кризи. Отже, проблеми скорочення викидів від вугільних ТЕС за своєю актуальністю мають першочергове значення, потребують державної підтримки та комплексного підходу щодо їх вирішення.

Зменшення викидів забруднюючих речовин ТЕС можна досягнути при застосуванні:

- екологічно чистого палива;
- режимно-технологічних заходів, які направлені на удосконалення технології спалювання палива;
- сучасних газоочисних установок.

До основних факторів техногенного впливу об'єктів теплоенергетики на рівень забруднення атмосфери належать: вид палива, на якому працює ТЕС, технології очищення викидів, кліматичні умови, характер рельєфу місцевості. Використання низькоякісних сортів вугілля призводить до збільшення викидів в атмосферу, накопичення великої кількості твердих відходів (золи та шлаку); масштабних забруднень навколишнього середовища.

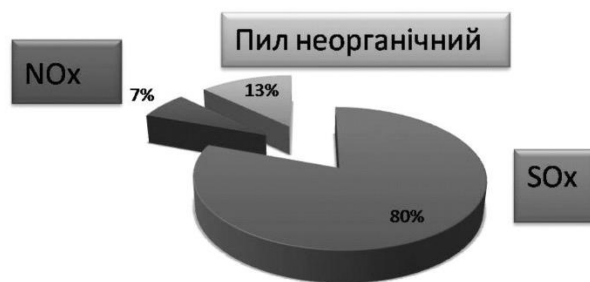
Узагальнення досліджень територій впливу вугільних ТЕС показало, що основними забруднювачами атмосферного повітря, які перевищують ГДК є SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> та пил – золи-виносу з труб та золовідвалів (рис. 1).

Викиди NO<sub>x</sub> (нітроген(II) та нітроген(IV) оксиди) та SO<sub>x</sub> є одними з найбільш небезпечних, оскільки вони розсіюються в повітрі і при певних погодних умовах здатні перетворюватися на кислоти та згодом потрапляти на поверхню ґрунту, рослин, у поверхневі води. Високою біологічною активністю володіє NO<sub>2</sub>, який становить загрозу для здоров'я людей. Викиди можуть викликати розвиток захворювань дихальної системи (астма й інші хронічні хвороби) та хвороби ока людини [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема зниження викидів NO<sub>x</sub> вивчалася багатьма вченими ще з 60-х років минулого століття. Основними джерелами утворення NO<sub>x</sub> в продуктах згоряння органічного палива є N<sub>2</sub>, що входить до складу повітря і N<sub>2</sub> органічної частини палива. Існує декілька способів утворення оксидів азоту у димових газах:

- за механізмом Зельдовича утворюються «термічні» оксиди NO<sub>x</sub> з повітря, що йде на горіння при температурах більше 1500°C;

- за механізмом Фенімора утворюються «швидкі»  $\text{NO}_x$  з повітря у вузькій зоні фронту полум'я при відносно невеликих температурах;
- утворення  $\text{NO}_x$  з органічної частини палива відбувається на початковій ділянці факела в результаті горіння летких компонентів, що виділилися з органічного палива.



**Рис. 1. Основні забруднюючі речовини атмосферного повітря, що перевищують норми ГДК**

Одночасно з утворенням  $\text{NO}_x$  відбуваються процеси відновлення  $\text{NO}$  до молекулярного  $\text{N}_2$ .

Різноманіття можливих рішень зниження викидів визначає необхідність зваженого підходу до використання одного з них або поєднань декількох відомих технологічних заходів, достатніх для виходу на рівень ГДК [6–13]. Практичне розв'язання даної проблеми ускладнюється відсутністю необхідних методик розрахунку, проектування, вибору технологічних схем для конкретних умов, необхідністю значних інвестицій в реконструкцію існуючого обладнання.

Сформовані уявлення про механізм утворення оксидів азоту у топкових пристроях визначають основні підходи до розробки та вибору технологічних методів скорочення викидів.

*1) Диференційований вибір методів впливу на топковий процес.*

Вихідним моментом в екологічній раціоналізації топкового процесу є виявлення тих окремих його параметрів, спрямований вплив на які є доцільним в конкретних умовах. Технологічні заходи, що забезпечують зниження виходу  $\text{NO}_x$  при спалюванні твердого палива, орієнтовані на обмеження утворення оксидів з органічного палива. Найбільш істотним параметром топкового процесу є надлишок повітря в початковій ділянці факела – зоні термічного руйнування азотовмісних з'єднань палива, що визначає ступінь переходу пов'язаного азоту палива в оксиди азоту в факелі.

*2) Комбінація різних технологічних методів.*

Значний ефект зниження викидів оксидів азоту досягається у тому випадку, якщо в котлі одночасно впроваджуються кілька технологічних методів, які впливають на різні механізми утворення  $\text{NO}_x$ . Це забезпечить незалежність впливу кожного заходу і складання ефектів зниження викидів зазначених забруднювачів.

*3) Оптимізація технічного стану і режиму експлуатації котла.*

Ефективність методів зменшення кількості  $\text{NO}_x$  залежить певною мірою від стану котельного агрегату, режиму його експлуатації:

- при зниженні загального надлишку повітря в топці збільшується ефект застосування ступеневої технології спалювання, рециркуляції димових газів;
- при підвищенні щільності топки і газового тракту найбільш ефективною стає рециркуляція димових газів [14].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Технологічний вплив на процес утворення оксидів нітрогену. Утворення  $\text{NO}_x$  у пиловугільному факелі відбувається в основному при вигорянні летючих компонентів [6–8], тому можна зробити висновок, що найменш сприятливі умови для окислення нітрогену, який виділяється в результаті термічного руйнування азотовмісних сполук палива, створюються у випадку, коли дегазація частинок вугільного пилу з виділенням летючих речовин і продуктів розпаду азотовмісних сполук буде завершена до досягнення нижньої межі займання паливно-повітряної суміші. У цьому випадку її займання відбувається при нестачі вільного кисню в умовах паралельного розвитку конкуруючих реакцій окислення горючих летких вугілля і азоту. Оскільки енергія активації окислення горючих складових істотно нижче, то утворення  $\text{NO}_x$  гальмується.

В основі всіх реалізованих на практиці технологічних способів зменшення оксидів азоту в пиловугільних котлах лежить попереднє термічне руйнування азотовмісних сполук палива з переходом виділеного при цьому азоту палива (органічна частина) в молекулярний азот. Цей

процес розвивається безпосередньо в котельній камері при уповільненому змішуванні аеросуміші з повітрям. Просторове розділення процесів термообробки і спалювання вугілля дозволяє уповільнити процес утворення оксидів азоту та зробити його керованим і ефективним. Ефект зменшення  $\text{NO}_x$  шляхом попереднього підігріву пилу досягається також за рахунок специфічних властивостей термообробленого вугілля – наявністю пористих частинок з розвиненою поверхнею, високою реакційною здатністю, що дозволяє організувати спалювання основної маси палива в короткому факелі з низьким локальним надлишком повітря (до завершення змішування його з основним потоком повітря). Попередній підігрів вугільного пилу безпосередньо перед введенням в топку розглядався раніше як ефективний спосіб інтенсифікації займання і горіння низькорекційного палива. Зараз він також привертає увагу фахівців як спосіб зменшення викидів  $\text{NO}_x$  шляхом запобігання окислення зв'язаного нітрогену органічного палива. Термічна підготовка вугілля до спалювання полягає у нагріванні вугілля в безкисневому середовищі до температури в діапазоні 620–700°C, відповідній організації процесу піролізу вугільних частинок з руйнуванням термічно нестійких з'єднань і переходу їх у газоподібні горючі та інертні сполуки. В порівнянні із беззалишковою газифікацією вугілля, тут мають місце процеси середньотемпературного коксування з отриманням напівкоксу і парогазоподібних продуктів. Термообробка палива змінює характер процесів у пиловугільному факелі: в топку надходять розділені кінцеві продукти термообробки – леткі горючі і коксовий залишок, який містить залишкову кількість летких сполук. Умови горіння термооброблених частинок визначаються їх підвищеною реакційною здатністю, набутою в процесі термообробки. Завдяки розвиненій пористій поверхні напівкоксу горіння протікає практично у кінетичному режимі на зовнішній і внутрішній поверхнях часток. В даних умовах виділяються дві основні стадії процесу – займання і вигорання пилоподібного напівкоксу. Відсутність підготовчих стадій розвитку пиловугільного факелу при спалюванні термообробленого палива підвищує стійкість і стабільність процесу горіння. Таким чином, принципова особливість технології енергетичного використання вугілля з попередньою термообробкою полягає в комплексному вирішенні технологічних і екологічних проблем.

В результаті термообробки нітроген ( $\text{N}_2$ ), що входить до складу палива, перерозподіляється між коксовим залишком і летючими, в яких він міститься у вигляді вільного азоту ( $\text{N}_2$ ) та аміаку ( $\text{NH}_3$ ). Цей розподіл значно залежить від якості і природи вугілля. В дослідженому вугіллі зі значним вмістом летких компонентів у коксовому залишку може міститися 12–20% початкової кількості азоту.

Аналіз відомих досліджень [6–8, 16–26] дозволяє виділити основні закономірності трансформації зв'язаного азоту органічного палива при нагріванні:

1. Основна частина азоту при нагріванні вугілля виділяється у вільному стані (до 60% зв'язаного азоту вугілля), а також з утворенням аміаку (до 20% загальної кількості паливного азоту).

2. Найбільш інтенсивно вільний азот виділяється у двох температурних зонах: до 500°C та у інтервалі 700–800°C.

3. З прискоренням нагріву збільшується вихід вільного азоту у інтервалі температур до 500°C, одночасно зменшується вихід азоту при  $t > 700^\circ\text{C}$ .

Для вугілля, що використовується на Бурштинській ТЕС тепловий режим підготовки необхідно уточнити.

**Мета статті.** Метою досліджень є розробка рекомендацій щодо вибору оптимальних технічних рішень для скорочення викидів оксидів  $\text{NO}_x$  при реалізації, на діючих котлах Бурштинської ТЕС, режимно-технологічних заходів.

**Виклад основного матеріалу.** Одним із методів зменшення кількості утворення  $\text{NO}_x$  є удосконалення технології підготовки та спалювання пиловугільної суміші. Незначне окислення азоту може відбуватися при попередній термічній обробці вугілля. Як відомо [7, 17], при нагріванні вугілля до 200–500°C спостерігається виділення  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ . Ця стадія термічної деструкції є ендотермічним процесом, в якому тепло витрачається на випаровування води, виділення газів, активацію макромолекул органічних речовин і термічне розщеплення найменш міцних зв'язків. Вихід летких компонентів в області температур до 250°C незначний і не перевищує 5%. При температурах близьких до 400°C переважають реакції термічного розкладання і збільшується швидкість утворення легких речовин. Ця група реакцій відбувається з поглинанням тепла. При подальшому нагріванні вугілля утворюються рідкофазні продукти і спостерігається перехід вугілля в пластичний стан (гетерофазну систему), що складається з твердих частинок і

рідких складових, які утворюють у сукупності пластичну масу. В ній розподілені леткі продукти термодеструкції, які виділяються при подальшому нагріванні. В зоні температур 400–450°C зростає інтенсивність реакцій термосинтезу через значну реакційну здатність речовин органічної маси. Як правило, для багатьох марок вугілля максимум швидкості утворення летких продуктів відповідає стадії розвитку процесу, при якій виділилося 0,2–0,4 частин від загальної маси летких продуктів. При температурах вище ніж 550°C формуються переважно високомолекулярні поліциклічні системи. При температурах близьких до 300...500°C відбувається незворотний перехід з пластичного стану в твердофазний, і при 600°C утворюється твердий вуглецевий продукт – напівкокс.

Диференціально-термічні дослідження виконувалися на дериватографі Термоскан 2. Дослідження вугільного палива БуТЕС, проводили на дериватографі до кінцевої температури 1000°C. Маса зразка становила 0,4 г. Нагрів зразків проводився в атмосфері повітря при швидкості нагріву зразків 5,0°C/хв. Робочий діапазон температур від 25 до 1000°C.

В табл. 2 представлена характеристика зразків вугілля, обраних для термохімічних досліджень (дані підприємства БуТЕС), а на рис. 2 показані криві термічного аналізу відповідних зразків палива, що використовується.

Таблиця 2

Характеристика вугілля – первинного органічного палива БуТЕС

Родовище	Вологість, %	Зольність, %	Леткі компоненти, %	Теплота згоряння, МДж/кг
Львівсько-Волинське	8	28	47,2	18,82
Павлоградвугілля	8,6	25	45	17,2
Добропільське	10	22	63,4	21.15
Білозерське «Піонер»	12	22	58	22,45

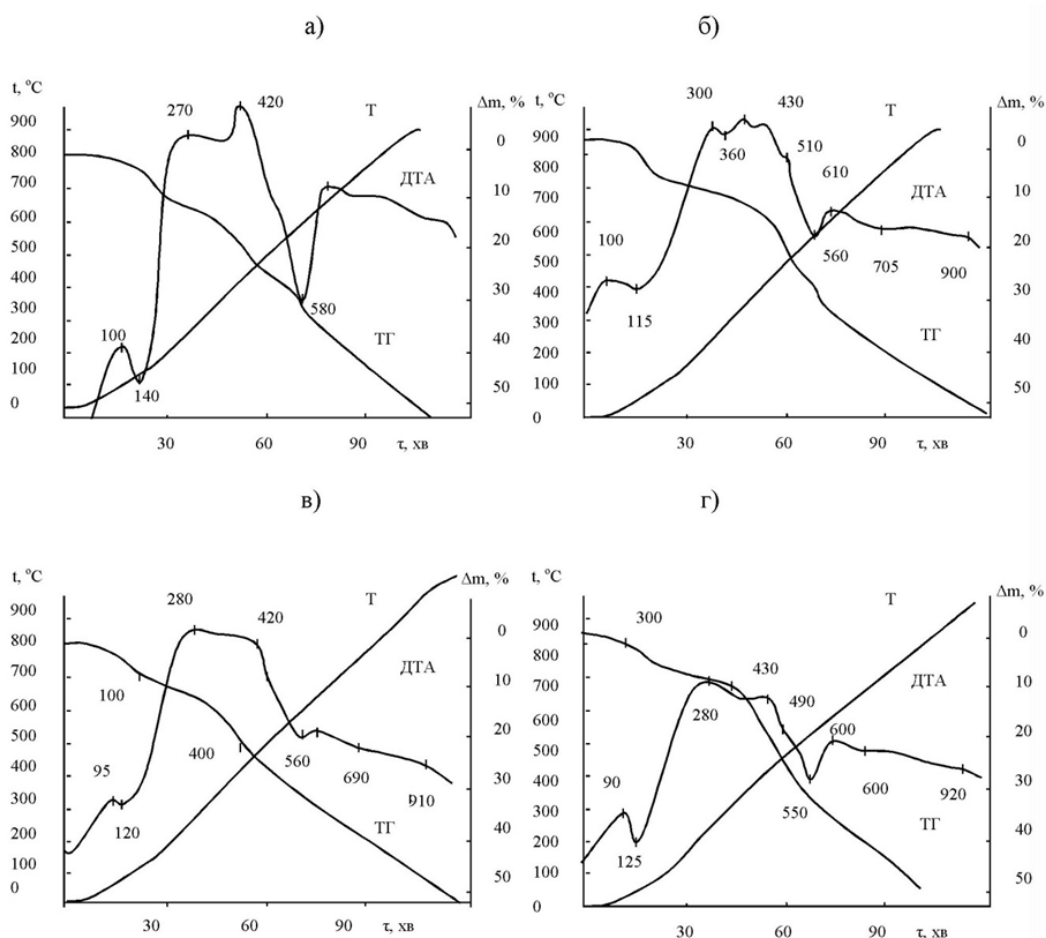


Рис. 2. Результати термічного аналізу вугілля (табл. 2): а) Львівсько-Волинське; б) Павлоградвугілля; в) Добропільське; г) Білозерське «Піонер»

В результаті термохімічних досліджень зразків вугілля шляхом диференційно – термічного аналізу встановлено два температурних максимуми близько 470 і 590°C, які відповідають виділенню легких продуктів. Термічна деструкція включає дві основні групи хімічних реакцій: термічний розклад речовин палива з утворенням продуктів з меншою молекулярною масою і термосинтез – процес, при якому протікають реакції між вихідними речовинами або продуктами їх розкладання.

При термічній обробці низькосортного вугілля утворювалася велика кількість низькомолекулярних легких продуктів у виді пари смол і газів, а також твердий вуглецевий залишок, в якому вміст карбону збільшувався відповідно до підвищення температури. Важкі рідкофазні продукти практично не утворювалися, тобто стадія переходу в пластичний стан була відсутня.

При нагріванні зразків вугілля до 120–160°C відбувалися процеси видалення вологи з ендотермічним ефектом (крива ДТА) та одночасною фіксацією втрати маси на кривих ТГ і ДТГ. На наступному етапі відбувався процес термічного розкладання органічної речовини, який протікав з екзотермічним ефектом з екстремумом при 280°C. На початковій стадії деструкції відбувалися також процеси дегідратації і декарбонізації з утворенням води і CO<sub>2</sub> (карбон IV оксиду). Процес найбільш інтенсивного термічного розкладання починався після 270°C і досягав максимальних значень в області 420–430°C. При цьому фіксувався другий екзотермічний ефект на ДТА. З підвищенням температури цей екзоэффект переходив в ендотермічний пік з максимумом при 550–580°C. В даній області температур відбувалися процеси термічного розкладання найбільш термостабільних органічних сполук. Основна кількість летючих сполук таких, як пари смоли, води і газів виділялася до 610°C. В інтервалі 610–920°C термічне розкладання проходило у твердій фазі з виділенням горючих газів: CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>. Основна маса смоли і газоподібних вуглеводнів виділялася в інтервалі 270–560°C. Склад газів змінювався в залежності від температури. Вміст водню та CO (карбон(II) оксид) у складі піролізного газу з підвищенням температури зростав, вміст CO<sub>2</sub> сягав максимуму при 550°C, а потім частка його зменшувалася до температури 920°C через збільшення вмісту у парогазовій суміші інших компонентів. Максимальний вміст граничних і ненасичених вуглеводнів припадав на діапазон 420–550°C.

**Висновки та перспективи.** В результаті досліджень встановлено:

1. Ступінь дегазації вугільних частинок становив в середньому 60–70%, вміст легких на горючу масу у напівкоксівих частинках: 6–9% при значенні цього показника у вихідному вугіллі 22%.

2. Вміст надлишкового кисню у паливній суміші: 1,0–1,2% (коефіцієнт надлишку повітря  $a=1,05-1,06$ ) за умови проведення термообробки вугільного пилу в безкисневому середовищі.

Послідовна реалізація технологічних заходів на котлах ТП-100 БуТЕС дозволить зменшити концентрацію NO<sub>x</sub> у димових газах до рівня 780...840 мг/м<sup>3</sup>, близького до режиму спалювання природного газу – 550 ... 640 мг/м<sup>3</sup> при  $a=1,12-1,20$ .

Таким чином:

– вихідне значення концентрації NO<sub>x</sub> у димових газах до реконструкції котла C<sub>NO<sub>x</sub></sub> = 2100 – 1800 мг/м<sup>3</sup>;

– вміст NO<sub>x</sub> в димових газах в режимі роботи котла зі спалюванням термічно обробленої пиловугільної суміші при температурі 550°C при  $a=1,25-1,28$  складає 780–840 мг/м<sup>3</sup>.

Аналіз загальних закономірностей формування і розвитку пиловугільного факела дозволяє виявити деякі специфічні умови спалювання пиловугільного потоку (ПП). Встановлено, що в умовах протікання реальних топкових процесів має місце чітка послідовність виходу легких компонентів і горіння коксового залишку: прогрів пилоподібної суміші палива; виділення й займання легких; їх горіння; прогрів коксового залишку до його займання; вигорання коксового залишку. При спалюванні ПП, що вводиться у топку без попереднього змішування з повітрям, прогрів паливних частинок і їх дегазація відбуваються при дефіциті кисню в зоні безпосередньо прилеглої до розрізу пальника, в умовах поступового збільшенні його концентрації по потоку.

В результаті попередньої термообробки палива виділяються легкі компоненти, які в основному концентруються навколо паливних частинок. Уповільнене підмішування повітря сприяє збереженню цих структур у потоці. Прогрів часток вугілля здійснюється переважно внаслідок променистого теплообміну. Вплив конвективного теплопідводу обмежується через формування навколо частки ізолюючого прошарку водяної пари і продуктів первинного розкладання, які виділяються на початковій стадії прогріву і перешкоджають конвективному

підводу тепла. Горіння летких компонентів сприяє прогріванню часточок і прискоренню їх термічного розкладання. На початковій стадії горіння процеси окислення коксового залишку гальмуються через витрату окислювача на легкі компоненти палива. Окисген дифундує через поверхню пористих частинок, сприяючи розвитку гетерогенного горіння. В результаті можна збільшити інтенсивність тепловиділення в момент займання летких та потужність початкового джерела займання у навколишньому сферичному просторі, здійснити інтенсивний прогрів коксового залишку з підвищенням локальних температур.

Режимно-технологічні заходи гальмування утворення оксидів  $\text{NO}_x$  шляхом попередньої термічної обробки пиловугільної суміші дозволяють отримати максимальне виділення летких горючих компонентів до досягнення верхньої межі її займання. Як з'ясувалося термічну обробку необхідно проводити при температурах від 540–580°C. Саме при цих температурах відбувається максимальне виділення летких компонентів. Далі спалювання може відбуватися в практично безкисневому середовищі з паралельно конкуруючими реакціями утворення летких компонентів та молекулярного азоту. Зазначений спосіб дозволяє зменшити концентрацію оксидів азоту у димових газах майже у два рази.

### Література

- 1 Энергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серп. 2017 р. № 605-р [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80>
- 2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://www.energy-community.org/.../Decision\\_2013\\_05\\_...](https://www.energy-community.org/.../Decision_2013_05_...)
- 3 Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 Oct. 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants // Official Journal of the European Union, L309/1, 27.11.2001.
- 4 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://enref.org/docs/dyrektyva-2010-75-es-promyslovi-vykydy/>
- 5 Зелена книга. Зменшення шкідливих викидів у тепловій електроенергетиці України через виконання вимог Європейського енергетичного співтовариства. – Київ: Міжнародний центр перспективних досліджень, 2011. – 43 с.
- 6 Зельдович Я. Б. Окисление азота при горении / Я.Б. Зельдович, П. Я. Садовников, Д.А. Франк-Каменецкий. – Л.: Изд-во АН СССР, 1947. – 148 с.
- 7 Хзмалян Д.М. Теория горения и топочные устройства / Д.М. Хзмалян, Я.А. Кавган. – М.: Энергия, 1976. – 487с. 8. Івасик Я. Ф. Концентрації оксидів азоту в пиловугільному котлі ТП-92 при змінах режимів роботи / Я. Ф. Івасик // Екотехнологія і ресурсосбереження. – 2000. – № 4. – С. 52-54.
- 8 De Soete G.G. Overall reaction rates of NO and  $\text{N}_2$  formation from fuel nitrogen, 15th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, 1975. – P. 1093 -1102.
- 9 Тумановский А. Г. Перспективы внедрения наилучших доступных технологий по охране атмосферы на предприятиях тепловой энергетики / А. Г. Тумановский, А.Н. Чугаева, О. Н. Брагина, А. М. Зыков, Г. А. Рябов, А. М. Володин // Электрические станции. – 2016. – № 7 – (1020). – С. 13-18.
- 10 Саламова Н. В. Методы одновременной очистки дымовых газов ТЭС от оксидов серы и азота / Н. В. Садамова // Электрические станции. – 1997. – № 12. – С. 56-60.
- 11 Котлер В. Р. Упрощенная схема рециркуляции дымовых газов как средство сокращения выбросов оксидов азота / В. Р. Котлер, Е. Д. Кругляк, С. Е. Беликов, Б. Н. Васильев // Энергетика. – 1995. – № 1. – С.16-17.
- 12 Жабалова Г. Г. Комплексное снижение вредных выбросов на ТЭЦ / Г. Г. Жабалова, О. Н. Онищенко, О. Н. Леликова // Вестник науки и образования. – 2017. – №12 (36). – С. 12-15.
- 13 Кобзарь С. Г. Снижение выбросов оксидов азота в газовых котлах методом рециркуляции дымовых газов / С. Г. Кобзарь, А. А. Халатов // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 4. – С. 5-11.
- 14 Волковинський В.А. Спалювання низькосортного вугілля з попередньої термопідготовки в вихровому пальнику / В.А. Волковинський, І .Я. Толмачов // Теплоенергетика. – 1994 – №9. – С. 42-48.

15 Пат. 42038 UA, МПК F23D17/00. Спосіб факельного спалювання вугілля / Корчевой Ю.П., Дунаєвська Н.І., Кукота Ю.П., Бондзик Д.Л., Нехамін М.М. – №200814337; заявл.12.12.2008; опубл.12.06.2009, Бюл. №12.- 3с.

16 Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: справочное издание: в 3-х книгах: книга 1 / [сост. Лисенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г.; ред. Лисенко В.Г.]. – М.: Теплотехник, 2004. – 608 с.

17 Беляев А. А. Сжигание высокозольного топлива и возможности его использования на ТЭС / А. А. Беляев // ХТТ. – 2005. – № 1. – С. 44–53.

18 Кузнецов Б. Н. Термокаталитические процессы при получении химических продуктов из природных органических полимеров ископаемых углей и биомассы / Б. Н. Кузнецов // ХТТ. – 1999. – № 2. – С. 3-14.

19 Мадоян А.А. Эффективное сжигание низкосортных углей в энергетических котлах / А.А. Мадоян, В.Н. Балтян, А.Н. Гречаный. – М.: Энергоатомиздат, 1991. –200с.

20 Майстренко О.Ю. Технології спалювання вугілля у факелі / О.Ю. Майстренко, Н.І. Дунаєвська, І.О. Майстренко // Теплової енергетика – нові виклики часу. – Львів: НВФ „Українські технології”. – 2009. – С. 303-316.

21 Мисак Й.С. Паливні пристрої для спалювання низкосортних палив / Й. С. Мисак, Я.М. Гнатишин, Я.Ф. Івасик. – Львів: «Львівська політехніка», 2002. – 135 с.

22 Побіровський Ю.М. Ефективність топкового режиму енергетичних котлів при висококонцентрованій пилоподачі низькорекційного вугілля: автореферат дис. на здобуття наук. ст. канд. техн. наук: спец. 05.14.14.– теплові і ядерні енергоустановки. – Київ: НТУ“КПІ”, 2003. – 25 с.

23 Smoot L. D. NO<sub>x</sub> control through coal reburning [Текст] / L. D. Smoot S. C. Hill, H. Xu // Prog. Energ. Combust. Sci. – 1998. – Vol. 24, No 5. – P. 385–408.

24 Mal P. M. Alternative fuel reburning [Текст] / P. M. Maly, V. M. Zamansky, L. Ho, R. Payne // Fuel. – 1999. – Vol. 78, No. 3. – P. 327– 334.

25 Кобзар С. Г. Визначення ефективності зниження викидів оксидів азоту системою ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312 блоку № 6 ДТЕК Ладизинська ТЕС / С.Г. Кобзар, А.А. Халатов // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – №13 (1056). – С. 85-91.

*Надійшла до редакції 27 серпня 2018 р.*

***H. V. Koshlak, A. M. Pavlenko***

*Ivano-Frankivsk National  
Technical University of Oil and Gas*

## **TECHNICAL SOLUTIONS FOR DECREASING NO<sub>x</sub> EMISSIONS AT COAL THERMAL ELECTRIC POWER STATIONS**

Most power-generating units at the Ukrainian thermal electric power stations were designed to burn hard coal mined in Ukraine, but today due to physical depreciation of the stations, those units are in non-project manoeuvring peaking operation what leads to the increase in both the specific fuel equivalent consumption and in harmful environmental emissions.

The purpose of the research is to develop recommendations on the selection of optimal technical solutions aimed at reducing NO<sub>x</sub> emissions of oxides at the operating boilers of Burshtyn thermal electric power stations (TEPS) under the conditions of regime-technological measures.

The article analyzes the main approaches to developing and selecting technological methods aimed at reducing emissions of coal thermal power stations and identifies prospects for their work in accordance with modern environmental requirements. The mechanisms of the transformations of the organic fuel bound nitrogen undergoes when heated are determined. To reduce the amount of NO<sub>x</sub> emissions in combustion products, it is offered to apply the regime-technological mode of the preliminary heating the pulverized coal mixture. The results of thermo chemical studies of coal samples used at Burshtyn TEPS are presented. The temperature ranges are determined at which the maximum emissions



of volatile combustible compounds takes place before to the upper flammability limit of the pulverized coal mixture is reached.

It was determined that under the conditions of actual burning process, there is a clear sequence: a release of volatile components and burning of the coke residue; heating of the pulverized coal mixture; emission of volatile combustible compounds; their burning; heating of the coke residue up to initiation of its combustion; the coke residue burning-out. A pulverized coal stream is brought into the furnace without being preliminary mixed up with air. While burning the pulverized coal stream, fuel particles are heated and degassed in the zone immediately adjacent to the burner section where there is a shortage of oxygen, whereas the oxygen concentration in the flow is a gradually increasing.

The regime-technological measures that are aimed at inhibiting NO<sub>x</sub> oxides formation by preliminary heat treatment of the pulverized coal mixture; they make it possible to obtain the maximum emissions of volatile combustible compounds before the upper flammability limit of the pulverized coal mixture is reached. It was found out that heat treatment should be carried out at temperature from 540-580° C. This is the temperatures range when the maximum emission of volatile combustible compounds takes place. After this combustion occur in an environment that is practically devoid of oxygen, where competing reactions of formation of volatile components and molecular nitrogen occur simultaneously. Thereafter, combustion can proceed in the practically oxygen-free environment with competing parallel reactions the forming volatile components and molecular nitrogen. This method allows to almost halving the concentration of nitrogen oxides in flue gases.

**Keywords:** NO<sub>x</sub> emission reduction, thermal electric power stations, fuel combustion technology, thermal treatment.

### References

- 1 Energetichnoï strategii Ukraïni na period do 2035 roku «Bezpeka, energoefektivnist', konkurentospromozhnist'»: rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukraïni vid 18 serp. 2017 r. № 605-r [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu :<http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80>
- 2 [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : [https://www.energy-community.org/.../Decision\\_2013\\_05\\_...](https://www.energy-community.org/.../Decision_2013_05_...)
- 3 Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 Oct. 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants // Official Journal of the European Union, L309/1, 27.11.2001.
- 4 [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: <http://enref.org/docs/dyrektyva-2010-75-es-promyslovi-vykydy/>
- 5 Zelena kniga. Zmenschennya shkidlivih vikidiv u teploviy elektroenergetici Ukraïni cherez vikonannya vimog Evropejs'kogo energetichnogo spivtovaristva. – Kiïv: Mizhnarodnij centr perspektivnih doslidzhen', 2011. – 43 s.
- 6 Zel'dovich Ya. B. Okislenie azota pri gorenii / Ya.B. Zel'dovich, P. Ya. Sadovnikov, D.A. Frank-Kameneckij. – L.: Izd-vo AN SSSR, 1947. – 148 s.
- 7 Hzmalyan D.M. Teoriya gorenija i topochnye ustrojstva / D.M. Hzmalyan, Ya.A. Kavgan. – M.: Energiya, 1976. – 487s. 8. Ivasik Ya. F. Koncentracii oksidiv azotu v pilovugil'nomu kotli TP-92 pri zminah rezhimiv roboti / Ya. F. Ivasik // Ekotekhnologija i resursosberezhenie. – 2000. – № 4. – S. 52-54.
- 8 De Soete G.G. Overall reaction rates of NO and N<sub>2</sub> formation from fuel nitrogen, 15th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, 1975. – P. 1093 -1102.
- 9 Tumanovskij A. G. Perspektivy vnedreniya nailuchshih dostupnyh tekhnologij po ohrane atmosfery na predpriyatijah teplovoj energetiki / A. G. Tumanovskij, A.N. Chugaeva, O. N. Bragina, A. M. Zykov, G. A. Ryabov, A. M. Volodin // Elektricheskie stancii. – 2016. – № 7 – (1020). – S. 13-18.
- 10 Salamova N. V. Metody odnovennoy ochistki dymovyh gazov TES ot oksidov sery i azota / N. V. Sadamova // Elektricheskie stancii. – 1997. – № 12. – S. 56-60.
- 11 Kotler V. R. Uproshchennaya skhema recirkulyacii dymovyh gazov kak sredstvo sokrashchenija vybrosov oksidov azota / V. R. Kotler, E. D. Kruglyak, S. E. Belikov, B. N. Vasil'ev // Energetika. – 1995. – № 1. – S.16-17.
- 12 Zhabalova G. G. Kompleksnoe snizhenie vrednyh vybrosov na TEC / G. G. Zhabalova, O. N. Onishchenko, O. N. Lelikova // Vestnik nauki i obrazovaniya. – 2017. – №12 (36). – S. 12-15.
- 13 Kobzar' S. G. Snizhenie vybrosov oksidov azota v gazovyh kotlah metodom recirkulyacii dymovyh gazov / S. G. Kobzar', A. A. Halatov // Promyshlennaya teplotekhnika. – 2009. – T. 31, № 4. – S. 5-11.
- 14 Volkovins'kij V.A. Spalyuvannya niz'kosortnogo vugillya z poperedn'oï termopidgotovki v vihrovomu pal'niku / V.A. Volkovins'kij, I. Ya. Tolmachov // Teploenergetika. – 1994 – №9. – S. 42-48.

- 15 Pat. 42038 UA, MPK F23D17/00. Sposib fabel'nogo spalyuvannya vugillya / Korchevoj Yu.P., Dunaevs'ka N.I., Kukota Yu.P., Bondzik D.L., Nekhamin M.M. – №200814337; zayavl.12.12.2008; opubl.12.06.2009, Byul. №12.- 3s.
- 16 Topливо. Racional'noe szhiganie, upravlenie i tekhnologicheskoe ispol'zovanie: spravochnoe izdanie: v 3-h knigah: kniga 1 / [sost. Lisenko V.G., Shchelokov Ya.M., Ladygichev M.G.; red. Lisenko V.G.]. – M.: Teplotekhnika, 2004. – 608 s.
- 17 Belyaev A. A. Szhiganie vysokozol'nogo topliva i vozmozhnosti ego ispol'zovaniya na TES / A. A. Belyaev // HTT. – 2005. – № 1. – S. 44–53.
- 18 Kuznecov B. N. Termokataliticheskie processy pri poluchenii himicheskikh produktov iz prirodnyh organicheskikh polimerov iskopaemyh uglej i biomassy / B. N. Kuznecov // HTT. – 1999. – № 2. – S. 3-14.
- 19 Madoyan A.A. Efektivnoe szhiganie nizkosortnyh uglej v energeticheskikh kotlah / A.A. Madoyan, V.N. Baltyan, A.N. Grechanyj. – M.: Energoatomizdat, 1991. –200s.
- 20 Majstrenko O.Yu. Tekhnologii spalyuvannya vugillya u fakeli / O.Yu. Majstrenko, N.I. Dunaevs'ka, I.O. Majstrenko // Teplova energetika – novi vikliki chasu. – L'viv: NVF „Ukrains'ki tekhnologii”. – 2009. – S. 303-316.
- 21 Misak J.S. Palivni pristroi dlya spalyuvannya niz'kosortnih paliv / J. S. Misak, Ya.M. Gnatishin, Ya.F. Ivasik. – L'viv: «L'vivs'ka politekhnika», 2002. – 135 s.
- 22 Pobirovs'kij Yu.M. Efektivnist' topkovogo rezhimu energetichnih kotliv pri visokokontrovanij pilopodachi niz'koreakciynogo vugillya: avtoreferat dis. na zdobuttya nauk. st. kand. tekhn. nauk: spec. 05.14.14.– teplovi i yaderni energoustanovki.– Kiïv: NTU“KPI”, 2003.–25 s.
- 23 Smoot L. D. NOx control through coal reburning [Tekst] / L. D. Smoot S. C. Hill, H. Xu // Prog. Energ. Combust. Sci. – 1998. – Vol. 24, No 5. – P. 385–408.
- 24 Mal P. M. Alternative fuel reburning [Tekst] / P. M. Maly, V. M. Zamansky, L. Ho, R. Payne // Fuel. – 1999. – Vol. 78, No. 3. – P. 327– 334.
- 25 Kobzar S. G. Vyznachennya efektyvnosti znizhennya vikidiv oksidiv azotu sistemoyu stupenevogo spalyuvannya vugillya kotla TPP-312 bloku № 6 DTEK Ladzhins'ka TES / S.G. Kobzar, A.A. Halatov // Visnik NTU «HPI». – 2014. – №13 (1056). – S. 85-91.