

Ю.Г. Куцан, Київ  
Г.В. Кравчук, Київ

## ДВОРІВНЕВА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА УТИЛІЗАЦІЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ ТЕС ДІЄВИЙ ЗАСІБ ДЛЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

**Abstract.** The combustion of fuels in TPP boilers or in the combustion chambers of the GTU generates combustion products that are emitted by flue gases into the atmosphere, polluting the environment. In the work it is proposed to reduce such impact through the useful use of flue gases and by monitoring both the gas environment in technological processes and the environmental emissions of pollutants into the atmosphere at TPP operation. The possibility of introducing a scheme of ash removal from under electrostatic precipitators at thermal power plants is considered, which allows to utilize flue gases. The calculation of the concentration of combustion products in the flue gases and a generalized model of control of technological processes of the boiler TPP on the basis of the obtained indicators from the conducted flue gas monitoring are presented.

На ТЕС внаслідок спалювання палив у котлоагрегатах або в камерах згорання ГТУ та ПГУ утворюються різні продукти згорання такі, як оксиди вуглецю, оксиди сірки, оксиди азоту, мазутна зола, зола твердого палива та ін., які виносяться димовими газами в атмосферу та забруднюють навколишнє середовище, негативно впливають на здоров'я населення, флору і фауну. Також, присутнє теплове забруднення, що пов'язане з втратами теплоти з відхідними газами котла. Вони є основними в тепловому балансі котла і залежать від виду палива, температури відхідних газів, організації процесу спалювання в топці і конструктивних особливостей котла. Питомі викиди шкідливих продуктів згорання органічного палива наведені в табл. [1]. Викиди поширюються на сотні і тисячі кілометрів. Їх забруднення довкілля набуває глобального характеру, особливо це стосується пилувугільних ТЕС, а витрати на його охорону стали суміжні з величиною екологічного збитку. Таким прикладом є аварія, що відбулася 5-го серпня 2019 року на енергоблоці ст. № 10 ДТЕК Придніпровської ТЕС, де стався викид димових газів і пари в результаті технологічного порушення, викликаного пошкодженням труби у верхній частині котла.

Забруднення навколишнього середовища можна зменшити шляхом корисного використання димових газів та безперервного моніторингу як за газовим середовищем в технологічних процесах, так і за екологічними викидами токсичних газів в атмосферу при роботі ТЕС. Система моніторингу димових газів на вихідному газоході котла дозволить оптимізувати процес горіння, зменшити споживання палива, викиди токсичних газів на питому одиницю палива. Визначення складу продуктів спалювання дає змогу

оцінити: ступінь завершеності процесу згорання палива (втрат від хімічної неповноти горіння), умови згорання палива (коефіцієнт надлишку повітря), характер згорання палива в окремих зонах котла (наприклад, наявність компоненту  $\text{CH}_4$  означає нерівність перемішування палива з повітрям, проскок неспаленого газу, наявність локальних низькотемпературних зон), динаміку процесу горіння, дотримання гранично допустимих норм концентрацій викинутих в атмосферу шкідливих речовин [2]. Комп'ютерна обробка вимірювань дозволить побудувати бази даних і тим самим аналізувати відхилення від технологічного процесу з метою управління цими процесами підвищуючи ефективність роботи котлоагрегатів ТЕС.

Таблиця

Питомі викиди шкідливих продуктів згорання при факельному спалюванні органічних палив в енергетичних котлах

Викиди	Природний газ, г/м <sup>3</sup>	Мазут, кг/т	Вугілля, кг/т
Оксиди сірки SO <sub>x</sub> (в перерахунку на SO <sub>2</sub> )	0,0006 – 0,0,1	21S <sup>P</sup>	(17 – 19)S <sup>P</sup>
Оксиди азоту NO <sub>x</sub> (в перерахунку на NO <sub>2</sub> )	5 – 11	5 – 14	4 – 14
Монооксид вуглецю CO	0,002 – 0,005	0,005 – 0,05	0,1 – 0,45
Вуглеводні	0,016	0,1	0,45 – 1,0
Водяні пари H <sub>2</sub> O	1000	700	230 – 360
Діоксид вуглецю CO <sub>2</sub>	2000	3000	2200 – 3000
Летюча зола, шлак	-	10A <sup>P</sup>	10A <sup>P</sup>

Примітка: S<sup>P</sup>, A<sup>P</sup> – відповідно вміст сірки та золи на робочу масу палива.

Система моніторингу має бути дворівнева, що передбачає технологіко-екологічний моніторинг та оптимізацію процесів горіння [3].

Перший рівень системи встановлений у зоні виходу продуктів горіння котла, другий рівень системи – на вихідних газоходах після електрофільтрів.

Моніторинг здійснюється за рахунок отримання інформації про джерела та фактори, які впливають на коливання концентрації показників в димових газах. Для їх розрахунку, як правило, застосовується ітераційний метод.

Метод ітераційний заснований на розв'язування обернених задач розсіювання забруднень в локальних масштабах.

Розрахунок ведеться таким чином:

Задаються  $n$  точок вимірювання концентрацій забруднень з координатами

$$X_i, Y_i, i = 1 \dots n. \quad (1)$$

В цих точках на протязі певного часу вимірюється концентрація забруднень  $C_{ik}$  в моменти часу  $t_k$

$$C_{ik} = C_i(t_k), i = 1 \dots n, k = 1 \dots l. \quad (2)$$

Зміна концентрацій забруднень пов'язана з впливом  $m$  джерел забруднень, координати яких

$$X_j^*, Y_j^*, j = 1 \dots m. \quad (3)$$

Якщо вважати метеорологічні умови сталими, то розрахована результуюча концентрація забруднень в точці  $i$ , перенесена з джерела  $j$ , залежить від координат джерела та точки вимірювання

$$C_{ijk}^* (X_i, Y_i, X_j^*, Y_j^*), i = 1 \dots n, j = 1 \dots m, k = 1 \dots l. \quad (4)$$

Оскільки на кожну точку вимірювання впливають кілька джерел, сумарна концентрація може бути розрахована як сума

$$C_{ik}^* = \sum_{j=1}^m C_{ijk}^* (X_i, Y_i, X_j^*, Y_j^*), i = 1 \dots n, k = 1 \dots l. \quad (5)$$

При цьому розрахована концентрація забруднень буде близькою до вимірюваної концентрації  $C_{ik}$

$$C_{ik} \approx C_{ik}^* \quad (6)$$

У випадку, коли координати джерел  $(X_j^*, Y_j^*)$  невідомі, вони можуть бути знайдені в результаті пошуку таких значень, при яких розрахована концентрація найближча до вимірюваної. Отже, мова йде про мінімізацію розходження між розрахунковими та вимірюваними концентраціями, що можна сформулювати як оптимізацію за критерієм розбіжності між розрахунковими та вимірюваними даними. В подібних задачах розбіжність характеризують середнім квадратом різниць між порівнюваними даними

$$F(X_j^*, Y_j^*) = \sum_{i=1}^n (C_i - C_i^*)^2 \rightarrow \min_{X_j^*, Y_j^*}, i = 1 \dots n, j = 1 \dots m, \quad (7)$$

де  $C_i = \sum_{k=1}^l C_{ik}$ ,  $C_i^* = \sum_{k=1}^l C_{ik}^*$ ,  $k = 1 \dots l$ .

Розв'язком вихідної задачі буде розв'язок задачі мінімізації

$$F(X_j^*, Y_j^*) \rightarrow \min_{X_j^*, Y_j^*, j=1 \dots m}.$$

Для спрощення розробки тестового програмного забезпечення в якості такої моделі використана модель ISC3ST, що реалізована як окремий модуль. Ця модель стандартизована агентством з охорони навколишнього середовища США [4].

Важливим аспектом є не тільки проведення моніторингу димових газів, але і можливість управляти технологічними процесами роботи обладнання.

Управління технологічними процесами включає сукупність послідовних дій, а саме: збір інформації; передача інформації в пункти збереження та їх обробка; аналіз збереженої інформації; прийняття рішень на основі проведеного аналізу; створення відповідного керуючого впливу; доведення цього впливу до об'єкта управління; перевірка стану об'єкта управління [5].

Управління дозволить зменшити вплив на навколишнє середовище та на процеси горіння в котлоагрегатах. На рис. 1 наведено узагальнену структурну модель управління технологічними процесами котлоагрегата ТЕС. На схемі позначені інформаційні потоки, які визначають взаємодію між параметрами:  $X$  – вектор стану (якості) показників (концентрації забруднень, рівень енергетичних впливів тощо),  $Z$  – параметри котлоагрегата, які визначають умови і результат негативної залежності показників.

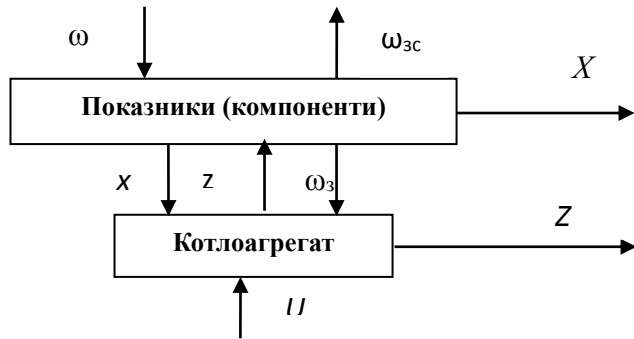


Рис.1. Узагальнена модель управління технологічними процесами котлоагрегата ТЕС.

Для даної моделі  $Z$  – множина станів котлоагрегату. При цьому  $x$  – множини впливів стану (якості) показників на параметри котлоагрегата;  $z$  – множини результатів економічної діяльності котлоагрегата;  $\omega$  – множина внутрішніх впливів на показники. Також потрібно врахувати  $\omega_3$  – множина зовнішніх впливів на роботу котлоагрегату, що визначають рівень екологічної безпеки;  $\omega_{зс}$  – множина впливів на зовнішнє середовище через показники, що визначають рівень роботи котлоагрегату;  $U$  – множина керуючих впливів на котлоагрегат.

Особам, що приймають рішення щодо виникнення в момент  $t$  несприятливої екологічної ситуації, необхідно завчасно подати інформацію для розробки керуючих впливів  $U$ , за допомогою яких можна контролювати та зменшувати негативний вплив на показники:  $\Delta X(t) < \epsilon, \epsilon \rightarrow 0$ .

Корисне використання димових газів підвищить ефективність роботи пилувугільних котлів ТЕС та мінімізує викиди в атмосферу за рахунок утилізації та очищення димових газів від пилу. Для цього розроблена схема

відведення золи з-під електрофільтрів фахівцями НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», що наведена на рис. 2 [6].

Запропонований спосіб сухого видалення золи з димових газів електростанцій реалізується наступним чином:

Під дією сил електричного поля та адгезії частинки золи, які містяться у димових газах котла, осаджуються на електродах електрофільтра 1 і після їх струшування накопичуються в збірних комірках 2, оснащених аероживильниками 3 із сумісними функціями затвору.

Частина газів з пневмотранспортної системи димососа 5 відводиться до рукавного фільтра 6 і газодувкою 7 транспортується в колектор 9, яким живляться аероживильники. Підтримка температури газів на рівні вище «точки роси» забезпечується підігрівником 8. Після зрідження в камерах аероживильників золова аеросуміш по трубопроводах 11 направляєється в колектор 12 з встановленими в ньому інжекторами 13 та надходить в пиловідокремлюючий циклон 14, у якому вона розподіляється на два потоки. Димові гази, очищені від золи, повертаються в направляючий короб електрофільтра 15, знижуючи температуру на його вході і підвищуючи ККД станції. Відділена зола по трубопроводу 16 відвантажується споживачеві чи направляєється на силос для зберігання.

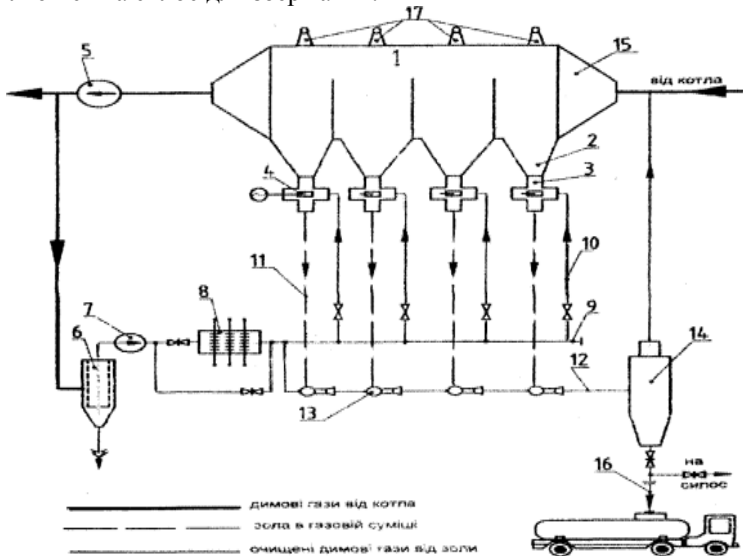


Рис. 2. Схема відведення золи з-під електрофільтрів на теплових електростанціях:  
 1 – електрофільтр; 2 – збірні комірки електрофільтра; 3 – аероживильники; 4 – затвор;  
 5 – димосос; 6 – рукавний фільтр; 7 – газодувка; 8 – підігрівач; 9 – колектор очищених та підігрітих димових газів; 10 – трубопровід очищених та підігрітих димових газів;  
 11 – трубопровід псевдозрідженої зологазової суміші; 12 – колектор псевдозрідженої зологазової суміші; 13 – інжектори; 14 – циклон; 15 – направляючий короб електрофільтра; 16 – трубопровід сухої золи; 17 – рівноміри.

Запропонована система транспортування сухої золи з-під електрофільтрів теплових електростанцій дозволяє за допомогою аероживильників здійснювати надійне збереження та видалення сухої золи з комірок електрофільтрів у зрідженому стані і її подальше корисне використання.

В наведеній схемі доцільно застосовувати аероживильники розробки НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» для газового вугілля, які є досить простими та компактними та забезпечують неперервне рівномірне розподілення газу в їх камерах [7].

До переваг схеми сухого відведення відноситься:

1. Корисне використання димових газів;
2. Утилізація теплоти відхідних димових газів котлів;
3. Підвищення КПД електрофільтра за рахунок підмішування димових газів на вхід електрофільтра;
4. Додаткове очищення димових газів від пилу в рукавному фільтрі та циклоні;
5. Зменшення викидів в атмосферу та платежі за них.

## **Висновки**

Застосування дворівневої системи моніторингу димових газів та використання узагальненої моделі управління технологічними процесами котлоагрегата ТЕС дозволить не тільки здійснювати контроль за викидами в атмосферу (збір, передачу, збереження інформації), але і аналізувати інформацію з метою створення відповідного керуючого впливу на роботу котлоагрегату для підвищення його ефективності.

Корисне використання димових газів в системі транспортування сухої золи з-під електрофільтрів теплових електростанцій дозволить утилізувати теплоту відхідних димових газів пилувугільних котлів, підвищити ККД електрофільтра, а очищення димових газів зменшити викиди в навколишнє середовище. Додатковою перевагою є отримана суха зола з-під електрофільтрів, яка може бути використана в будівельній галузі.

1. Безрук З.Д., Порев В.А., Харагоргієв С.М. Вдосконалення методів та засобів контролю забруднення атмосфери викидами сміттєспалювального заводу // Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування : збірник наукових праць. – 2009. – Вип. 37. – С.58-67.
2. На Придніпровський ТЕС палав енергоблок [Електронний доступ]. Веб-сайт. Дата доступу 05.08.2019. Режим доступу: <https://tsn.ua/ru/ukrayina/na-odnom-iz-energoblokov-pridneprovskoy-tes-proizoshla-avariya-1389849.html>. Загол. з екрану.
3. Приміський В.П., Вознюк А.А., Безрук З.Д. Створення систем технологічного моніторингу забруднення атмосфери // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності./ Київ. № 2, 2004. С.66-71.
4. Guideline on Air Quality Models (Revised) and Supplements. – EPA-450/2-78-027R et seq., published as Appendix W to 40 CFR Part 51 (7-1-99 Edition). U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, 1999.

5. Яцишин А.В., Куцан Ю.Г., Артемчук В.О., Каменева І.П., Попов О.О., Ковач В.О. Принципи та методи управління екологічною безпекою на основі інтелектуального аналізу даних мережі моніторингу атмосферного повітря // Електронне моделювання. – 2019. – Т.41, № 4 – С.85-101.

6. Кесова Л.О., Літовкін В.В., Кравчук Г.В., Симоненко М.П. Спосіб видалення золи з електрофільтрів на теплових електростанціях, патент UA № 109119 U МПК F23J 1/02 (2006.01) F23K(2006.01) B65G 53/04 (2006.01), Бюл. № 15 від 10.08.2016.

7. Літовкін В.В., Кесова Л.О., Гулієнко В.С. Аероживильник газового вугілля, патент UA № 93100 U МПК (2014.01) F23K 5/00, Бюл. № 18 від 25.09.2014.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.3859663>

*Поступила 10.10.2019р.*

УДК 004.94; 004.4'2

Р.П.Абрамович, Київ

В.Д.Самойлов, Київ

## ІМІТАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ МЕТОД КОНСТРУЮВАННЯ МОДЕЛЕЙ ТРЕНАЖЕРІВ

**Abstract.** The imitative-technological method of designing training simulators is presented, it is based on working processes specification of operational and dispatcher personal, which is formed on position instructions and other technical documentation.

### **Вступ**

Згідно існуючих підходів [1] тренажер повинен складатися з моделюючого пристрою, робочих місць учня (-ів) та інструктора, допоміжних систем. Задача моделюючого пристрою відтворювати з необхідною точністю модель об'єкта із заданим масштабом часу. В більшості сучасних тренажерів це забезпечується математичною моделлю об'єкта і її комп'ютерною реалізацією. Будемо називати такий підхід **об'єктно-математичним**. Об'єктно-математичний метод розробки моделей тренажерів, при якому основною складовою є багаторежимна математична модель об'єкта, є традиційним.

Об'єктно-математичний метод конструювання має такі ознаки:

– наявність комп'ютерної моделі на основі математичного опису об'єкта;

– динамічна поведінка на різних сценах сценарію здійснюється від однієї загальної моделі;

– кожне тренажерне заняття(ТрЗ) створюється і виконується на основі однієї комп'ютерної моделі об'єктаель;

© Р.П.Абрамович, В.Д.Самойлов