

УДК 662.93:006.86

INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR
OPTIMIZING THE CLEANING OF HEATING SURFACES
OF A SOLID FUEL ENERGY BOILER

R. Karpenko
National University of Food Technologies

Key words:	ABSTRACT
steam production, automation control, inertia of transient processes, adaptation of algorithms, decision support subsystem	One of the main problems today in the country’s energy sector is its energy independence and energy stability. After the start of the full-scale invasion of the russian federation, and the corresponding decrease in the supply of natural gas and oil products, the need for its replacement with alternative types of fuel increased.
Article history: Received 09.01.2024 Received in revised form 16.04.2024 Accepted 16.04.2024	During the operation of the boiler, contamination of the external heating surfaces occurs. On the heating surfaces, slag deposits are possible.
Corresponding author: rokiseroman@gmail.com	Combustion of alternative types of fuel requires additional mechanical impact on the heating surfaces of the solid fuel boiler, as a deposit appears on them, which impairs the transfer of heat from the furnace to the water pipe circuit, and in case of excessive and prolonged slagging, overheating of its individual sections and, as a result, pipe rupture.
	Intelligent decision-making support subsystem for a solid-fuel boiler helps to determine the general degree of contamination of the heating surfaces, and therefore, the frequency and intensity of their automatic soot cleaning, thereby preventing boiler slagging, which also depends on the efficiency of the boiler and its period of trouble-free operation.
	Consequently, intelligent decision-making support subsystem will improve the main technical and economic indicators of production and ensure the achievement of the following goals: reduction of regulation errors; prevention of emergency situations when the system lost the necessary accuracy due to disturbances or changes in the object’s parameters; reducing the number of ACS settings, accordingly reducing the influence of the human factor on the technological process; stabilization of operational parameters of the technological process to ensure the required steam quality; improvement of the working conditions of service personnel; increasing productivity, increasing resource efficiency of the process.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-8

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПІДСИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ОПТИМІЗАЦІЇ ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХОНЬ НАГРІВУ ТВЕРДОПАЛИВНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОТЛА

Р. В. Карпенко, здобувач PhD, <https://orcid.org/0009-0006-3873-3455>

Національний університет харчових технологій

Шлакування поверхонь нагріву твердопаливного котла характеризується накопичувальним ефектом і має ряд негативних впливів, зокрема порушення теплопередачі та гідродинамічного режиму роботи внаслідок зменшення теплосприйняття поверхонь нагрівання; підвищення температури продуктів згоряння на виході з топки; збільшення витрати електроенергії на тягу внаслідок підвищення аеродинамічних опорів; додаткові втрати палива тощо.

Підсистема підтримки прийняття рішень для твердопаливного котла в автоматичному режимі визначає періодичність та інтенсивність сажоочистки поверхонь нагріву, зважаючи на їхній загальний ступінь шлакування.

Ключові слова: виробництво пари, інерційність перехідних процесів, порадовий режим, підсистема підтримки прийняття рішень.

Вступ. Однією з головних проблем сьогодення в енергетичному секторі країни є її енергонезалежність та енергостабільність. Кожен новий день ставить перед українцями нові виклики. Після початку повномасштабного вторгнення російської федерації та, відповідно, зменшення обсягів поставок палива природного газу і нафтопродуктів зросла потреба в його заміщенні альтернативними видами палива. Ситуація, що склалася, має вкрай негативний вплив на підприємства та опалювальні котельні, що призводить до неможливості їх експлуатації без переведення на альтернативні види палива. Наявне перевантаження електромереж унаслідок використання деякими підприємствами електроенергії з мережі, замість власногенерованої, додатково ускладнює ситуацію. Завдання, що постають перед інженерами, вимагають швидких, але продуманих рішень, які будуть ефективними протягом тривалого часу. Такі дослідження пов'язані із забезпеченням енергонезалежності країни, а отже, є вкрай актуальними.

У процесі роботи котла виникає забруднення зовнішніх поверхонь нагрівання. На поверхнях нагріву можливе відкладення шлаку. Ці відкладення утворюються при температурі газів на виході з топки, більш високій, ніж температура розм'якшення золи, а також у високотемпературних зонах топки при незадовільній аеродинамічній організації топкового процесу в тих випадках, коли розплавлені частки золи, які не встигають остудитися і затвердіти, накидаються потоком газів на стінки топок і труби ескранів. Звичайне шлакування починається в проміжках між ескранними трубами, а також у застійних зонах і ділянках топки. Якщо температура топкового середовища в зоні утворення шлакових відкладень нижча за температуру початку деформації золи, то зовнішній шар шлаку складається із затверділих часток. При підвищенні температури зовнішній шар шлаку може оплаватися, що сприяє налипанню нових часток і прогресуючому шлакуванню (рис. 1).

Шлакування зменшує теплосприйняття поверхонь нагрівання, розташованих у топці, і підвищує температуру продуктів згоряння на виході з топки, що може призвести до порушення нормального гідродинамічного режиму роботи ескранів. Навколо

пароперегрівника, якщо температура газів низька, мають місце ущільнені відкладення твердих часток золи. В економайзері утворюються пухкі сипучі відкладення дрібних фракцій золи, причому ріст забруднюючого шару супроводжується руйнуванням його більш великими частками, у результаті чого встановлюються динамічна рівновага і сталий стан забруднюючого шару. Зольність палива не впливає на товщину забруднень. Після досягнення визначеної товщини забруднень, зола більше не осаджується на забруднених трубах. Товщина липких забруднень в області низьких температур залежить від характеристик золи і прогресує в часі.



Рис. 1. Забруднена водотрубна частина екранних труб і фрагмент перегрітої екранної труби

Унаслідок забруднення конвективних поверхонь нагрівання погіршуються умови теплопередачі і підвищуються їхні аеродинамічні опори. В результаті підвищується температура відхідних газів, збільшуються втрати палива і витрата електроенергії на тягу. Під коефіцієнтом забруднення розуміють термічний опір шару відкладень:

$$\varepsilon = \delta_s / \lambda_s, \quad (1)$$

де δ_s — товщина шару відкладень, м; λ_s — теплопровідність шару відкладень, Вт/(м·°С).

ε залежить від швидкості потоку, діаметра труб, що обтікаються, і їхнього розташування в пучці. Для коридорного розташування поверхонь нагріву ε завжди вище, ніж для шахового. Відкладення призводять до зниження коефіцієнта теплопередачі в поверхнях нагрівання і підвищенню температури відхідних газів, тобто зменшується ККД котла [1].

Тож при спалюванні альтернативних видів палива (пелета лушпиння соняшника,

гранульований жом, тріска деревини тощо), поряд з наявністю та відносною дешевиною сировини, виникає ряд проблем:

1) підвищена температура вихідних газів перед рукавними фільтрами, що призначені для їх очистки, досягає 190—200 °С, що не дозволяє їх експлуатувати, адже при такій температурі починається руйнування рукавів;

2) зменшення ККД котла за рахунок зменшення коефіцієнта теплопередачі від димових газів до води та пари (водотрубного контуру);

3) підвищення ризику виходу з ладу трубної системи поверхонь нагріву внаслідок перегрівання ділянок труб з надмірним засміченням золою.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Проблема управління та оптимізації виробничого процесу котла для підвищення продуктивності котла активно досліджується в усьому світі [2, 3]. Утворення золи на поверхнях теплопередачі завжди було однією з головних проблем твердопаливних котлів. За оцінками, втрати становлять 1% за нормальних умов експлуатації, що є важливим показником енергоефективності [4]. Дані, зібрані під час опитування, проведеного Інститутом досліджень електроенергії (EPRI), показали, що 7% установок страждають від частого забруднення, у 40% виникають випадкові проблеми [5]. За останні десятиліття можна знайти велику кількість тематичних досліджень [6—11], що свідчить про постійний інтерес у всьому світі до цієї проблеми.

Забруднення золою призводить до зменшення теплопоглинання та втрати термічної ефективності [12]. Традиційно послідовність сажообдудування проводиться за періодичним розкладом або за рішенням оператора, що в багатьох випадках призводить до надмірного обдудування. З одного боку, кожен зайвий процес сажообдудування означає втрату ефективності котла, оскільки це передбачає додаткові енергетичні та економічні витрати. З іншого боку, недостатнє сажообдудування викликає перегрів і прискорення ерозії труби, деградацію труб і зниження довговічності котла. Цей факт є очевидним і був визначений ще на ранніх етапах проєктування котлів [13].

Отже, проблема має оптимізаційний характер, оскільки спрямована на мінімізацію сумарних витрат на операції з видалення забруднень і сажі.

Так, у [14] автори звертають увагу на важливі відхилення в розповсюдженні теплового потоку, підкреслюючи локальний характер епізодів очищення в більшості випадків.

Мета дослідження: знайти залежності в параметрах роботи твердопаливного котла, щоб в автоматичному режимі визначати періодичність та інтенсивність сажоочистки поверхонь нагріву. На основі отриманих залежностей, розробити підсистему підтримки прийняття рішень, що допомагатиме оператору в порадчому режимі вчасно запускати обдувні апарати.

Впровадження інтелектуальної підсистеми підтримки прийняття рішень дасть змогу забезпечити досягнення таких цілей: запобігати шлакуванню поверхонь нагріву, підтримувати ККД котла на сталому рівні, збільшити строк безаварійної роботи, збільшити економію виробництва пари, зменшити вплив людського фактора; стабілізувати параметри технологічного процесу для забезпечення необхідної якості пари; підвищення продуктивності, підвищення ресурсоефективності процесу.

Матеріали і методи. Моніторинг забруднення золою можна здійснити за допомогою оперативних розрахунків та спеціального обладнання або комбінації обох методів. Теплопоглинання поверхонь теплопередачі завжди потрібно розраховувати в режимі онлайн. Загальноприйнятим методом розрахунку швидкості теплопоглинання є логарифм середньої різниці температур [16]. Однак це метод статичного ба-

лансу, під час якого не можна показати динамічну поведінку поверхонь теплопередачі. Спеціальні вимірювальні прилади, такі як вимірювачі теплових потоків [17], можуть добре відображати стан поглинання тепла поверхнями теплообміну, надаючи безперервний сигнал. Але їх застосування призводить до значного збільшення вартості датчиків, їх встановлення й обслуговування. Нейронна мережа добре використовується для моніторингу забруднення золою [14, 18], але це складно реалізувати для моніторингу в реальному часі через великий обсяг обчислень. Метод, розроблений у цій статті, можна використовувати для моніторингу рівня забруднення золою поверхонь теплообміну в режимі онлайн без надмірних витрат.

У цій статті представлено комплексний підхід до оперативного моніторингу й оптимізації системи сажообдувки в котлах, що працюють на твердому паливі. Завдяки моніторингу золотого забруднення теплообмінних поверхонь котла на основі методу динамічного масоенергетичного балансу в режимі онлайн можна оцінити роботу системи сажообдувки котла. Розробляються відповідні процедури для оптимізації частоти та тривалості сажообдувки. Для ілюстрації запропонованих методологій наведено результати моніторингу й аналіз експериментального застосування. Запропоновані методи можуть бути застосовані для оцінки стану й управління роботою системи обдувки котла для досягнення мети енергозбереження. Інтелектуальне видалення сажі є поєднанням моделювання, техніки програмного обчислення та онлайн системи для моніторингу продуктивності котла.

Результати досліджень. На основі аналізу специфіки роботи твердопаливних котлів було визначено, що сучасні системи автоматизації технологічних процесів володіють різнотипною інформацією, яка може бути використана підсистемою підтримки прийняття рішень з метою підвищення стійкості основних показників ефективності виробництва пари й обладнання котлоагрегату в цілому, під час інерційних перехідних процесів, та залежно від типу твердого палива, що спалюється (тріска деревини, пелета лушпиння соняшника, гранульований жом, кам'яне вугілля тощо), його поточних характеристик.

Парове обдування створює достатній динамічний напір струменя:

$$H = W_l^2 / (2v_n), \quad (2)$$

де W_l^2 — осьова швидкість; v_n — питомий об'єм пари.

При тиску пари 4 МПа на відстані 3 м від виходу струменя динамічний напір буде дорівнювати $2000 \text{ Па} < H_{l=3 \text{ м}} > 2000 \text{ Па}$.

Для видалення сипучих відкладень досить мати тиск $H_{ек} = 200 \dots 250 \text{ Па}$.

Для видалення щільних відкладень $H_{н.н} = 400 \dots 500 \text{ Па}$.

Для видалення шлакових наростів $H_m = 2000 \text{ Па}$.

Як видно з графіка (рис. 4), всього за 8 год роботи котла температура вихідних газів зростає з 172°C до 194°C , при роботі на твердому паливі (пелета лушпиння соняшника). Після спрацювання всіх апаратів парової обдувки по тракту газоходу частинки сажі збиваються з трубної системи поверхонь нагріву і при цьому покращується теплопередача між водою/парою та димовими газами. Пара та вода відбирають більше тепла в димових газів, а отже, гази охолоджуються, що при значеннях до 180°C дає змогу використовувати рукавні фільтри очищення димових газів, щоб зменшити забруднення навколишнього середовища. У свою чергу, внаслідок ефективного відбору тепла водою та паром підвищується ККД котла, що призводить до зменшення витрати палива, а отже, економії енергоносіїв.

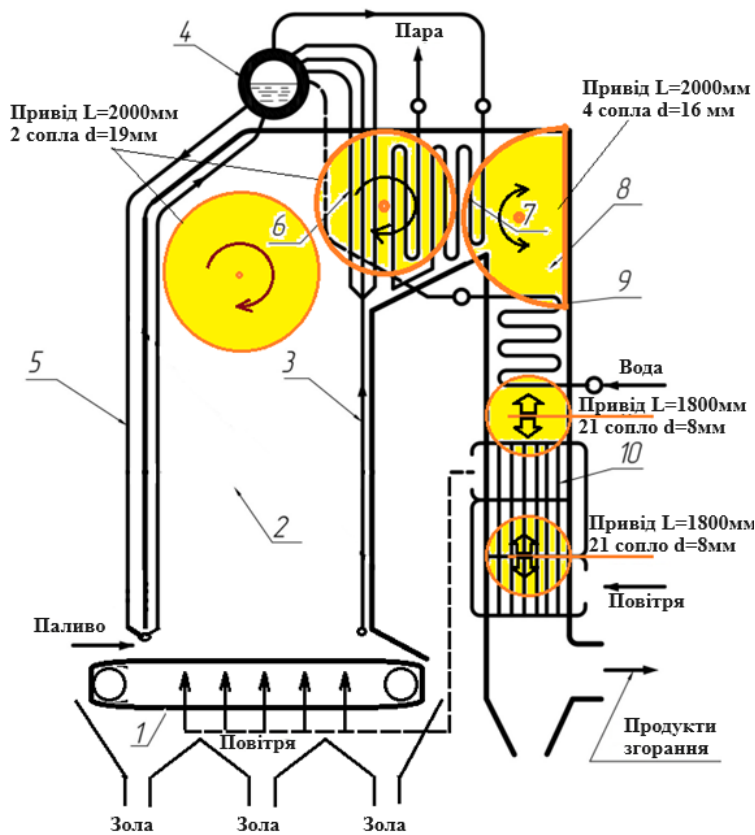


Рис. 2. Технологічна карта встановлення парових обдувних апаратів:

1 — колосникова решітка; 2 — топочна камера; 3 — екранні поверхні нагріву; 4 — барабан; 5 — система опускних труб циркуляційного контуру екранів; 6 — фестон; 7 — пароперегрівник; 8 — опускний газохід; 9 — водяний економайзер; 10 — повітропідігрівник

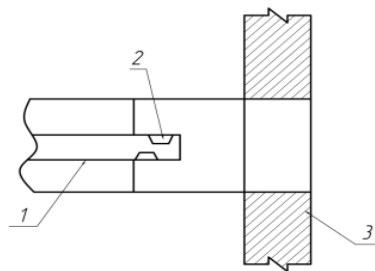


Рис. 3. Схема пристрою для парової обдувки:

1 — обдувочна голівка; 2 — сопла; 3 — обмурівка котла

Дослідження роботи котлів на твердому паливі (кам'яне вугілля) при спалюванні шаром на колосниковій рухомій решітці показує, що налипання частинок легкої золи відбувається не так інтенсивно, як при спалюванні біопалива — пелети лушпиння соняшника чи гранульованого бурякового жому, що надає можливість проводити обдування поверхонь нагріву раз на 2—3 доби. При цьому температура відхідних димових газів рідко підіймається до відмітки 180 °С, що дає змогу безперешкодно використовувати рукавні фільтри очищення димових газів.



Рис. 4. Графік температури відхідних газів та вплив обдувки поверхонь нагріву на процес теплопередачі

Основна концепція інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (ІСППР) полягає в тому, щоб підказати оператору процесу найоптимальніший момент для запуску процедури сажобдувки для максимізації переваги від її застосування. Переваги можна виразити як різницю між перевагами сажобдування та затратами енергії на цей процес. Перевага сажобдування розглядається як підвищення ефективності теплопередачі для кожної поверхні нагріву, а основні втрати, з якими потрібно мати справу, це втрата ефективності котла та витрачання перегрітої пари для забезпечення процесу обдувки.

Загалом, тиск і швидкість потоку перегрітої пари, яка використовується для сажобдування, завжди стабільні протягом усього періоду сажобдувки за рахунок дроселювання потоку. Отже, втрати за рахунок витрати пари при кожному циклі сажобдувки $Q_{обд}$ можна розрахувати таким чином:

$$Q_{обд} = F_{обд} T_{обд} (h_{др} - h_{гп}), \quad (3)$$

де $F_{обд}$ — масова витрата пари, що здуває сажу; $T_{обд}$ — час сажобдування; $h_{др}$ — ентальпія дренажної пари; $h_{гп}$ — ентальпія гострої пари, відповідно. Очевидно, що споживання пари лінійно залежить від часу. Переваги (збільшення ефективності теплопередачі), викликані сажобдувом, лінійно залежать від часу. На початковому етапі обдувки ефективність тепловіддачі зростає швидко, а з плином часу — повільніше.

Зазвичай, на ТЕС і ТЕЦ, що працюють на вугіллі чи біомасі, операції з видалення сажі завжди виконуються з фіксованою частотою й тривалістю, тому необхідна оптимізація циклу сажобдувки. В цій статті розглядається застосування методу мінімальних втрат для оптимізації циклу сажобдувки. На рис. 6 графічно показано зростання втрат в часі $f(t)$ для одного циклу. Втрати від роботи сажобдувок приймаються як постійні втрати $Q_{обд}$ протягом періоду часу $T_{обд}$. Тож втрати (B) протягом одного циклу сажобдувки можна виразити як площу під кривою:

$$B = \int_0^{T_1} f(t) dt + Q_{обд} T_{обд} = \int_0^{T_1} f(t) dt + F_{обд} T_{обд} (h_{др} - h_{гп}), \quad (4)$$

де T_1 і $T_{обд}$ — час циклу та час сажобдування.

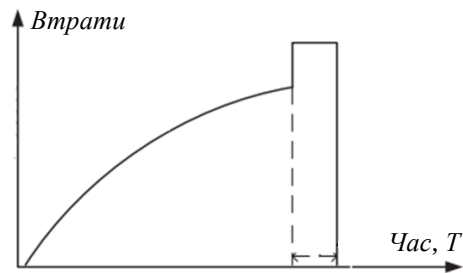


Рис 5. Втрати в часі між циклами сажообдувки

На рис. 6 зображено декілька циклів сажообдувки, що слідують один за одним. Отже, проблема полягає в мінімізації втрат.

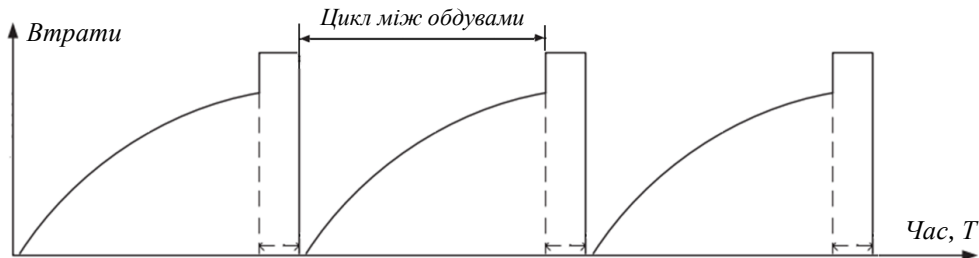


Рис. 6. Втрати в часі протягом декількох циклів сажообдувки

Кожен оптимальний час T циклу можна порівняти з відповідним часом $T_{обд}$ циклу сажообдування, щоб визначити пріоритетність обдувного апарату, якщо на котлі більше однієї поверхні теплообміну, на якій вони встановлені. Першою буде обдуватись та поверхня, тривалість циклу якої перевищує оптимальний час циклу. Результати розрахунків для кожної конвекційної поверхні теплообміну в досліджуваному котлі наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Оптимальний час циклу обдувки

Поверхня нагріву	Втрати пари з обдувкою, $Q_{обд}$, КДж/с	Тривалість обдувки $T_{обд}$, с	Оптимальний цикл обдувки, T , с	Цикл обдувки	
				Існуючий час T , с	Різниця $T - T_{обд}$, с
Високотемпературний пароперегрівач (2 ступінь)	3400	1200	13,3	39,6	-26,3*
Пароперегрівач (1 ступінь)	3400	900	25,8	39,6	-13,8*
Водяний економайзер	3400	900	9,6	39,6	-30,0*
Повітряпідігрівач	3400	600	33,9	39,6	-5,7*

Примітка. *Жирним у таблиці виділено результати розрахунків.

На основі результатів розрахунків наступні операції з сажообдувки слід почина-ти спочатку з низькотемпературних поверхонь нагріву з тривалістю, наведеною в табл. 1 (стовпець «Різниця $T - T_{обд}$, с»).

Щоб застосувати метод до фактичного процесу системи сажобдудвання, необхідно враховувати коливання навантаження. Крім того, необхідно підтримувати не тільки теплову ефективність кожної поверхні передачі на високому рівні, але також не можна надмірно витрачати перегріту пару, яка використовується для сажобдудвання. Мета полягає в тому, щоб уникнути надмірних обдудвань сажі, зберігаючи високу ефективність теплопередачі. У такому випадку проблема оптимізації процедури сажобдудвання полягає в тому, «коли починати сажобдудвання поверхні нагріву?» і «яка тривалість процедури сажобдудвання одним апаратом цієї поверхні?»

Припустимо, що існує обмеження для частоти сажобдудвання, і подальше обдудвання понад це значення не може підвищити ефективність, і отже, буде марним. Тому основна ідея полягає в тому, щоб обдудувати секцію, яку потрібно очистити, залежно від стану її забруднення.

Як зазначалося вище, втрати від сажовидудання можуть бути визначені шляхом оперативного розрахунку. Швидкість накопичення сажі визначається за зміною ефективності теплопередачі протягом часу роботи комплексу обдудок. Таким чином, переваги сажовидудання можна виразити як зростання ефективності теплообміну:

$$B = \Delta E = E_1 - E_0, \quad (5)$$

де E_1 — ефективність теплопередачі після очищення поверхні нагріву; E_0 — ефективність теплопередачі до очищення поверхні нагріву.

На рис. 7 показаний приклад вимірювань, проведених для оцінки зміни ефективності теплопередачі через сажовидудання за одну добу.

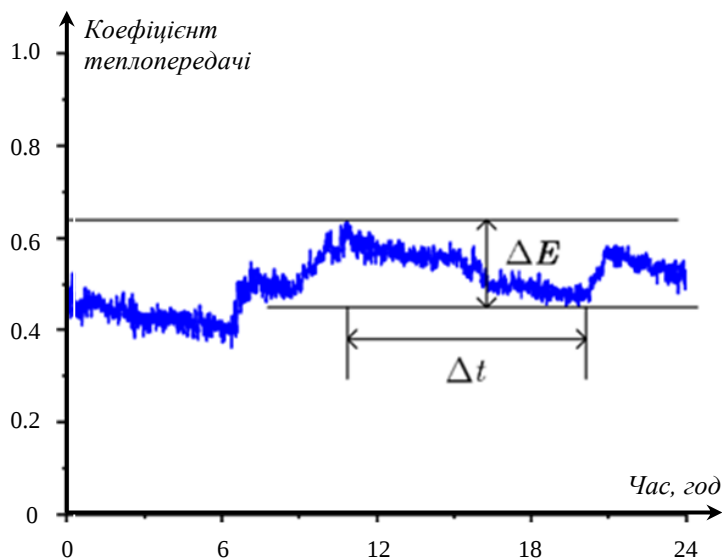


Рис. 7. Ефективність теплопередачі в часі

Таким чином, переваги видалення сажі можна виразити як різниці енергії, що поглинається поверхнями теплопередачі, між інтервалами сажобдудки та інтервалами забруднення золою.

Як показано на рис. 8, енергія, поглинена теплообмінними поверхнями без операції сажобдуду, може бути виражена таким чином:

$$Q_n = A \int_{t_0}^{t_1+t_{\text{обд}}} f_n(t) \Delta T dt. \quad (6)$$

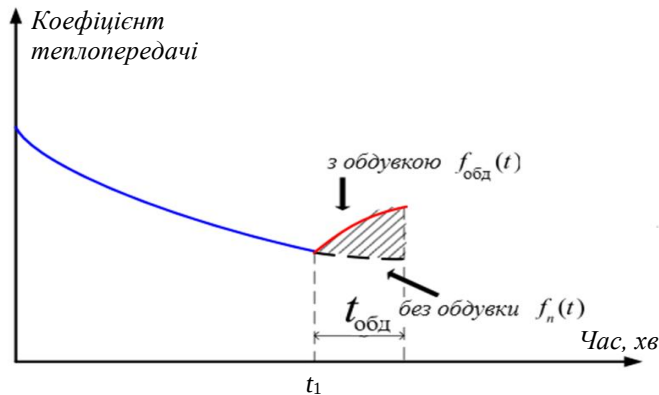


Рис. 8. Крива ефективності сажобуду

Фактична енергія, що поглинається поверхнями теплообміну під час операції сажобуду:

$$Q_b = A \int_{t_0}^{t_1+t_{обд}} f_{обд}(t) \Delta T dt, \quad (7)$$

де t_0 — час початку; A — площа поверхні теплопередачі; ΔT — логарифмічна різниця температур; $f_n(t)$ і $f_{обд}(t)$ — крива ефективності теплопередачі без сажобуду й ефективності теплопередачі з сажобудом. Очевидно, $f_{обд}(t) = K_r(t)$ і крива ослаблення ефективності теплопередачі демонструє експоненціальний характер в часі. Це можна наближено визначити як:

$$f_n(t) = e^{-\varepsilon t}, \quad (8)$$

де ε — константа осадження забруднення.

Отже, переваги сажобуду можна розрахувати таким чином:

$$\begin{aligned} \Delta E \propto \Delta Q &= Q_b - Q_n = A \left\{ \int_{t_0}^{t_1+t_{обд}} K_r(t) \Delta T dt - \int_{t_0}^{t_1+t_{обд}} e^{-\varepsilon t} \Delta T dt \right\} = B \\ &= A \cdot \Delta T \int_{t_1}^{t_1+t_{обд}} [K_r(t) - e^{-\varepsilon t}] dt. \end{aligned}$$

Тоді чиста вигода

$$B_n = B - Q_{обд} = A \Delta T \int_{t_1}^{t_1+t_{обд}} [K_r(t) - e^{-\varepsilon t}] dt - F_{обд} T_{обд} (h_{др} h_{гп}). \quad (9)$$

Потім задається оптимальний час сажобудування $T_{обд}$:

$$\begin{aligned} &Max B_n; \\ &T_1 > 0, T_{обд} > 0. \end{aligned}$$

Рівень зольності поверхонь теплообміну можна описати фактором чистоти CF:

$$CF = \frac{K_r}{K_0}, \quad (10)$$

де K_r і K_0 — фактичний коефіцієнт тепловіддачі тепла поверхню передачі та теоретичний коефіцієнт теплопередачі відповідно. Очевидно, значення CF лежить в інтервалі $[0 \dots 1]$, де одиниця відповідає стану чистої поверхні теплопередачі.

Теоретичний коефіцієнт тепловіддачі K_0 позначає ефективність тепловіддачі поверхні теплообміну в чистому стані, що, зазвичай, виражається як сума коефіцієнта радіаційного теплообміну і коефіцієнта конвекційної теплопередачі [19].

Відповідний оптимальний коефіцієнт чистоти $CF_{опт}$ можна отримати, як

$$CF_{опт} = \frac{K_r(T_{обд,опт})}{K_0}. \quad (11)$$

Щоб проілюструвати ефективність методу, в табл. 2 як приклад наведено порів-

няння фактичної тривалості сажообдуву $T_{обд}$ кожної поверхні теплопередачі з розрахованою оптимальною тривалістю сажообдуву $T_{обд.опт}$, визначеною цим методом.

Таблиця 2. Оптимальна тривалість обдувки

Поверхня нагріву	Втрати пари з обдувкою, $Q_{обд}$, КДж/с	Тривалість обдувки $T_{обд}$, с	Оптимальна тривалість обдувки, $T_{обд.опт}$, с	Різниця
				$T_{обд} - T_{обд.опт}$, с
Високотемпературний пароперегрівач (2 ступінь).	3400	1200	2320	-1120*
Пароперегрівач (1 ступінь).	3400	900	1137	-237*
Водяний економайзер	3400	900	2405	-1505*
Повітряпідігрівач	3400	600	747	-147*

Примітка. *Жирним у таблиці виділено результати розрахунків.

Як показано в табл. 2, оптимальна тривалість сажообдуву для кожної поверхні теплообміну різна. Найдовшу тривалість сажообдуву потребує водяний економайзер. Тож можемо зробити висновок, що водяний економайзер забруднюється найбільше. При порівнянні тривалості оптимального видалення сажі з фактичною тривалістю ми можемо чітко бачити, що обдувні апарати для кожної поверхні теплопередачі працюють недостатньо довго, і кожен ступінь недостатності різний. Треба збільшувати тривалість роботи обдувних апаратів кожної поверхні теплопередачі для досягнення ефективності.

Запропоновану методологію можна використовувати для розрахунку оптимальної тривалості сажообдуву та критичної точки обдувки для кожної поверхні теплообміну в реальному часі. Такий алгоритм системи підтримки прийняття рішень щодо роботи обдувних апаратів представлено на рис. 9.

Отже, процедура розробки та впровадження оптимізації сажообдувки передбачає такі кроки:

крок 1: моніторинг забруднення золою. На першому етапі загальний ефект сажообдувки буде характеризуватися моніторингом коефіцієнтів чистоти для кожної поверхні нагріву котла. У той же час інші відповідні термодинамічні параметри будуть контролюватись та вимірюватись у режимі реального часу;

крок 2: розрахунок оптимізаційної моделі сажообдувки. Оптимальний час видування сажі $T_{обд.опт}$ і коефіцієнт критичної чистоти $CF_{опт}$ будуть розраховуватись за формулою $MaxB_n$;

крок 3: перевірка на обмеження. На цьому кроці будуть розглянуті необхідні обмеження процедури сажообдуву. Чи стабільне навантаження? Чи досяг критичного рівня коефіцієнт чистоти $CF_{опт}$?

крок 4: початок сажообдуву. Якщо зазначені вище умови задовольняються, активувати обдувний апарат;

крок 5: оптимізація часу обдувки. Перевірка на досягнення оптимального часу сажообдуву $T_{обд.опт}$;

крок 6: завершення обдувки та перехід до наступного циклу.

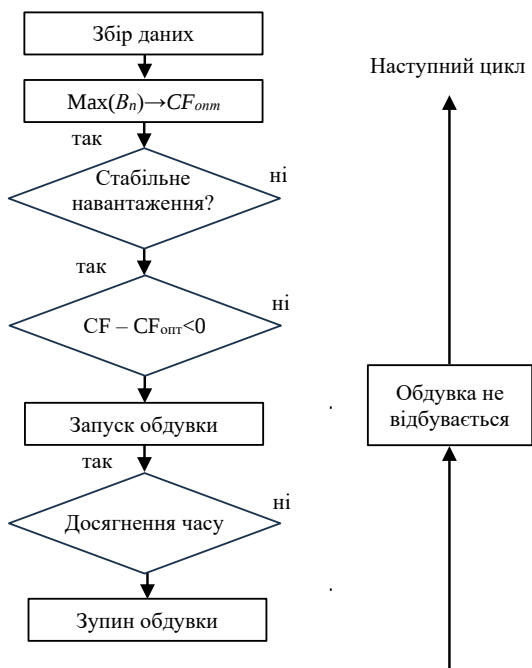


Рис. 9. Блок-схема алгоритму СППР сажообдувки

Приклади реалізації парової обдувки поверхонь нагріву котлів наведені на рис. 10 та рис.11.

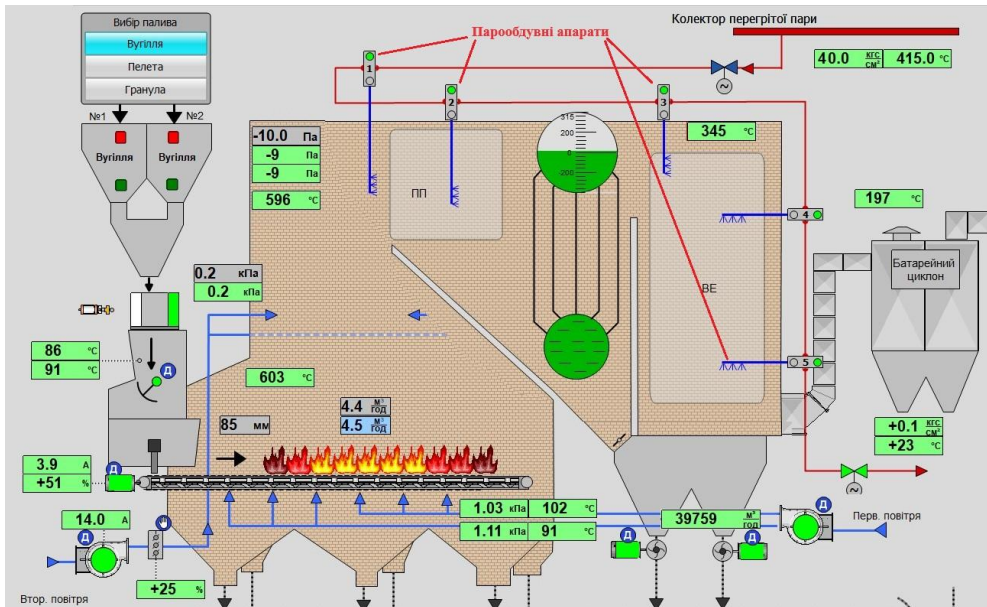


Рис. 10. Мнемосхема котла з паровими обдувними апаратами



Рис. 11. Приклад встановлення парового обдувного обертового апарата

Висновки. Робота сажобдувок, заснована на фіксованій частоті та тривалості спрацювання, неминуче призводить до зниження теплової ефективності або перевитрати пари. На основі онлайн-моніторингу забруднення золою вивчається оптимізація процедур застосування сажобдувок для отримання максимально чистої вигоди від очищення поверхонь нагріву.

Запропонована в цій статті математична модель для оцінки ступеня забруднення поверхонь теплообміну забезпечує безперервний оперативний розрахунок коефіцієнтів чистоти в кожній секції котла. При цьому послідовності сажобдуву мають варіативну частоту й тривалість залежно від ступеня забрудненості. Представлена методологія дає змогу в онлайн-режимі розраховувати критичний коефіцієнт чистоти CF кожної поверхні теплообміну, спрямований на оптимізацію періодичності спрацювань і тривалості роботи обдувки.

На прикладі енергетичного твердопаливного котла продуктивністю 75 т пари/год очікується економія палива, а також зменшення викидів в атмосферу за рахунок обмеження сажобдування з поверхонь нагріву лише у випадках, коли це більш імовірно приносити користь.

Розроблені алгоритми також можна застосовувати на початкових стадіях обчислень теплового балансу котла, які потрібні для точної оцінки витрати та вироблення енергії, що підтверджує цінність проведених досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. В. І. Частухін. (1980). *Тепловий розрахунок промислових паро-генераторів*. Київ: Вища школа.
2. Usón, S., Royo, J., Canalis, P. (2023). Integration of thermoelectric generators in a biomass boiler: Experimental tests and study of ash deposition effect. *Renewable Energy*.
3. Kim, K., Park, H. R., Kim, H. J., Lee, K., Hwang, W. (2023). Self-cleaning mechanisms according to the wettability of the surface and deposition material. *Applied Surface Science*.
4. Zou, H., Yuan, J. (2023). Online evaluation of the boiler energy efficiency associated with the soot blowing in coal-fired power plants. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*.
5. Qiao, Z., Cheng, M., Jin, Y. (2022). Theoretical model and dynamic wave-amplification effect of the high intensity Helmholtz sound source. *JVC/Journal of Vibration and Control*.

6. Ling, D., Li, C., Wang, Y., Zhang, P. (2022). Fault Detection and Identification of Furnace Negative Pressure System with CVA and GA-XGBoost. *Energies*.
7. Zhong, Q., Chen, Y., Zhu, B., Liao, S., Shi, K. (2022). Temperature field reconstruction method based on acoustic thermometry. Measurement: *Journal of the International Measurement Confederation*.
8. Cui, F., Qin, S., Zhang, J., Li, M., Shi, Y. (2023). A Hybrid Method for Prediction of Ash Fouling on Heat Transfer Surfaces. *Energies*.
9. Xu, L., Huang, Y., Yue, J., Xu, W., Li, Z. (2022). Soot blowing optimization for platen superheater of coal-fired power plant boiler based on heat loss analysis. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*.
10. He, K., Wang, T., Zhang, F., Jin, X. (2022). Anomaly detection and early warning via a novel multiblock-based method with applications to thermal power plants. Measurement: *Journal of the International Measurement Confederation*.
11. Shi, Y., Han, T., Cui, F., Wen, J., Qiao, G. (2022). A GM-TCN based Hybrid Prediction Method for Ash Fouling Prediction in Coal-fired Power Plant Boiler. *Proceedings. Chinese Automation Congress, CAC*.
12. Shi, Y., Li, M., Wang, J., Cui, F., Qiao, G. (2022). Prediction of Ash Deposition on Heating Surfaces of Coal-fired Power Plant Boiler based on Dynamic Neural Network. *Proceedings of the 34th Chinese Control and Decision Conference, CCDC*.
13. R. E. Chappell, J. W. Locke. (2018). A mathematical approach to automation of sootblower controls, in: *Proceedings of the American Power Conference, XXVII*, 412—422.
14. B. Pena, E. Teruel, L. I. Díez. (2019). Soft-computing models for soot-blowing optimization in coal-fired utility boilers. Zaragoza, Spain, 1657—1668.
15. Д. В. Степанов, Є. С. Корженко, Л. А. Боднар. *Котельні установки промислових підприємств*, Вінниця: ВНТУ, 2016.
16. R. S. Echerd, S. A. Zimmerman. (1987). Control of sootblowing in black liquor recovery boiler, *ISA Trans*.
17. Z. Hu, D. Matovic. (2009). Heat flux monitoring in biomass-fired boilers: possible areas of improvement, in: *Proceedings of the LASTED International Conference on Environmental Management and Engineering*.
18. E. Teruel, C. Cotes, L. I. Díez, I. Arauzo. (2005). Monitoring and prediction of fouling in coal-fired utility boilers using neural networks, *Chem. Eng. Sci*.
19. Q. G. Fan, W. P. Yan. (2007). Boiler Principles, *China Electric Power Press*, Beijing.