

**Воїнов О.П.**

<https://orcid.org/0000-0001-7548-4212>

Одеська державна академія будівництва та архітектури

**Елькін Ю.Г.**

<https://orcid.org/0000-0001-7677-377X>

Одеська державна академія будівництва та архітектури

## ПРО ВПЛИВ ПРОЦЕСУ ЗОВНІШНЬОЇ ЕРОЗІЇ НА РЕСУРС ПАРОВИХ КОТЛІВ З КИПЛЯЧИМ ШАРОМ

*Метою статті є аналіз впливу процесу зовнішньої ерозії у парових котлах із киплячим шаром на їх ресурс. Парові котли низькотемпературного киплячого шару мають ряд властивостей, що формують істотні їх переваги перед паровими котлами традиційних типів. У статті проаналізовано характерні приклади зміни траєкторій ресурсу елементів парового котла в часі та надано рекомендації щодо їх вибору в умовах реальної експлуатації парових котлів. Вивчено вплив основних конструктивних та режимних факторів на інтенсивність процесу зовнішньої ерозії у парових котлах із киплячим шаром, а також вплив процесу зовнішньої ерозії на ресурс котлів. У результаті дослідження виявлено, що із зменшенням розміру частинок інерту зовнішня ерозія посилюється з прискоренням. Управління ресурсом парового котла через управління розміром частинок інерту є на практиці складним науково-технічним завданням, оскільки поточний розмір частинок визначається впливом ряду факторів. Збільшення швидкості псевдозрідження підвищує інтенсивність процесу зовнішньої ерозії, причому тим більше, чим дрібнішими є частинки інерту. Реальну можливість управління швидкістю псевдозрідження відкриває застосування двоступінчастого горіння в топці з киплячим шаром. У поверхнево-охолоджуваних топках збільшення теплової потужності надшарового об'єму зумовлює підвищення в ньому температури топкового середовища; у об'ємно-охолоджуваних топках – практично не обумовлює подібного підвищення температури. В об'ємі киплячого шару є горизонтальний шар, який містить у собі зону максимальної інтенсивності зовнішньої ерозії. Зовнішня ерозія є найбільш інтенсивною в середній, приосевій частині об'єму киплячого шару. При віддаленні від неї вона знижується. Виконані дослідження дозволили встановити характеристики режиму роботи парового котла з киплячим шаром, в залежності від її умов, що при практичному застосуванні дозволить запропонувати шляхи та засоби підвищення технологічної ефективності котлів з киплячим шаром та підвищення їх ресурсу, у тому числі суттєвого підвищення стійкості поверхонь нагріву до впливу зовнішньої ерозії.*

**Ключові слова:** паровий котел, управління ресурсом, киплячий шар, псевдозрідження, зовнішня ерозія, частинка інерту.

**Постановка проблеми.** Технологічний процес у парових котлах (ПК) з киплячим шаром (КШ) відрізняється високою розмірністю [1]. Вплив на нього надають численні фактори, внутрішні і зовнішні, детерміновані і випадкові, діючі безперервно і періодично, слабкі та сильні. Серед них деякі вивчені відносно глибоко, інші майже не вивчені. Ці обставини зумовили виникнення безлічі завдань, що стоять на шляху до широкого, впевненого застосування ПК з КШ у станційній та в промисловій енергетиці взагалі, в енергетиці вітчизняної зокрема [2]. Згадані завдання сформу-

вали важливу та складну науково-технічну проблему вивчення технології котельно-топкового КШ, узагальнення отриманих результатів, складання розрахунково-методичних підходів і засобів для конструювання ПК з КШ і, нарешті, виробництва та широкого використання цих котельно-топкових систем [3 – 5].

ПК, що діють за технологією низькотемпературного КШ, мають унікальний набір властивостей, що формують загальну істотну перевагу їх перед ПК традиційних типів по ряду важливих технологічних властивостей, перш за все екологічних.



Дослідження котельно-топкового технологічного процесу, що протікає в КШ, пошук методів, шляхів та засобів його вдосконалення є актуальним науково-технічним завданням нині й у перспективі [6, 7].

Зупинимося на короткому розгляді основних із згаданих особливостей і висуваних ними основних завдань.

1). Низький рівень температури топкового середовища (750 – 1000 °С) впливає наступним чином:

- знижує теплосприйняття топкових радіаційних екранів, розташованих над КШ ( $Q^{рад}$ );
- знижує вміст оксидів азоту у топкових газах ( $NO_x$ ).

2). Занурені в КШ поверхні нагріву, включаючи топкові екрани,

- збільшують теплосприйняття топки;
- збільшують продуктивність ПК (D) та пряму віддачу топки ( $\beta_T$ );
- збільшують ККД топки та ККД ПК;
- охолоджують КШ, дозволяють підвищити в ньому об'ємну щільність тепловиділення ( $Q/V_T$ );
- дозволяють збільшити компактність топки та ПК.

3). Двоступінчасте спалювання палива (в об'ємі КШ і в надшаровому просторі)

- знижує об'ємну щільність тепловиділення в КШ ( $Q/V_{КШ}$ );
- підвищує температуру топкових газів середню ( $v_T$ )<sup>CP</sup> та на виході з топки ( $v_T$ );
- підвищує  $Q^{рад}$ ;
- підвищує D;
- підвищує вихід  $NO_x$ .

4). При спалюванні палива з високим вмістом легких (смолистих речовин) можлива їхня конденсація на відносно холодних поверхнях нагріву, у надшаровому просторі камери згоряння.

5). Використання твердих присадок (вапняку, доломіту) дозволяє спалювати високосірчисте паливо при дуже низькому вмісті оксидів сірки в відхідних газах.

6). Висока інтенсивність зовнішньої ерозії скорочує довговічність труб топкових екранів, занурених у КШ.

7). Інтенсивність зовнішньої ерозії залежить від дії ряду факторів, зокрема кута атаки частинками інерту труб у поверхнях нагріву.

8). Зникає необхідність застосовувати хімічне очищення відхідних газів.

9). Існує необхідність застосовувати механічне очищення відхідних газів.

10). З'являється завдання створення системи засобів розпалювання ПК.

11). З'являється завдання захисту елементів ПК від термічного перевантаження в позаштатних режимах функціонування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ресурс (Рс) ПК – поняття комплексне: він фактично визначається Рс того елемента агрегату, в якого він (Рс) є мінімальним (рис. 1) [8, 9]. Показана залежність Рс(Т) для п'яти важливих елементів ПК, тобто таких, при відмові кожного з яких агрегат підлягає зупинці. У кожного період реалізації Рс (витрачання запасу працездатності) різний:

$$(0-T_1) > (0-T_2) > (0-T_3) > (0-T_4) > (0-T_5).$$

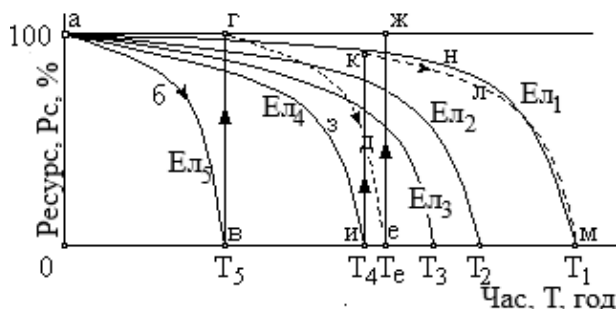


Рис. 1. Ресурс елементів і ресурс ПК в цілому

У цьому випадку Рс ПК визначає елемент Ел<sub>5</sub>, що має мінімальний Рс  $\equiv (0-T_5)$ . Протягом цього періоду Рс ПК і Рс його елемента Ел<sub>5</sub> змінюються за графіком "а"-"б"-"в".

По досягненні моменту часу Т<sub>5</sub> Рс елемента (отже і ПК) виявляється вичерпаним. ПК слід зупинити для проведення відновного ремонту Ел<sub>5</sub> або заміни його новим елементом. Оскільки Рс Ел<sub>5</sub> є меншим залишкового Рс котла в цілому – (Т<sub>5</sub>-Т<sub>1</sub>), доцільним є Ел<sub>5</sub> замінити новим, тобто підняти його Рс від 0 до 100%, що показано на рис. 1 лінією "в"-"г". Таким чином, з моменту Т<sub>4</sub> новий Ел<sub>5</sub> та інші елементи залишаються в роботі. Графік Рс(Т) Ел<sub>5</sub> показаний пунктирною лінією "г"-"д"-"е" (відповідною графіку "а"-"б"-"в").

В наступний час Рс котла визначається Рс елемента Ел<sub>4</sub>, який спрацьовується згідно з графіком "а"-"з"-"и". У момент Т<sub>4</sub> необхідно ПК зупинити для відновлення Ел<sub>4</sub>.

У цьому випадку становище інше. Якщо Ел<sub>4</sub> замінити новим елементом, його Рс в годинах (0-Т<sub>4</sub>) (при його відліку від моменту Т<sub>4</sub>) закінчиться пізніше моменту Т<sub>1</sub>, до якого розрахований Рс найбільш довговічного елемента ПК – Ел<sub>1</sub> (іншими словами, Рс ПК загалом). Тобто, ПК довелося б вивести з експлуатації в момент Т<sub>1</sub>, а залишкова частина Рс Ел<sub>4</sub> залишилася б не використаною.

Оскільки це не доцільно, слід вибрати один із таких варіантів:

- провести (якщо це можливо) відновлювальний ремонт  $El_4$  до набуття їм  $R_c$  необхідного рівня, показано на рис. 1 відрізком "и"- "к";
- встановити новий  $El_5$ , виготовлений із менш стійкого матеріалу, із забезпеченням  $R_c$ , розрахованого на період  $(T_4-T_1)$ .

На рис. 1 показаний перший із цих варіантів. Відновлювальним ремонтом елемента  $El_4$  його  $R_c$  піднято до рівня "и"- "к". Траєкторія  $R_c(T)$  оновленого  $El_4$  йде за графіком "к"- "л"- "м" і завершується одночасно з траєкторією "а"- "н"- "м"  $El_1$ , тобто котла в цілому.

Після моменту часу  $T_4$  працюють усі елементи. У моменти  $T_6$ ,  $T_3$ ,  $T_2$  необхідно буде вирішувати питання про варіант оновлення елементів  $El_5$ ,  $El_3$  та  $El_2$ .

У наведеному прикладі траєкторії  $R_c(T)$  п'яти  $El$  котла, заради спільності розгляду, взяті випадково. У реальних умовах зазначені траєкторії слід вибирати на основі оптимізації, обравши в якості цільової функції мінімум сумарних затрат, з урахуванням екологічної характеристики обладнання (рис. 2) [10]. Через  $Z_{min}$ ,  $Z_p$  і  $Z_c$  позначено затрати на поверхні нагріву, на ремонтне обслуговування та сумарні затрати.

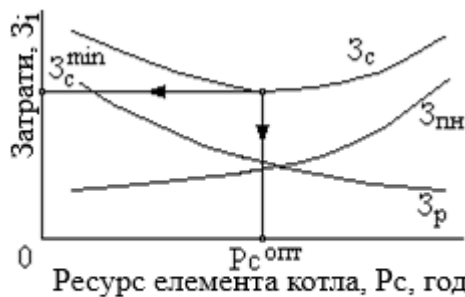


Рис. 2. Вплив ресурсу елемента котла на затрати

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз впливу основних конструктивних та режимних факторів на інтенсивність процесу зовнішньої ерозії у парових котлах із киплячим шаром, а також впливу процесу зовнішньої ерозії на ресурс цих котлів.

**Виклад основного матеріалу.** Зовнішня ерозія (ЗЕ) – процес високої інтенсивності. У ПК з бульбашковим КШ при сприятливому поєднанні дії впливаючих факторів занурені труби поверхонь нагрівання втрачають кілька десятків міліметрів товщини стінки на рік [11, 12]. У ПК з циркулюючим КШ у сприятливих умовах витончення стінки може бути у кілька разів більше. Ця обставина

обмежує можливість екранування стін топки її верхньою частиною.

У зв'язку з цим  $R_c$  поверхонь нагріву, що стикаються з інертом, відносно невеликий; він на порядок менший  $R_c$  інших  $El$  агрегату. Це обставина є однією з причин, що ускладнюють широке використання ПК з КШ в енергетиці світу [13].

Інтенсивність процесу ЗЕ ( $I_g$ ), як було зазначено вище, визначається дією численних факторів. Основними в їх числі є розмір частинок інерту ( $d_c$ ), швидкість псевдозрідження ( $u$ ), місцезнаходження труби по висоті КШ ( $H_i / H_0$ ), відносна відстань труби від осевої вертикальної поздовжньої площини топки ( $R_i / R$ ), діаметр труби ( $d_{tr}$ ), кут атаки поверхні труби потоком частинок ( $\alpha$ ), ерозійна стійкість матеріалу труби ( $E_m$ ), ерозійна агресивність частинок інерту ( $E_i$ ) [14, 15].

Крім перелічених факторів на  $I_g$  суттєво впливає форма частинок інерту. Вона змінюється під впливом внутрішньої ерозії від вугластої у свіжих частинок до округлої у частинок, які попрацювали тривалий час.

Нижче наведено аналіз розкритих закономірностей впливу основних чинників на  $R_c$  ПК.

А) Вплив розміру частинок інерту характеризує графік  $I_g(d_c)$  (рис. 3).

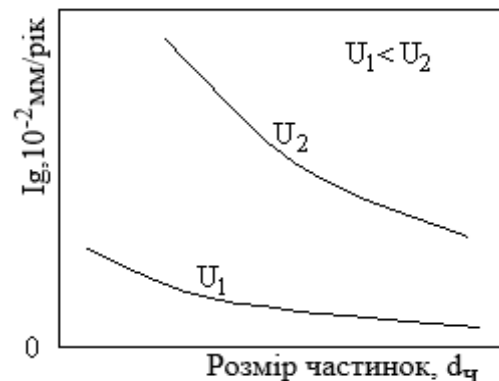


Рис. 3. Характер впливу розміру частинок на інтенсивність ЗЕ

З аналізу цієї залежності випливає, що для труб зі сталі Ст20 при  $d_{tr} = 8-18$  мм, при інерті у вигляді дроблянки шамоту її (залежність) можна апроксимувати рівнянням

$$I_g = 8,365 d_c^{-0,815} - 3,2 \text{ (мм)}.$$

Із зменшенням  $d_c$  ЗЕ посилюється із прискоренням:  $\frac{dI_g}{dd_c} > 0$ .

Збільшення  $U$  веде до підвищення  $I_g$ . При цьому, для кожного значення  $d_c$  крутість графіка  $I_g(d_c)$  зростає:  $\frac{dI_g}{dU} > 0$ .

Особливий інтерес представляє той факт, що вплив  $d_q$  на коефіцієнт тепловіддачі від КШ до зануреної поверхні нагріву (зовнішньої тепловіддачі) –  $\alpha_{kc}$  – аналогічно залежності  $I_g(d_q)$ :  $I_g(d_q) \equiv \alpha_{kc}(d_q)$ . Тобто зменшення  $d_q$  з метою посилення теплообміну неминуче призводить до посилення ЗЕ. І тільки використання впливу інших факторів та їх комбінацій дозволяє при цьому отримати збільшення теплообміну більше, ніж посилення інтенсивності ЗЕ, тобто досягти  $\frac{d\alpha_{kc}}{dl_g} > 0$ .

Слід зазначити суттєвий вплив  $d_q$  на Рс котлів з КШ.

Управління ресурсом ПК через управління розміром частинок інерту  $\epsilon$  на практиці складним науково-технічним завданням, оскільки поточний  $d_q$  визначається впливом низки факторів:

- гранулометричним складом палива протягом кількох годин до моменту розгляду;
- режимом внутрішнього зносу (внутрішньої ерозії – знесення частинок у КШ), протягом того ж періоду часу;
- режимом винесення дрібних частинок із шару газовим потоком;
- режимом несення навантаження котлом протягом зазначеного періоду та іншими.

Основним джерелом збурення параметра  $d_q$  є перший і четвертий з числа перерахованих чинників. Їх вплив носить випадковий характер за напрямом, за амплітудою та за швидкістю зміни кожного. Практично параметр оперативно не керований. Єдине доступне обмеження – обмеження зверху розміру частинок палива, а отже, і частинок інерту.

У разі застосування інерту, що вноситься зовні, на розмір частинок додатковий вплив мають властивості і режим зливу відпрацьованого інерту і добавки свіжого. Причому в цьому випадку зазначені операції вносять різке та значне (ударного характеру) збурення в хід процесу ЗЕ.

Б) Вплив швидкості псевдозрідження характеризує графік  $I_g(U)$  (рис. 4). З аналізу цієї залежності випливає, що для труб зі сталі Ст20 при  $d_{тр} = 18$  мм збільшення  $U$  підвищує  $I_g$ , причому тим більше, чим дрібнішими є частинки інерту.

Функція  $I_g(U)$  у першій половині вивченого діапазону  $U$  характеризується позитивним  $\frac{dI_g}{dU}$ , а в другій половині – негативним  $\frac{dI_g}{dU}$ .

Фактор  $U$  – один із найбільш активних зовнішніх факторів з числа впливаючих на  $I_g$ . Тому використовувати його з метою управління  $I_g$  не уявляється можливим.



Рис. 4. Характер впливу швидкості псевдозрідження на інтенсивність ЗЕ

Привертає увагу те, що вплив  $U$  носить комплексний характер:

- впливає безпосередньо на  $I_g$  (рис. 4);
- впливає на інтенсивність внутрішньої ерозії, тобто впливає на середній розмір частинок інерту (рис. 3);
- впливає на структуру двофазного КШ, особливо загальмованого зануреними в нього трубами поверхні нагріву, що впливає на режим ЗЕ в об'ємі шару.

Разом з тим, вкажемо на реальну можливість управління  $U$  в деякому діапазоні її значень, протяжність якого визначається місцевими умовами. Цю можливість відкриває застосування двоступінчастого горіння в топці з бульбашковим КШ. При цьому, перший ступінь реалізується в об'ємі КШ при коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha_{т1} < 1$ , а другий – в надшаровому об'ємі топки при  $\alpha_{т2}$ , що доповнює  $\alpha_{т1}$  до значення  $\alpha_t$ , прийнятого для процесу горіння в цілому:

$$\alpha_t = \alpha_{т1} + \alpha_{т2}.$$

Двоступінчасте спалювання палива в топці з КШ докорінно змінює топковий процес в цілому.

Фізична модель двоступінчастого процесу горіння в топці з бульбашковим КШ при незмінній її тепловій потужності виглядає так.

Потік повітря при розрахунковому сумарному  $\alpha_t$  ділять на два потоки: первинний при  $\alpha_{т1}$ , що подається через повітророзподільні ґрати (ПРГ) в КШ, і вторинний при  $\alpha_{т2}$ , що подається через сопла вторинного дуття в надшаровий простір топкової камери.

Виділення з КШ і горіння в надшаровому просторі продуктів неповного згорання, що видаються КШ, змінює режим топки по ряду складових, зокрема, відбуваються такі зміни:

- зменшується тепловиділення в об'ємі КШ;
- скорочується теплосприйняття шару;

- збільшується тепловиділення в об'ємі над шаром;
- зростає теплосприйняття топкових екранів над шаром;
- істотних змін зазнає режим, отже, і епюра температури протягом усього шляху повітряно-газового потоку в топковому пристрої.

На рис. 5 наведено епюри температури топкового середовища  $v_t$  для трьох варіантів повітряного режиму топки з КШ:

Варіант 1. Застосовують одноступеневе спалювання палива. В об'ємі шару розвивається максимальна температура  $v_{кш}$ . У надшаровому об'ємі  $v_t$  знижується, внаслідок теплообміну шару та газів з топковими екранами. Тому  $v_t$  на виході з топки ( $v_t''$ ) мінімальна, а пряма віддача топки ( $\beta_t$ ) максимальна. Епюра  $v_t$  на рис. 5 розміщено під номером 1.

Варіант 2. Застосовують двоступінчасте спалювання, з перенесенням в камеру відносно невеликої частини загального тепловиділення. В об'ємі шару рівень  $v_t$  знижується. У камері, над шаром йде горіння продуктів ( $CO, H_2, C_nH_m$ ), що видаються шаром. Тому тут  $v_t$  підвищується, проходячи свій максимум у місці розташування ядра факела (рис. 5, графік 2). Тому  $v_t''$  підвищується, а  $\beta_t$  знижується в порівнянні з варіантом 1. Епюра  $v_t$  на рис. 5 розміщена під номером 2.

Варіант 3. Застосовують двоступінчасте спалювання, з перенесенням в камеру значної частини загального тепловиділення. В об'ємі шару рівень  $v_t$  знижується значніше, ніж у попередньому варіанті (рис. 5, графік 3). У камері над шаром йде горіння продуктів ( $CO, H_2, C_nH_m$ ), що видаються шаром. Тут  $v_t$  підвищується значніше (ніж у варіанті 2), проходячи свій максимум у місці розташу-

вання ядра факелу. Тому  $v_t''$  ще вище, а  $\beta_t$  нижче, ніж у попередньому варіанті. Епюра на рис. 5 розміщена під номером 3.

Наведений матеріал характерний для поверхнево-охолоджуваних топковок (ПОТ), тобто для топковок традиційного типу. У них, як показано в наведеному аналізі, збільшення теплової потужності  $Q$  надшарового об'єму  $V$  (тобто підвищення об'ємної щільності тепловиділення  $Q/V$  в цьому об'ємі) обумовлює підвищення в ньому  $v_t$  (рис. 5; 2, 3). Тобто, при збереженні низькотемпературного горіння в КШ (із забезпеченням всіх відомих його переваг) у надшаровому просторі горіння переходить у високотемпературну область (з появою всіх відомих її недоліків, перш за все, високого виходу оксидів азоту).

У об'ємно-охолоджуваних топках (ООТ) збільшення  $Q$  надшарового об'єму  $V$  (тобто підвищення  $Q/V$  в цьому об'ємі) практично не обумовлює підвищення в ньому  $v_t$ . (рис. 6; 2, 3). Тобто, при збереженні низькотемпературного горіння в КШ в надшаровому просторі горіння залишається в низькотемпературній області. Таким чином, у топці загалом забезпечуються всі відомі переваги низькотемпературного спалювання палива.

Порівняльний аналіз режимів одноступінчастого і двоступінчастого спалювання палива в ПОТ і в ООТ з КШ призводить до ряду положень, що представляють значний інтерес для технології та техніки ПК з КШ. Приведемо деякі з них.

Застосування двоступінчастого спалювання палива в топці з КШ відкриває можливість звільнити її повітряний режим від жорсткої залежності від рівня несомої теплової потужності.

Застосування ООТ у поєднанні з двоступінчастим спалюванням палива в топці з КШ відкриває

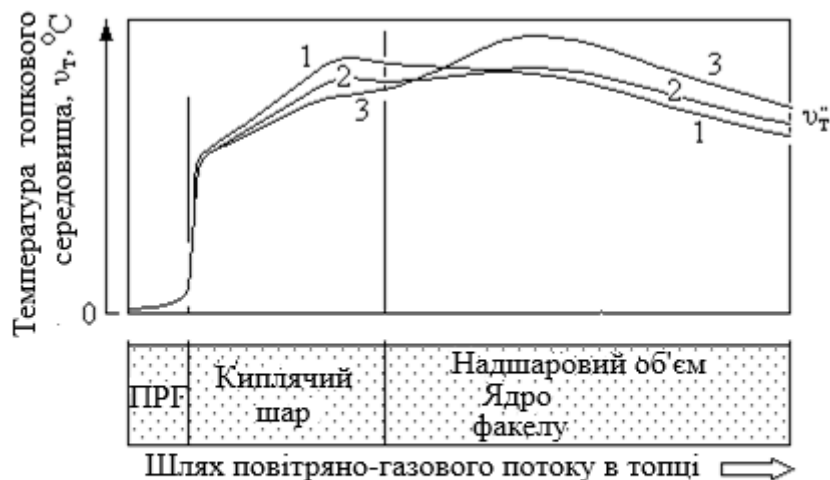


Рис. 5. Епюра температури топкового середовища в ПОТ з КШ при різних повітряних режимах

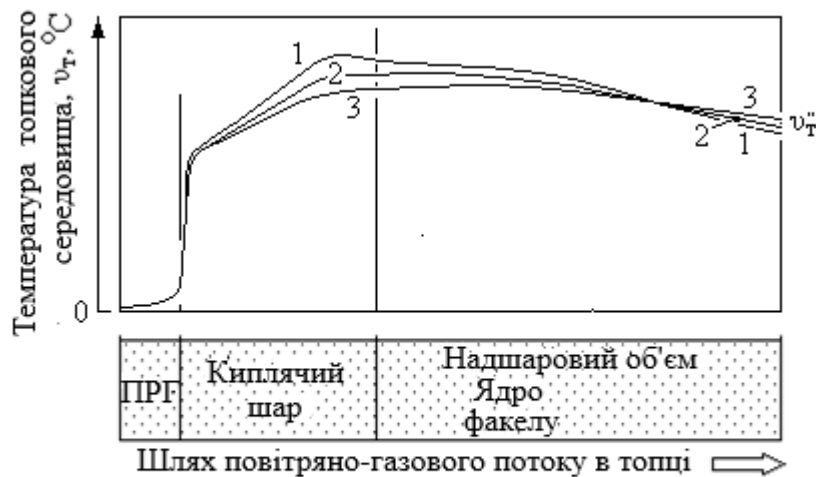


Рис. 6. Епюра температури топкового середовища в ООТ з КШ при різних повітряних режимах

можливість здійснювати в топках з КШ низькотемпературне спалювання в обох ступенях топкового процесу, що саме по собі вельми оригінально і технологічно високо продуктивно.

Використання двоступінчастого спалювання палива в ООТ розширює діапазон доступної зміни її повітряного режиму, чим забезпечує можливість управління  $U$ , з метою обмеження зверху  $I_g$ .

В) Вплив розташування труби по висоті КШ ( $H_i / H_0$ ) на  $I_g$  (рис. 7).



Рис. 7. Вплив відносної висоти розташування труби на інтенсивність ЗЕ

З аналізу цієї залежності випливає, що для труб зі сталі Ст20 при  $d_{ч} = 8 - 18$  мм її (залежність) можна апроксимувати рівнянням виду

$$I_g = \left[ a - b(H_i / H_0) + c(H_i / H_0)^2 \right]^{-1},$$

де  $I_g$  – інтенсивність ЗЕ, мм/рік;

$a, b, c$  – величини, що залежать від умов функціонування ПК з КШ;  $H_i$  – відмітка розташування труби, м;  $H_0$  – відмітка (висота) щільного шару, м.

Зі збільшенням  $H_i$  від нуля до  $H_i = (0,8-1,3)H_0$  ЗЕ посилюється, досягаючи в зазначеному діапазоні максимального значення. При цьому зі збільшенням  $I_g$  позначка розташування максимуму зсувається вправо. Проявляється зазначена в А) дія фактора  $d_{ч}$ .

Викладене свідчить те, що в об'ємі КШ є горизонтальний шар товщиною близько  $0,3H_0$ , який містить у собі зону максимальної  $I_g$ . Поверхні нагріву, розташовані в цьому шарі, зношуються раніше за інших, тому визначають  $R_c$  поверхні нагріву в цілому. Чим вище  $I_g$ , тим тоншим є вказаний найбільш агресивний шар.

Г). Вплив відносної відстані труби від осевої вертикальної поздовжньої площини топки ( $R_i / R$ ) характеризує графік  $I_g (R_i / R)$  (рис. 8).

З аналізу цієї залежності випливає, що її можна апроксимувати рівнянням виду

$$I_g = de^{-m(R_i/R_0)^n}.$$

$I_g$  – інтенсивність ЗЕ, мм/рік;

$d, m, n$  – величини, що залежать від умов функціонування ПК із КШ.

ЗЕ найінтенсивніша в середній, приосевій частині об'єму КШ. При віддаленні від неї  $I_g$  знижується у кілька разів. На графіках рис. 8 видно вплив відносної висоти розташування труби.

Практично найбільш сильно ЗЕ впливає на середню частину пучка занурених в КШ труб шириною 20–25% ширини топкової камери. При цьому, чим інтенсивнішою є ЗЕ, тим більша різниця рівня  $I_g$  у середній частині та у країв топки (рис. 8). Ця частина пучка визначає його  $R_c$ , тобто  $R_c$  всього ПК.

При вичерпанні  $R_c$  труб середньої частини труби пристінних частин свій  $R_c$  ще не вичерпа-

ють. Якщо вести відновлювальний ремонт пучка вибірково, то оновити (замінити новими) слід було б труби тільки середньої частини. Якщо ж вести ремонт пучка в цілому, то замінити слід було б усі його труби.

Важливо відмітити і ту обставину, що у найбільш вразливій середній частині пучка у труб, розташованих на різних відмітках,  $R_c$  – неоднаковий. Мінімальним  $R_c$  мають труби, розташовані в зоні максимального  $I_g$ ; на рис. 8. – це труби на  $H = 370$  мм. Труби ж середньої частини пучка на відмітці  $H = 130$  мм мають ще  $R_c$  практично такий самий, як  $R_c$  пристінних труб на позначці  $H = 370$  мм.

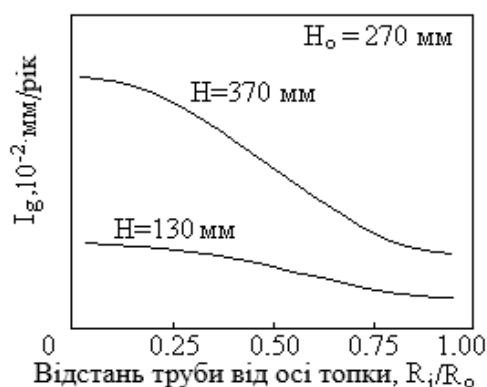


Рис. 8. Характер впливу відстані труби від осі топки на інтенсивність ЗЕ

При проектуванні пучка та при проведенні відновлювального ремонту необхідно враховувати і цю обставину. Використовуючи можливості застосування труб із матеріалів з різною ерозійною стійкістю, а при відновленні – проведення вибіркового ремонту, можна досягти зниження витрат на технічне обслуговування ПК з КШ.

**Висновки.** ПК низькотемпературного КШ мають набір властивостей, що формують істотну перевагу їх перед ПК традиційних типів.

Проаналізовано характерні приклади зміни траєкторій ресурсу елементів ПК у часі та надано рекомендації щодо їх вибору в умовах реальної експлуатації ПК.

Проаналізовано вплив основних конструктивних та режимних факторів на інтенсивність процесу зовнішньої ерозії у ПК із КШ.

Зі зменшенням розміру частинок інерту ВЕ посилюється з прискоренням.

Управління ресурсом ПК через управління розміром частинок інерту є на практиці складним науково-технічним завданням, оскільки поточний розмір частинок визначається впливом низки чинників.

Збільшення швидкості псевдозрідження підвищує інтенсивність процесу ЗЕ, причому тим більше, чим дрібніші частинки інерту.

Реальну можливість управління швидкістю псевдозрідження в деякому діапазоні її значень відкриває застосування двоступінчастого горіння в топці з бульбашковим КС.

У поверхнево-охолоджуваних топках збільшення теплової потужності надшарового об'єму зумовлює підвищення температури середовища.

У об'ємно-охолоджуваних топках збільшення теплової потужності надшарового об'єму практично не обумовлює підвищення в ньому температури середовища.

В об'ємі КШ є горизонтальний шар, який містить зону максимальної інтенсивності зовнішньої ерозії.

ВЕ найінтенсивніша в середній, приосевій частині об'єму КШ. При віддаленні її вона знижується.

#### Список літератури:

1. Воїнов О.П., Елькін Ю.Г. Перспективні напрямки розвитку котельно-топкових технологій. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 36 (75), 2025, 3. Ч. 1. С. 131–140. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/17> (дата звернення: 29.12.2025).
2. Елькін Ю.Г., Воїнов О.П. Проблематика розвитку промислових котельно-топкових систем / Матер. міжнар. мультидисциплін. наук. Інтернет-конф. «Світ наукових досліджень. Випуск 19», Тернопіль – Переворськ, Польща 23–24 трав. 2023р. Тернопіль : ФОП Шпак В.Б. С. 242–243.
3. Воїнов О.П., Елькін Ю.Г. Про місце котельних установок у забезпеченні сталого розвитку / Тези допов. 79-ї наук.-техн. конф. проф.-виклад. складу ОДАБА, Одеса, 18–19 трав. 2023р. Одеса : ОДАБА, 2023. С. 173.
4. Елькін Ю., Воїнов О. Про проблеми сучасної енергетики та шляхи їх вирішення / Тези допов. III-ї міжнар. наук.-практ. конф. «Екологія. Ресурси. Енергія», Київ, 23–25 лист. 2022р. Київ : КНУБА, 2022. С. 69–70.
5. Воїнов О.П., Елькін Ю.Г. Про сучасні задачі удосконалення теплоенергетичного устаткування / Тези допов. XIX міжнар. наук.-техн. конф. «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування», 21–22 груд. 2023р. Харків : НТУ «ХПШ», 2023. С. 72–73.

6. Корчевой Ю.П., Півняк Г.Г. Новітні технології використання вугілля в енергетиці. *Наука та інновації*, 2006. Т.2, № 2. С. 53–62.
7. Степанов Д.В., Корженко Є.С., Боднар Л.А. Котельні установки промислових підприємств. Вінниця, ВНТУ, 2011. 120с.
8. Воїнова С.О. Особливості формування ресурса технічних об'єктів / *Енергетика та електрифікація*, 2012, № 10. С. 40–43.
9. Воїнова С.О. Про особливості управління процесом формування та витрачання ресурса технічними об'єктами. *Енергетика та електрифікація*, 2014. № 9. С. 56–60.
10. Voinov O., Elkin Yu. Partial Renewal is a Tool for an Increase in the Environmental Efficiency of the Worn-out Power Facilities. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*. 2021. no. 4(8). pp. 47–51. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.04.07>.
11. Воїнов О.П., Богаченко Д.І., Шевчук Є.О., Черніков М.С. Завдання обмеження зовнішньої ерозії в проблемі освоєння котлів з киплячим шаром/ Зб. допов. конф. «Управління енерговикористанням», Київ, 2002. К.: Альянс за збереження енергії, 2002. С. 551–554.
12. Воїнов О.П., Чернявський О.Є. Зовнішня ерозія в котлах з циркулюючим киплячим шаром. Вивчення процесу / Зб. матер. 5-ї міжнар. наук. – практ. конф. «Управління ефективним енерговикористанням», Одеса, 4–5 верес. 2003р. Одеса, 2003. С. 85–87.
13. Воїнов О.П. Захист котельних топкових екранів від зовнішньої ерозії в киплячому шарі / Н. – т. збірник «Енергозберігаючі технології в муніципальній і промисловій теплоенергетиці – 2006». Одеса : ОНПУ, 2006. С. 31–35.
14. Воїнов О.П., Воїнова С.О. Управління довговічністю котлів з киплячим шаром введенням ерозійно-пасивного інерта/ Матер. наук. – техн. конф. «Нові і нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні», 28–29 верес. 2006р. Одеса – Київ : АТМ України, 2006. С. 13–17.
15. Воїнов О.П., Воїнова С.О. Управління ерозійною агресивністю інерта в котлах з киплячим шаром / Наук. – техн. збірник «Енергозберігаючі технології в муніципальній і промисловій теплоенергетиці – 2006». Одеса : ОНПУ, 2006. С. 28–31.

#### **Voinov O.P., Elkin Yu.H. ABOUT INFLUENCE OF EXTERNAL EROSION PROCESS ON RESOURCE OF FLUIDIZED BED STEAM BOILERS**

*The purpose of article is to analyze the influence of the external erosion process in fluidized bed steam boilers on their resource. Low-temperature fluidized bed steam boilers have a number of properties that form their significant advantages over traditional types of steam boilers. The article analyzes typical examples of changes in the service life trajectories of steam boiler elements over time and provides recommendations for their selection in real steam boiler operation conditions. The influence of the main design and operating factors on the intensity of the external erosion process in fluidized bed steam boilers, as well as the influence of the external erosion process on the service life of boilers, was studied. As a result of the study, it was found that with a decrease in the size of inert particles, external erosion increases with acceleration. Managing the service life of a steam boiler through controlling the size of inert particles is in practice a complex scientific and technical task, since the current particle size is determined by the influence of a number of factors. An increase in the fluidization rate increases the intensity of the external erosion process, and the more so the smaller the inert particles are. The real possibility of controlling the fluidization rate is opened by the use of two-stage frequent combustion in a fluidized bed furnace. In surface-cooled furnaces, an increase in the thermal power of the superlayer volume causes an increase in the temperature of the furnace medium in it; in volume-cooled furnaces, it practically does not cause a similar increase in temperature. In the volume of the fluidized bed there is a horizontal layer, which contains a zone of maximum intensity of external erosion. External erosion is most intense in the middle, axial part of the volume of the fluidized bed. It decreases with distance from it. The conducted research allowed us to establish the characteristics of the operating mode of a fluidized bed steam boiler, depending on its conditions, which, in practical application, will allow us to propose ways and means of increasing the technological efficiency of fluidized bed boilers and increasing their resource, including a significant increase in the resistance of heating surfaces to the effects of external erosion.*

**Keywords:** steam boiler, resource management, fluidized bed, fluidization, external erosion, inert particle.

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026