

УДК 620.9:620.19

ПОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ЛОПАТОК ЗАВИХРЮВАЧА ПАЛЬНИКА КОТЛА ТПП-312

Кобзар С.Г., канд. техн. наук, **Борисов І.І.**, канд. техн. наук, **Халатов А.А.**, академік НАН України

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2020.7>

Представлено результати розрахунку динаміки корозії лопаток завихрювача пальника котла ТПП-312, проаналізовано можливі шляхи подовження їх ресурсу.

Представлены результаты расчета динамики коррозии лопаток завихрителя горелки котла ТПП-312, проанализированы возможные пути увеличения их ресурса.

The results of calculation of dynamics of corrosion of blades of a swirler of a burner of a boiler TPP-312 are presented, possible ways of prolongation of their resource are analysed.

Бібл. 6, рис. 5.

Ключові слова: біомаса, біопаливо, моторне біопаливо, біостанол, біодизель, біогаз, біопаливо другого покоління.

Вступ

Ресурс роботи пальників є суттєво важливим чинником для забезпечення довготривалої стабільної роботи котла. Одним із найбільш вразливих елементів пиловугільного пальника є лопатки завихрювача, оскільки вони знаходяться в зоні впливу потужного радіаційного потоку із топки котла, і на них, в першу чергу на частинах, що обернені до топки, відбувається інтенсивне окислення матеріалу. Як правило, товщина сталевих лопаток завихрювача не перевищує 4 мм, відведення теплоти теплопровідністю є досить ускладненим, і максимальна температура на окремих ділянках поверхні досягає величини 800 °С і більше. Внаслідок руйнівного впливу агресивного середовища відбувається корозія матеріалу, погіршується газодинаміка обтікання лопаток, і в результаті відбуваються небажані зміни режиму горіння палива у топці котла.

Представлені в роботі результати відносяться до котлоагрегату ТПП 312 Ладизинської ТЕС. Він оснащений 16-ма пиловугільними пальниками, що розташовані у два яруси [1]. При роботі котла на понижених навантаженнях, частина пальників відключається, і на них має місце збільшення температури поверхні кінців лопатки внаслідок зменшення рівня конвективного охолодження.

В [2] було вивчено гідродинаміку роботи пальника, визначено коефіцієнт витрати вторинного повітря, побудовано комп'ютерну модель газового тракту котла ТПП 312, визначено вплив ступеня завихрення та його напрямку на термогазодинаміку вогневого простору топки котла для основних режимів навантаження. Також було визначено вплив ступеня завихрення та його напрямку на термогазодинаміку вогневого простору топки котла для основних режимів на-

вантаження. Були отримані температурні поля для завдання граничних умов при дослідженні впливу радіаційного теплообміну на температурний стан лопатей завихрювача вторинного повітря. На базі цих даних було розраховано динаміку корозії для двох видів низьковуглецевої сталі та різних режимів експлуатації пальників. Розрахунки показали, що найбільший вплив на процес окислення здійснює матеріал лопатки: заміна сталі 3 на сталь 20 дозволяє зменшити швидкість корозії у 2,5 рази. Суттєве, на 50...70%, уповільнення корозії досягається за рахунок збільшення кількості лопаток з 8 до 24, внаслідок зменшення температури поверхні за рахунок поліпшення умов тепловіддачі в міжлопаткових каналах. Однак, для всіх розглянутих варіантів розрахункова корозія наприкінці річного терміну експлуатації була співрозмірною з товщиною матеріалу лопатки. Тому подальші дослідження було спрямовано на пошук та розрахунок таких варіантів, які забезпечують суттєве подовження ресурсу лопаток без кардинального втручання в конструкцію пальника. Такими заходами є деяке віддалення лопаток від зони радіаційного впливу топкового середовища, та нанесення покриття на високо-температурну зону лопаток.

Таким чином, основною ідеєю даного дослідження був пошук малозатратних заходів, які забезпечують зниження температури поверхні лопатки, і за рахунок цього – суттєве уповільнення високотемпературної корозії поверхні. В якості методу дослідження було застосоване комп'ютерне моделювання термогазодинамічних процесів в топці котла, визначення температурного поля на поверхні лопатки, та розрахунок швидкості окислення і відповідного зменшення товщини основного матеріалу лопатки пальника.

Мета роботи – визначення шляхів подовження ресурсу роботи лопаток завихрювача пального котла ТПП-312 на основі аналізу впливу режиму роботи пального, матеріалу лопаток та їх відстані від зони високої температури на динаміку високотемпературної корозії.

Комп'ютерне моделювання

На першому етапі проводилось моделювання термогазодинаміки потоків в пальному до виходу в об'єм топки котла. В якості вихідних даних (витрата та температура первинного та вторинного повітря), використовувались дані, отримані при експлуатації котла. На другому етапі проводилось чисельне моделювання процесу горіння вугілля в топці котла. На третьому етапі проводилось визначення температурного стану лопаток завихрювача вторинного повітря.

Для визначення температурного стану лопаток завихрювача вторинного повітря в програмному середовищі ANSYS CFX. була побудована та досліджена детальна комп'ютерна модель пального з частиною топкового простору. Розрахункова модель містила дві розрахункові підобласті. Перша підобласть була рідиною та являла собою всі тракти руху повітря в пальному та в частині топкового простору. Теплофізичні властивості цієї підобласті відповідали повітрю за законом ідеального газу. Друга підобласть була представлена у вигляді твердого тіла та мала теплофізичні властивості сталі. Ці дві підобласті були з'єднані інтерфейсними зв'язками для забезпечення умови сталості теплових потоків на межі кожної підобласті. Радіаційний теплообмін розраховувався за допомогою моделі Discrete Transfer, гідродинаміка була розрахована з використанням RNG-к-ε моделі турбулентності, температурний стан визначався за допомогою двох рівнянь

енергії для рідинної та твердої підобластей. Граничні умови були взяті з результатів розрахунку полів температури в середині топки котла, що були виконані на попередньому етапі виконання проекту. Більш детально відомості щодо комп'ютерного моделювання наведені в роботі [2].

Проводились дослідження для випадків оснащення пального 8 та 24 лопатками для завихрення периферійного вторинного повітря та навантаження блоку 280 та 210 МВт_е. Для навантаження 210 МВт_е частина лопаток відключається, і вони знаходяться в більш складних температурних умовах. Для цього режиму розрахунки проводились для відключеного пального.

Схема розташування лопаток в пальному показана на рис. 1.

Вторинне повітря подається через кільцевий канал висотою $h = 163$ мм, в якому установлений лопатковий завихрювач. Для зниження теплового навантаження на лопатки застосовувалось збільшення їх відстані Z_{bl} від амбразури, що в свою чергу знижувало ефективний кут β попадання радіаційного теплового потоку на елементи поверхні. Початково лопатки завихрювача були розташовані на відстані $Z_{bl} = 1453$ мм. З міркувань технічної можливості маловитратного переносу трубопроводів подачі аеросуміші та вторинного повітря, збільшення відстані Z_{bl} можливо приблизно на 250 мм. Відповідно значення кута β знижувалось на 15%, з $6,42^\circ$ до $5,48^\circ$. В розрахунках задавались чотири значення Z_b : $Z_{b_0} = 1453$ мм (початкова відстань); $Z_{b_1} = 1503$ мм (збільшення на 50 мм); $Z_{b_2} = 1603$ мм (+150 мм) та $Z_{b_3} = 1703$ мм (+250 мм).

Всього було обрано 16 варіантів – для робочого та відключеного стану, з кількістю лопаток 8 чи 24, та з чотирма різними значеннями Z_{bl} : 1453, 1503, 1603 та 1703 мм.

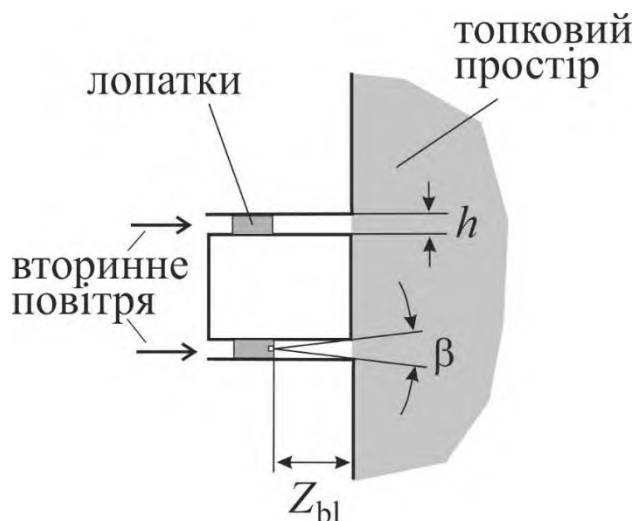


Рис. 1. Схема розташування лопаток в пальному.

Кінетика окислення. В даній роботі розглядається кінетика окислення низьковуглецевих сталей – Ст. 3 та Ст. 20 у повітрі, стосовно окислення лопаток завихрювача пального пристрою пиловугільного котла ТПП–312. Тому основну увагу було приділено пошуку необхідних констант для сталей цього класу.

Для розрахунків застосовано дифузійний механізм окислення, для якого зростання маси зразка описується параболічним законом [3]:

$$\left(\frac{\Delta m}{S}\right)^2 = k_p \cdot \tau, \quad (1)$$

де $\Delta m/S$ – зростання маси зразка на одиницю поверхні, $\text{г}/\text{см}^2$; k_p – константа швидкості гетерогенної реакції, $\text{г}^2 \cdot \text{см}^{-4} \cdot \text{с}^{-1}$; τ – час. Константа швидкості реакції визначається законом Ареніуса:

$$k_p = k_{p0} \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (2)$$

де k_{p0} – константа, Q – енергія активації, $\text{Дж}/\text{моль}$; R – газова стала, $8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

На рис. 2 наведено залежності по константам окислення ст.3, ст.20 та сталі SAE-AISI 1006 (близької за своїм складом до ст.20) за даними робіт [3–6]. Для порівняння наведені також дані для чистого заліза. Ці дані використовувались при розрахунку швидкості окислення лопаток завихрювача.

Результати

Температурний стан лопаток завихрювача

Розрахунки показали, що, як і слід було очікувати, найбільший рівень температури поверхні лопатки має місце на кінцях лопаток, найбільш наближених до топкового простору. У подальшому аналізі під температурою буде розумітись максимальна температура.

На рис. 3 показана максимальна температура матеріалу лопаток завихрювача в функції їх відстані від амбразури для робочого та відключеного пальників.

Як видно із рисунка, температура лопаток у робочому пальнику є значно нижчою ніж у відключеному. Це пов'язано з більшою витратою повітря у робочому пальнику і, відповідно, більшим рівнем конвективного охолодження (для захисту від термічного руйнування неробочого пальника, в ньому залишається подача повітря в обсязі 10% від робочого режиму). Слід також зазначити, що для пальника з 24 лопатками, у порівнянні з пальником з 8 лопатками, має місце більш високий параметр закрутки вторинного повітря, що відбивається на коефіцієнті теплообміну і температурі лопаток.

При збільшенні відстані лопаток від амбразури топки котла максимальна температура матеріалу лопаток зменшується, що пов'язано зі зменшенням радіаційного потоку, що поглинається поверхнею лопаток завихрювача внаслідок зменшення тілесного кута зі збільшенням відстані лопаток від амбразури (див. схему на рис. 1). Причому, для робочих лопаток температура знижується на 120° , а для відключених – на 50° .

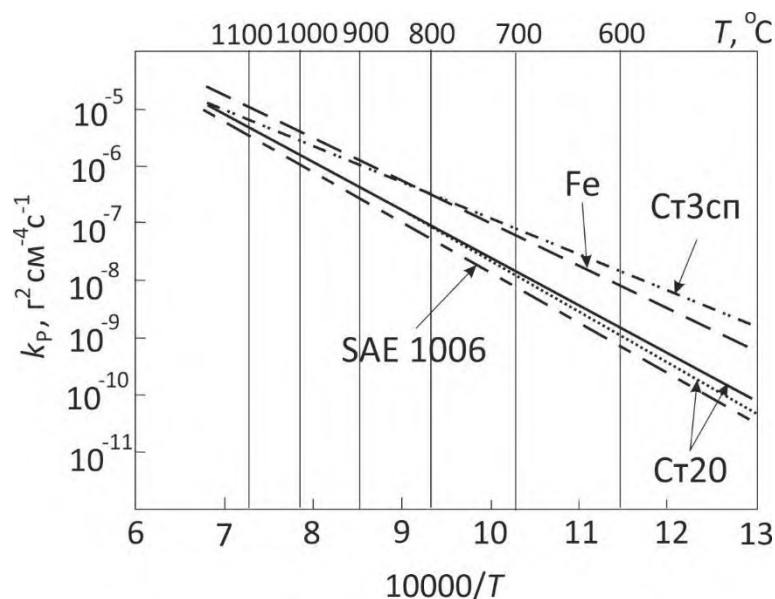


Рис. 2. Температурні залежності константи швидкості реакції окислення в повітряному середовищі.

Розрахунок окислення лопаток завихрювача вторинного повітря

Для середньостатистичного навантаження базового блоку приблизний термін річної роботи котла складає 6000 годин, з них 2000 – на пониженому навантаженні. При розрахунку «виїдання» чистого металу будемо вважати, що шар окалини складається з гематиту (Fe_2O_3). Тоді частка заліза у прирості маси окалини складає 70%. Виходячи з цього, було проведено розрахунки стоншення кінцевої частини лопатки завихрювача зі Ст 3 та Ст 20 для всіх варіантів, які розглядалися в роботі.

Розрахунки показали, що відстань лопаток пальника до амбразури $\Delta Z_{bl} = Z_{bl} - Z_{bl.o}$ ($Z_{bl.o} = 1473$ мм) суттєво впливає на корозію. Вплив цього чинника показаний на рис. 4.

Як видно із рисунка, при збільшенні відстані лопаток від амбразури корозія суттєво знижується. Найбільш висока корозія, яка за своєю абсолютною величиною є порівняльною з товщиною лопатки, має місце для відключеного пальника з лопатками зі ст. 3. Найнижча корозія має місце для робочого пальника зі сталі 20. При максимальній відстані від амбразури

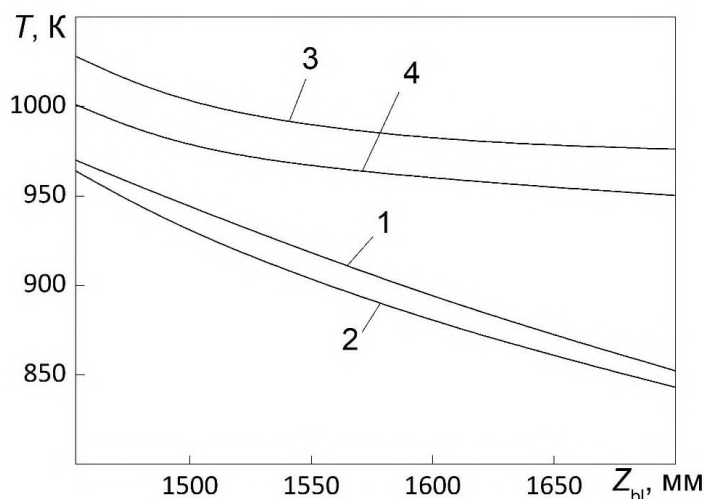


Рис. 3. Залежність максимальної температури матеріалу лопаток завихрювача від відстані від амбразури. 1,2 – робочий пальник; 3,4 – відключений пальник; для навантаження 280 МВт; 1,3 – завихрювач з 8 лопатками; 2,4 – завихрювач з 24 лопатками.

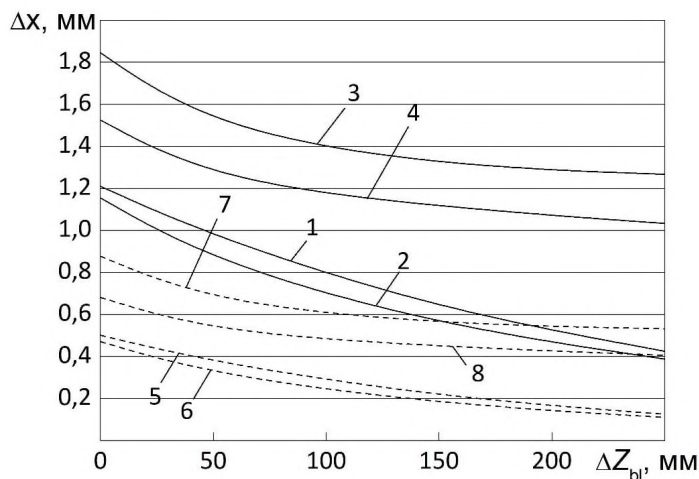


Рис. 4. Залежність величини зменшення товщини основного матеріалу лопатки завихрювача (Δx , мм) наприкінці терміну річної експлуатації пальника ($\tau = 6000$ годин) від величини збільшення відстані лопаток пальника до амбразури $\Delta Z_{bl} = Z_{bl} - Z_{bl.o}$ ($Z_{bl.o} = 1473$ мм): 1 – робочий пальник, 8 лопаток, ст. 3; 2 – робочий пальник, 24 лопатки, ст. 3; 3 – відключений пальник, 8 лопаток, ст. 3; 4 – відключений пальник, 24 лопатки, ст. 3; 5 – робочий пальник, 8 лопаток, ст. 20; 6 – робочий пальник, 24 лопатки, ст. 20; 7 – відключений пальник, 8 лопаток, ст. 20; 8 – відключений пальник, 24 лопатки, ст. 20.

корозія основного матеріалу лопаток наприкінці річного терміну експлуатації складає величину $\sim 0,1$ мм, тобто для цього випадку вона є прийнятною з експлуатаційної точки зору.

Причому, у відносних одиницях, найбільш суттєвий вплив відстані від амбразури на корозію має місце для робочого пальника (зниження корозії у 4 рази), а для відключеного пальника ця залежність є значно меншою (зниження корозії на 30...40%). Кількість лопаток завихрювача практично не впливає на відносний показник корозії, а матеріал лопатки (ст. 3 або ст. 20) впливає незначним чином.

Розрахунки показали, що збільшення кількості лопаток з 8 до 24 зменшує корозію лопаток: у робочому пальнику на 9,5% для ст 3 та на 12,5% для ст 20; у відключеному пальнику на 17% для ст 3, та на 22% для ст 20. Це зменшення корозії обумовлене, насамперед зниженням температури поверхні за рахунок поліпшення умов тепловіддачі в міжлопаткових каналах.

Вплив матеріалу лопаток та стану пальника (робочий чи відключений) показано на рис. 5.

Заміна Ст 3 на Ст 20 зменшує корозію у 2,5...3,5 рази для робочого пальника, і у 2...2,5 рази для відключеного пальника (рис. 4 а). Причому, зменшення корозії для

робочого пальника суттєво залежить від відстані лопаток до амбразури, а для відключеного пальника ця залежність є слабкою.

При виключенні пальника з роботи корозія матеріалу лопатки пришвидшується у 1,5...2,5 рази для матеріалу ст 3, та у 1,5...4,3 рази для матеріалу ст 20.

Висновки

Проведено чисельне дослідження високотемпературної корозії сталевих лопаток завихрювача пилувугільного пальника котла ТПП-312 в реальних умовах його експлуатації. Отримані результати дозволяють проводити обґрунтовану оцінку ресурсу роботи лопаток пальникового пристрою.

Розрахунки швидкості корозії проводились на базі результатів комп'ютерного моделювання горіння пилувугільної аеросуміші в об'ємі котла з подальшим визначенням поля температур на поверхні лопатки. Динаміка корозії визначалась за допомогою експериментальних констант окислення сталі, наведених в літературних джерелах. Отримано дані для двох видів низьковуглецевої сталі, двох різних режимів експлуатації пальників, для кількості лопаток 8 і 24, та для різних відстаней лопаток пальника від амбразури топки котла, всього оброблено 16 різних варіантів.

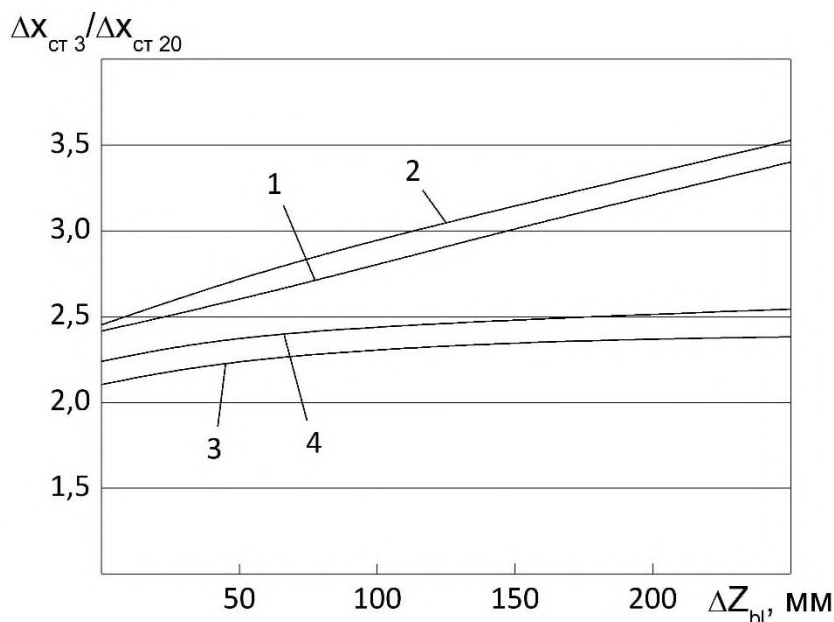


Рис. 5 Порівняння зменшення товщини основного матеріалу лопатки завихрювача: для ст 3 та ст 20 (а), наприкінці терміну річної експлуатації пальника ($\tau = 6000$ годин) в залежності від збільшення відстані лопаток пальника до амбразури $\Delta Z_{bl} = Z_{bl} - Z_{bl_0}$ ($Z_{bl_0} = 1473$ мм):

1 – робочий пальник, 8 лопаток; 2 – робочий пальник, 24 лопатки; 3 – відключений пальник, 8 лопаток; 4 – відключений пальник, 24 лопатки.

Розрахунки показали, що збільшення кількості лопаток з 8 до 24 зменшує корозію лопаток: на 9,5% для ст 3, робочий палиник; на 17% для ст 3, відключений палиник; на 12,5% для ст 20, робочий палиник; на 22% для ст 20, відключений палиник.

Заміна Ст 3 на Ст 20 зменшує корозію у 2,5...3,5 рази для робочого палиника, і у 2...2,5 рази для відключеного палиника.

При виключенні палиника з роботи корозія матеріалу лопатки пришвидшується у 1,5...2,5 рази для матеріалу ст 3, та у 1,5...4,3 рази для матеріалу ст 20.

При збільшенні відстані лопаток від амбразури корозія суттєво знижується. Найбільш висока корозія, яка за своєю абсолютною величиною є порівняльною з товщиною лопатки, має місце для відключеного палиника з лопатками зі ст. 3. Найнижча корозія має місце для робочого палиника зі сталі 20.

Найбільш суттєвий вплив відстані від амбразури на корозію має місце для робочого палиника (зниження корозії у 4 рази), а для відключеного палиника ця залежність є значно меншою (зниження корозії на 30...40%).

Таким чином, в якості основних шляхів підвищення ресурсу роботи лопаток можна запропонувати наступні:

- застосувати в якості матеріалу лопатки ст. 20 замість ст. 3, це зменшує корозію у 2,5...3,5 рази для робочого палиника, і у 2...2,5 рази для відключеного палиника

- збільшити кількості лопаток з 8 до 24, це зменшує корозію до 20% за рахунок зменшення температури поверхні внаслідок поліпшення умов тепловіддачі в міжлопаткових каналах.

- максимально (для конструкції, що розглядається, на 250 мм) віддалити лопатки палиника від амбразури топкового простору, це дає можливість знизити корозію у 4 рази для робочого палиника, та на 30...40% для відключеного палиника.

Робота виконана при підтримці Цільової програми наукових досліджень НАН України “Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд” (Ресурс-2), проект Р5.9 «Подовження ресурсу конвективних поверхонь нагріву котла ТПП 312 шляхом зменшення абразивної ерозії»

ЛІТЕРАТУРА

1. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Визначення ефективності зниження викидів оксидів азоту системою ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312 блоку №6 ДТЕК Ладижинська ТЕС // Вісник НТУУ ХПІ. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – №13(1056). – С.85–91.
2. Кобзар С.Г., Борисов І.І., Халатов А.А. Моделювання корозії лопаток завихрювача палиника котла ТПП-312 // Енерготехнології та ресурсозбереження. – 2019. – №4. – С.56–61.
3. Chen R.Y., Yuen W.Y.D. Review of the High-Temperature Oxidation of Iron and Carbon Steels in Air or Oxygen // Oxidation of Metals. – 2003. – Vol. 59, No. 5/6. – P.433–468.
4. Trindade V.B., Borin R., Hanjari B.Z. Yanga S., Kruppa U., Christa H-J. High-Temperature Oxidation of Pure Fe and the Ferritic Steel 2.25Cr1Mo // Materials Research. – 2005/ – Vol. 8, No. 4. – P.365-369.
5. Темлянецев Н.В. Повышение качества толстолистового проката на основе применения рациональных режимов нагрева стали в печах и деформационного окалиноудаления : Автореф. Дис. канд. техн. наук. – Новокузнецк, 2007. – 23 с.
6. Отс А.А. Коррозия и износ поверхностей нагрева котлов. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 272 с.

EXTENSION OF THE RESOURCE OF THE BURNER SWIRL BLADES OF THE BOILER TPP-312

Kobzar S.G., Borisov I.I., Khalatov A.A.

*Institute of Engineering Thermophysics of the National
Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv
2a Marii Kapnist str., 03057, Kyiv, Ukraine e-mail:
sergiykobzar@gmail.com*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2020.7>

Numerical research of high-temperature corrosion of steel blades of the swirler of a pulverized coal burner of the TPP-312 boiler in real conditions of its operation is carried out. Data on the dynamics of oxidation of the blade surface for two steels and different operating conditions of the burners were obtained. The results of the calculation allow a reasonable assessment of the service life of the blades of the burner device. Corrosion rate calculations were performed based on the results of computer simulation of pulverized coal combustion in the boiler volume with subsequent determination of the temperature field on the blade surface.

The corrosion dynamics was determined using the experimental oxidation constants of steel given in the literature. Data were obtained for two types of low-carbon steel, two different modes of burner operation, for the number of blades 8 and 24, and for different distances of burner blades from the embrasure of the boiler furnace, a total of 16 different variants were calculated.

Calculations have shown that with increasing the distance of the blades from the embrasure of the furnace, corrosion is significantly reduced. The highest corrosion, which in its absolute value is comparable to the thickness of the blade, occurs for the disconnected burner with blades from Art. 3. The lowest corrosion occurs for the working burner with blades made from steel 20 (reduction of corrosion by 4 times), and for the disconnected burner this dependence is much smaller (reduction of corrosion by 30... 40%).

References 6, figures 5.

Keywords: burner of dust coal boiler; swirl blades; corrosion; base material thinning dynamics.

1. Kobzar S.G., Khalatov A.A. [Determining the efficiency of the reduction of nitrogen oxide emissions using the system of stage coal combustion of the TPP-312 boiler block No6 DTEK of Ladyzhin Thermal Power Station] // [NTU "KhPI" Bulletin: Power and heat engineering processes and equipment], 2014, 13(1056). – pp.85–91. (Ukr)

2. Kobzar S.G., Borisov I.I., Khalatov A.A. [Modelling of Corrosion of the Burner Swirling Blades of the Boiler TPP-312] // [Energy Technologies and Resource Saving], 2019, №4, pp. 56–61. (Ukr)

3. Chen R.Y., Yuen W.Y.D. Review of the High-Temperature Oxidation of Iron and Carbon Steels in Air or Oxygen // Oxidation of Metals. – 2003. Vol. 59, No. 5/6. P. 433–468.

4. Trindade V.B., Borin R., Hanjari B.Z. Yanga S., Kruppa U., Christa H-J. High-Temperature Oxidation of Pure Fe and the Ferritic Steel 2.25Cr1Mo // Materials Research – 2005/ Vol. 8, No. 4, P.365-369.

5. Temliantsev N.V. [Improving the quality of steel plates through the use of rational modes of steel heating in furnaces and deformation scale removal], Autoreferat, Novosibirsk, 2007, 23 p. (Rus)

6. Ots A.A. [Corrosion and wear of heating surfaces of boilers], Publishing house “Energoatomizdat” 1987, Moscow, 272 p. (Rus.)

Отримано 22.06.2020

Received 22.06.2020