

УДК 62-97

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕРОЗІЇ КОНВЕКТИВНИХ ПОВЕРХОНЬ НАГРІВУ КОТЛА ТПП 312

Кобзар С. Г., Коваленко Г. В., Халатов А. А.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, м. Київ, 03680, Україна

Проведено математичне моделювання роботи конвективних поверхонь котла ТПП 312 Ладзжинської ТЕС. Визначено зони підвищеної ерозії для основних режимів навантаження котла. Запропоновано метод управління аеродинамікою в об'ємі топки котла ТПП-312 з метою зменшення ерозії теплообмінних поверхонь. При збереженні потужності блоків Ладзжинської станції на теперішньому рівні впродовж залишкового ресурсу блоків, застосування методу управління дозволить продовжити ресурс конвективних поверхонь блоку на 1 рік.

Проведено математическое моделирование работы конвективных поверхностей котла ТПП 312 Ладзжинской ТЭС. Определены зоны повышенной эрозии для основных режимов нагрузки котла. Предложен метод управления аеродинамикой в объеме топки котла ТПП-312 с целью уменьшения эрозии теплообменных поверхностей. При сохранении мощности блоков Ладзжинской станции на нынешнем уровне в течение остаточного ресурса блоков, применения метода управления позволит продлить ресурс конвективных поверхностей блока на 1 год.

В роботі наведено результати математичного моделювання роботи конвективних поверхонь котла ТПП 312 Ладзжинської ТЕС. Визначено зони підвищеної ерозії для основних режимів навантаження котла. Запропоновано метод управління аеродинамікою в об'ємі топки котла ТПП-312 з метою зменшення ерозії теплообмінних поверхонь. При збереженні потужності блоків Ладзжинської станції на теперішньому рівні впродовж залишкового ресурсу блоків, застосування методу управління дозволить продовжити ресурс конвективних поверхонь блоку на 1 рік.

Бібл. 5, рис. 4, табл. 3.

**Ключові слова:** котел на твердому паливі, ерозія теплообмінних поверхонь, комп'ютерне моделювання.**Латинські символи:** $d$  – характерний діаметр частки, мкм; $I_e$  – індекс ерозії попелу; $K_c$  – константа; $r$  – відносна частка; $R_y$  – процентна частка на ситі  $y$ , %; $T$  – температура, К; $V$  – швидкість частки, м/с; $x$  – масова частка кремнію в попелі, ширина котла; $y$  – розмір чарунки сита, мкм, либина котла; $z$  – висота котла.**Грецькі символи:** $\beta$  – кут між напрямом потоку і теплообмінною поверх-

нею, град;

 $\varepsilon$  – сумарний ступінь ерозії; $\sigma_y$  – межа деформації, кгс/м<sup>2</sup>; $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>.**Індекси:**

1 – газова фаза;

2 – тверда фаза.

**Скорочення:**

НРЧ – нижня радіаційна частина;

СРЧ – середня радіаційна частина;

ВРЧ – верхня радіаційна частина;

ТЕС – теплова електростанція.

**Вступ**

Обладнання підприємств теплоенергетики України було введено в експлуатацію у 60 – 70 роках минулого століття. В основному воно відпрацювало свій ресурс. Експлуатація обладнання ускладнюється при використанні непроектного вугілля підвищеної зольності та при частковому навантаженні з постійними зупинками. Внаслідок систематичної дії часток вугілля та продуктів його горіння, а саме, коксового залишку та попелу, на окремих ділянках труб спостерігається зменшення товщини стінок, що призводить до їх розриву при досягненні критичної товщини та аварійній зупинці блоку. Пошкодження однієї труби ціною в кілька сотень доларів може привести до аварійної зупинки котлоагре-

гату мільйонної вартості.

Процес ерозії багатофакторний. На нього впливає температура і кількість частинок, які б'ються об теплообмінні поверхні, концентрація окислювача в зоні удару [1-3], кут зустрічі твердої частинки і теплообмінної поверхні [4].

Зменшення негативного впливу твердих часток на теплообмінну поверхню можна досягнути шляхом аеродинамічного керування потоком часток біля труб.

**1. Основні характеристики котла ТПП 312**

Котлоагрегат ТПП-312 виробництва Таганрогського котельного заводу, має П-подібну компоновку, топка котла відкритого типу. Схему вертикальної компоновки котла наведено на рис. 1.

Основні радіаційні поверхні виготовлені у вигляді панелей з трубами діаметром 32 мм та товщиною 6 мм, матеріал труб – сталь 12X1МФ.

Система підвісних ширм складається з ширмового пароперегрівника першої (ШПП I ст.) та другої (ШПП II ст.) ступенів. Зовнішній діаметр труб складає 32 мм

внутрішній 20 мм для ШПП I ст. та 18 мм для ШПП II ст..

Котел оснащено 16-ма пальниками, що розташовані у два яруси. На теперішній час котли ТПП 312 Ладизинської ТЕС оснащені пальниками реконструйованими силами працівників станції. 2.

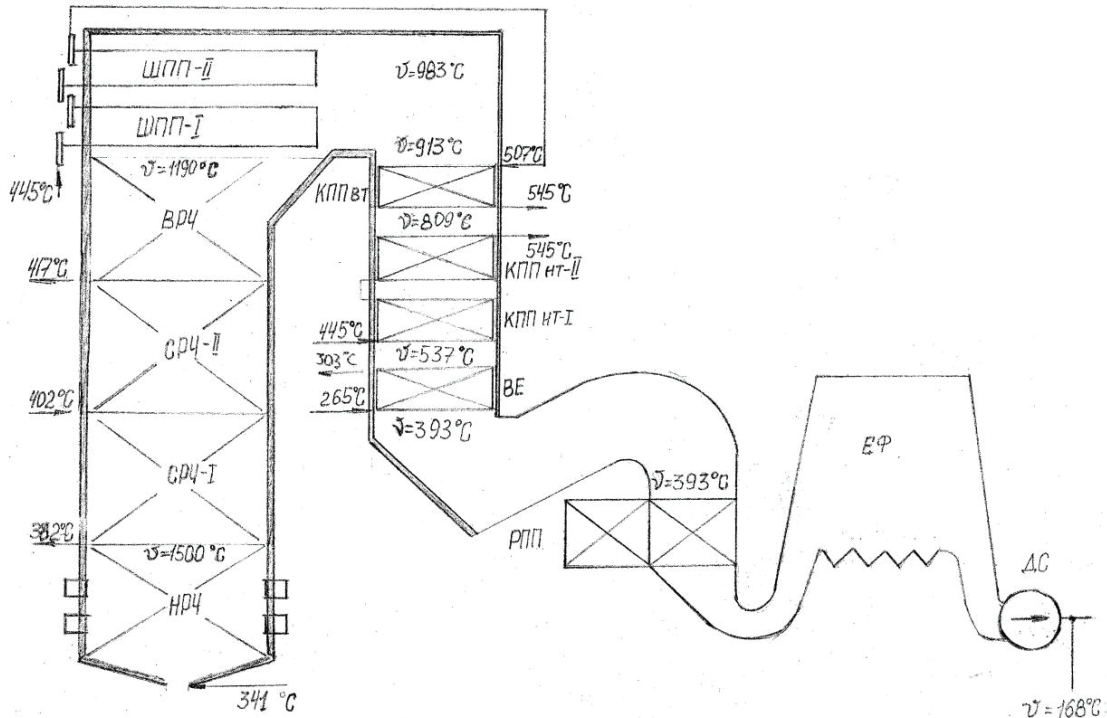


Рис. 1. Схема вертикальної компоновки котла ТПП 312.

## 2. Конвективна шахта котла ТПП 312

Конвективна шахта котла має прямокутний перетин розміром 17,4 м на 8,6 м. В конвективній шахті котла ТПП 312 знаходяться наступні поверхні нагріву.

Конвективний пароперегрівник високого тиску (КПП ВТ) виготовлено з труб діаметром 32 мм, товщина стінки 7 мм. Матеріал труб сталь 12X18Н12Т. Загальна кількість пакетів – 244. Параметри експлуатації: тиск – 255 атм, температура – 545 °С. Труби розташовані у шаховому порядку з кроками  $S_1=140$  мм  $S_2=54,5$  мм.

Конвективний пароперегрівник низького тиску (КПП НТ). КПП НТ складається з двох ступенів. КПП НТ I ст. виготовлено з труб діаметром 50 мм, товщина стінки 5 мм. Матеріал труб сталь 12X1МФ. Загальна кількість пакетів – 264. Параметри експлуатації: тиск – 40 атм, температура – 434 °С. Труби розташовані у шаховому порядку з кроками  $S_1=130$  мм  $S_2=72,8$  мм. КПП НТ II ст. виготовлено з труб діаметром 42 мм, товщина стінки 4 мм. Матеріал труб сталь 12X18Н12Т. Загальна кількість пакетів – 244. Параметри експлуатації: тиск – 39 атм, температура – 545 °С. Труби розташовані у шаховому порядку з кроками  $S_1=140$  мм  $S_2=55,4$  мм.

Водяний економайзер (ВЕ). ВЕ виготовлено з труб

діаметром 32 мм, товщина стінки 6 мм. Матеріал труб сталь 20. Загальна кількість пакетів – 264. Параметри експлуатації: вхідні тиск – 309 атм, температура – 260 °С; вихідні тиск – 307 атм, температура – 303 °С. Труби розташовані у шаховому порядку з кроками  $S_1=100$  мм  $S_2=49$  мм.

## 3. Характеристики вугільного пилу

Котли ТПП 312 на Ладизинській ТЕС працюють на вугіллі марок Г та ДГ. Осереднені характеристики вугілля наведені в таблиці 1.

Для помелу вугілля використовуються кульові барабанні млини (КБМ). Результати аналізу вугільного пилу, що йде на спалювання, на ситах з чарункою 90 мкм та 200 мкм, дали наступні результати  $R_{90}=30\%$ ,  $R_{200}=4\%$ . Використовуючи ці результати було отримано розподіл Розіна-Раммлера:

$$R_y = \exp\left(-\left(\frac{d}{77,4}\right)^{1,23}\right)$$

Еквівалентний діаметр часточки, який характеризує дану суміш складає 45,58 мкм.

Таблиця 1. Фізико-хімічні характеристики вугілля

Технічний аналіз						Горюча маса					
$W^p, \%$	$W^{im}, \%$	$A^c, \%$	$S^{об}, \%$	$V^r, \%$	$Q_{рн}, \text{МДж/кг}$	$S^r, \%$	$C^r, \%$	$H^r, \%$	$N^r, \%$	$O^r, \%$	$Q_{гн}, \text{МДж/кг}$
13,2	2,2	23,6	1,8	42,0	20,9	1,21	82,31	5,51	2	8,97	33,94

#### 4. Комп'ютерна модель котла ТПП 312

Використовуючи геометричні розміри котла ТПП 312 була розроблена його комп'ютерна модель.

Радіаційні поверхні були представлені у вигляді поверхонь на межах розрахункової області. Граничні умо-

ви задавалися у вигляді постійної температури, яка була прийнята, як середня. Значення температур наведені в таблиці 2. Такий принцип був застосований до фронтного, стельового та екрану поворотної камери.

Таблиця 2. Характерні температури радіаційних поверхонь

Поверхня	Вхідна температура, °C	Вихідна температура, °C	Середня температура, °C
НРЧ	325	396	360,5
СРЧ-1	396	410	403
СРЧ-2	410	427	418,5
ВРЧ	427	445	436

Ширмові пароперегрівники були представлені у вигляді вирізів у тилі домену шириною 32 мм, що відповідають товщині труб. Температура на поверхні ширмового пароперегрівника першої ступені задавалася 470 °C, а на поверхні ширмового пароперегрівника другої ступені задавалася 500 °C.

Теплообмінні поверхні, що знаходяться у конвективній шахті котла задавалися у вигляді

підобластей розрахункової області. Кожна така підобласть мала розмір відповідної теплообмінної поверхні, відповідну пористість, що дорівнювала не зайнятій трубами площі в напрямку потоку та відповідному об'ємному тепловому потоку.

Значення прохідного перетину та теплового потоку для навантаження турбіни 280 МВт<sub>е</sub> для теплообмінних поверхонь конвективної шахти, наведені в таблиці 3.

Таблиця 3. Площі прохідного перетину та теплові потоки при навантаженні турбіни блоку 280 МВт<sub>е</sub> для теплообмінних поверхонь конвективної шахти

Поверхня	Прохідний перетин, м <sup>2</sup>	Тепловий потік, кВт/м <sup>3</sup>
КПП ВТ	7,42	2126,0
КПП НТ II ст.	26,78	370,59
КПП НТ I ст.	42,75	265,677
ВЕ	21,41	386,0

Комп'ютерна модель котла була побудована в препроцесорі пакета прикладних програм. Напрямок координатних осей декартової системи координат були обрані наступним чином: висота котла – вісь z; ширина котла – вісь x; глибина котла – вісь y. Осі пальників котла співпадають з напрямком осі u при цьому фронтальні пальники котла мають додатний напрямок, а тиллові – від'ємний. Котел ТПП 312 має осесиметричну будову (рис. 1). Для зменшення затрат машинного часу модель обмежувалась половиною котла, а на осі симетрії задавалися симетричні граничні умови.

#### 5. Визначення зон підвищеного абразивного зношення на теплообмінних поверхнях котла ТПП 312

Використовуючи побудовану комп'ютерну модель котла ТПП 312 було проведено моделювання термогазодинаміки котла на режимі навантаження 280 МВт<sub>е</sub>. При даному режимі навантаження в роботі знаходяться всі 16 пальників. Для розрахунку горіння вугілля використовувалася модель, яка була розроблена раніше [1-3].

Згідно з висновками роботи [5] сумарний ступінь

ерозії може бути визначено за формулою:

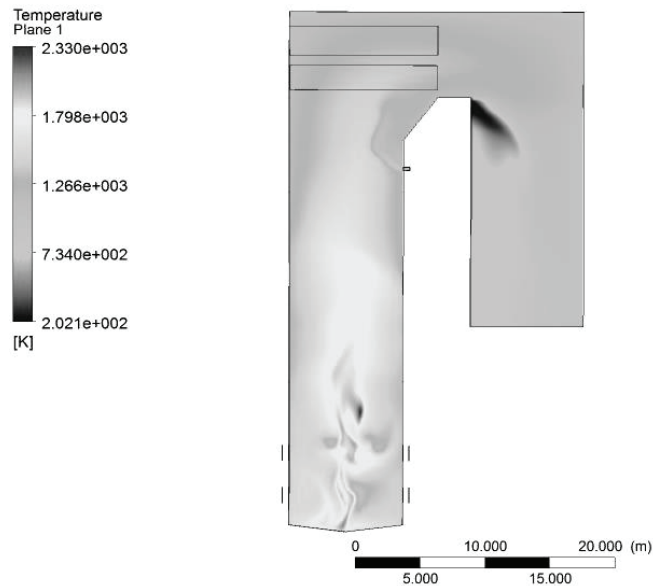
$$\varepsilon = (K_c I_e(x) \rho_m r_2^{1/2} V^3 \sin \beta) / \sigma_y^{3/2}, \quad (1)$$

де  $K_c$  – константа,  $x$  – масова частка кремнію в попелі,  $I_e$  – індекс ерозії попелу. Межа деформації  $\sigma_y$  залежить від температури і для вуглецевої сталі може бути визначена за формулою (2) з [5]

$$\sigma_y = 2 \cdot 10^{-5} T^2 - 0,0353 T + 30,871 \text{ [кгс/м}^2\text{]}. \quad (2)$$

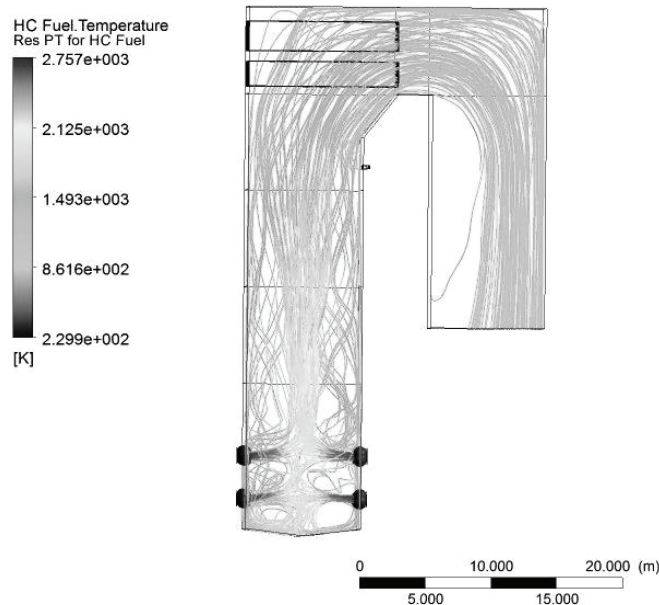
В зонах підвищеної ерозії вектори швидкості здебільшого мають нормальний напрям до поверхні труб, тому було прийнято  $\sin \beta = 1$ .

З рис. 2 видно що температура газів в зоні, що нас цікавить, дорівнює 1300 К.



*Рис. 2. Розподіл температури на режимі навантаження 280 МВт.*

Температура твердих частинок в потоці знаходиться в межах 1500...870 К (рис. 3).



*Рис. 3. Зміна температури часток в об'ємі котла ТПП 312 (навантаження 280 МВт).*

При розрахунках взято до уваги, що тверді частинки в процесі горіння зменшуються в розмірах з 70 мкм до 9 мкм (рис. 4).

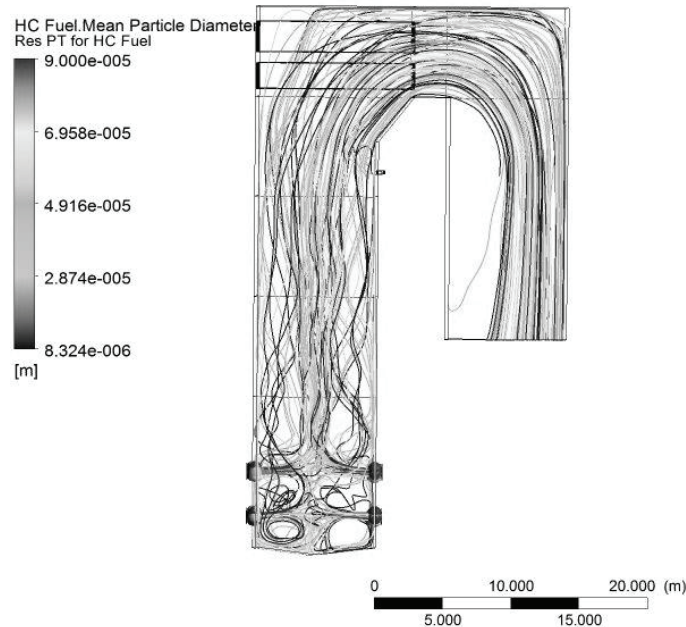


Рис. 4. Зміна діаметру часток по тракту котла.

Внаслідок двоярусної будови котла при взаємодії струменів від пальників формуються два потоки часток попелу, які розташовані в середині топки котла, ближче до фронту котла (основний), та біля тилу котла (рис. 4).

Першою зоною підвищеного абразивного зносу слід вважати нижні згини труб ширмового пароперегрівника 1 ступені. Швидкість часток в цій зоні складає 16 м/с. Часточки стикаються під прямим кутом до поверхні труб біля фронтальної частини котла, температура часток досягає 1200...1300 К. Біля повороту на перевал труби знаходяться під впливом часток, які мають вектор швидкості під кутом 45° до поверхні труб ширмового пароперегрівника.

При повороті потоку на 180 градусів, який починається в районі ширмового пароперегрівника, а закінчується в поворотній камері, внаслідок дії відцентрових сил основний потік часток взаємодіє з поверхнею труб конвективного пароперегрівника високого тиску (КПП ВТ). Зона взаємодії починається на відстані 4 м та закінчується на відстані 6 м від початку конвективної шахти. В цій зоні часточки мають нормальну до поверхні труб швидкість близько 25 м/с. Температура часток становить 1200...1300 К, а діаметр 25...30 мкм (рис. 4).

Після проходження КПП ВТ потік часток, майже не змінюючи свого положення в просторі, проходить всі пакети теплообмінних труб конвективної шахти.

Слід очікувати, що тут буде спостерігатись зона підвищеного абразивного зносу труб. Перш за все це стосується труб КПП ВТ та водяного економайзера, тому що труби ВЕ зроблені з менш твердої сталі.

Аналіз результатів експлуатації котлів ТПП 312

підтвердив результати моделювання.

#### Висновки

1. Зібрані вихідні дані щодо геометричних та експлуатаційних характеристик котла ТПП-312 Ладжинської ТЕС та побудована комп'ютерна модель тракту котла

2. За результатами математичного моделювання отримано поля швидкостей, температур та концентрацій в об'ємі тракту котла ТПП-312 для основних режимів навантаження турбіни 280 та 210 МВт, та виявлені зони підвищеної інтенсивності накидування часток твердої фази на труби топки котла, які підтверджені ДТЕК Ладжинська ТЕС за результатами експлуатації блоків.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Визначення ефективності зниження викидів оксидів азоту системою ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312 блоку №6 ДТЕК Ладжинська ТЕС // Вісник НТУУ ХП. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – №13(1056). – С. 85 - 91.

2. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Кінетична модель утворення сірководню в топках котлів ТЕС при спалюванні вугілля, що містить сірку // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т.36 – №.3. – С. 5 - 19

3. Зменшення ерозії топкових екранів шляхом керування структурою течії в об'ємі топки котла ТПП-312/ Кобзар С.Г., Халатов А.А// в кн. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Збірник наукових статей за результатами, отриманими

в 2010-2012 рр. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2012. – 612 с./ - С. 279 - 288.

4. Шрайбер А. А., Яценко В. П. Моделирование абразивного износа конвективных теплообменных поверхностей котла// Проблемы загальної енергетики

2008. – Т.17. – С. 37 – 40.

5. Das S. K., Godiwalla K. M., Mehrota S. P., Sastry K. K., Dey P. K. Analytical model for erosion behavior of impacted fly-ash particles on coal-fired boiler components// Sadhana. – Vol. 31, part 5 – October 2006 – pp.583 – 595.

### COMPUTER MODELING OF THE EROSION OF THE CONVECTION HEAT TRANSFER SURFACES OF BOILER TPP 312

**Kobzar S. G., Kovalenko G. V., Khalatov A. A.**

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Science of Ukraine  
2-a Zheliabov street, 03957 Kyiv, Ukraine

The erosion process depends on many factors. It is influenced by the temperature and the number of particles that are beating on the heat exchange surfaces, the concentration of oxidizer in the impact zone, the angle of the meeting of the solid particles and the heat exchange surface. A computer model of the gas tract was built for the TPP-312 Ladyzhinskaya TPP. To account for coal combustion characteristics of grades G and DG, coding of the software complex has been carried out. The areas of increased erosion for the main modes of boiler load have been determined. The method of aerodynamics control in the volume of boiler firebox TPP-312 is proposed in order to reduce the erosion of heat exchange surfaces. With the capacity of the Ladyzhinskaya thermal power plant at the current level for the remainder of the blocks' life, the application of the developed control method will allow to extend the life of the convective blocks of the block for one year.

Reference 5, Figures 4, Tables 3.

**Key words:** solid fuel boiler, erosion of heat transfer surfaces, computer simulation.

1. Kobzar S.G., Khalatov A.A. Determination of the efficiency of reducing the emissions of nitrogen oxides by the system of step-by-step combustion of the coal in boiler of TPP-312 of block № 6 of DTEK Ladyzhinskaja TPP // Visnik NTUU HPI. Seriya: Energetichni ta teplotehnichni protsesi y ustatkuvannya. [Bulletin of the NTUU KhPI. Series: Power and heat engineering processes and equipment, 2014, № 13 (1056), P. 85-91.] (Ukr.)

2. Kobzar S.G., Khalatov A.A. Kinetic model of formation of hydrogen sulfide in furnaces of boilers of HPP at combustion of coal containing sulfur// Promyishlennaya teplotehnika. [Industrial Heat Engineering], 2014, V.36, № 3. P. 5-19. (Ukr.)

3. Kobzar S.G., Khalatov A.A. Reducing the erosion of fired screens by controlling the flow structure in the volume of boiler firebox TPP-312// [In the book .. Problems of the resource and safety of the operation of constructions, structures and machines: Collection of scientific articles According to the results obtained in 2010-2012 - Kyiv: Institute of Electric Welding named after E.O. Paton of the National Academy of Sciences of Ukraine], 2012, P. 279-288. (Ukr.)

4. Shrayber A. A., Yatsenko V. P. Modeling of abrasive wear of convective heat exchanger surfaces of a boiler // [Problems of general energy engineering] 2008, V. 17, P. 37-40. (Rus.)

5. Das S.K., Godiwalla K.M., Mehrota S.P., Sastry K.K., Dey P.K. Analytical model for erosion behavior of impacted fly-ash particles in coal-fired boiler components // Sadhana. V. 31, part 5, October 2006, P. 583-595.

Получено 06.07.2017  
Recieved 06.07.2017