

М.О. Логвинюк, магістр  
Є.В. Новаківський, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-8682-5710  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ КОТЛА ШЛЯХОМ РОЗПОДІЛЕННЯ ТЕПЛООВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПО ВИСОТІ ТОПКИ

В статті розглянуто один з методів зменшення аварій екранних труб котельних агрегатів. Спосіб полягає в рівномірному розподіленні теплового навантаження в зоні активного горіння, шляхом заміни пальників з 1-2 ярусним розташуванням на 2-4 ярусне зі зменшенням одиничної потужності пальника. Дослідження виконані розрахунковим шляхом, з позонним розрахунком котла. Представлена математична розрахункова модель та графічне розбиття топки котла на зони горіння.

Результати дослідження показали що зростання кількості пальників та зменшення одиничної потужності останніх, призводить до більш рівномірного теплосприйняття по висоті екранних труб, зменшується пікове максимальне теплове навантаження з 100 % до 86,5% (590 кВт/м<sup>2</sup> до 510 кВт/м<sup>2</sup>). При збільшенні кількості пальників зростає теплове навантаження в нижній частині активної зони горіння, що призводить до більш інтенсивного кипіння, як наслідок зростання швидкості паро-рідинної суміші в екранних трубах та відповідно збільшується охолодження випарних труб в областях найбільшого теплового навантаження. Температура металу екранних труб в зонах максимального теплового навантаження знижується на 20-30 °С, що при тривалому терміні експлуатації призводить до зменшення температурного старіння, а відповідно подовження міжремонтного терміну експлуатації котла.

Недоліком такого методу є ускладнення та здорожчання виготовлення екранних труб, збільшення гідравлічного опору підйомних труб за рахунок збільшення кількості вигинів труб, ускладнюється система подачі палива та повітря. Результати розрахунків приведені в графічному вигляді, як залежності питомого теплового навантаження, температури зовнішньої стінки труби, допустимого теплового напруження, по висоті труби при одно-, дво- та чотирьох ярусному розташуванні пальників в зоні активного горіння.

**Ключові слова:** теплосприйняття, зона активного горіння, позонний розрахунок, екранні труби, температура стінки, термін експлуатації.

### Вступ

Одна з причин аварії котельних установок є руйнація екранних труб, що пов'язана з температурним старінням та перегріву металу екранних труб. Локальна температура екранних труб залежить від гідравлічного режиму та теплового навантаження на екрані труби та її геометричного розташування. Нерівномірність теплових навантажень топкових поверхонь може привести до порушення циркуляції і пов'язаним з ним перегоранням труб. [1,2,3]

Топка є одною з найважливіших складових котла, від якої значною мірою залежить його економічність і надійність експлуатації. Однак стаціонарні системи контролю температурного режиму екранних труб в даний час не знаходять широкого застосування через низьку надійність роботи датчиків контролю і трудомісткості їх заміни. І тільки на деяких станціях пройшли випробування системи технічної діагностики екранних поверхонь нагріву. [1,3,4]

В експериментальних роботах по оцінці теплового стану топки проводяться вимірювання променистих локальних теплових потоків, температур факела та температур екранів[4]. При цьому застосовуються різні методи вимірювань [4,5].

### Аналіз літератури

На сьогоднішній день, для генерації пари, використовується дуже велика кількість парових котлів. Однак компоновка топкових камер промислових та енергетичних котлів в межах 25-220 т/год в більшості однакова [1,3].

Топкові камери П та Н подібних компоновок котлів продуктивністю 25-75 т/год мають одноярусне розташування пальників при спалюванні твердого палива та двоярусне при використанні газомазутного палива. При зростанні паропроductивності котлів (110-220 т/год) пальники в топковій камері розташовують в два яруси на твердому паливі, що пов'язано з обмеженою одиничною потужністю пальників.

Основна причина аварій екранних труб котельних агрегатів є локальний перегрів в зонах максимального теплового навантаження та в зонах зі зміною геометрію топкових камер [6].

Експериментальне вимірювання є коштовним, та потребують зупинки котла, тому часто застосовують CFD методи моделювання теплових процесів в топці котла та температури екранних труб [7].

Один з варіантів зменшення локальних теплових навантажень є зменшення одиничної потужності зі збільшення кількості паликових пристроїв та рівномірне розподілення теплового навантаження по всьому топковому об'єму.

Для аналізу температурного режиму екранних труб виконується теплогідравлічний розрахунок котла [2,8,9]. Цей розрахунок визначає питоме теплове навантаження екранних труб та надійності циркуляції в екранах з найменшим теплосприйняттям. В той же час швидкість пароводяної суміші, залежить від паровмісту в даному перерізі труби, а відповідно і температура екранної труби.

#### Опис та вирішення проблеми

В даній роботі представлено аналіз теплосприйняття по висоті екранних труб при позонному тепловому розрахунку [9], при розташуванні паличників в один-, два- та чотири яруси.

Для побудови математичної моделі теплового навантаження та температурного режиму екранних труб були використані залежності [9]:

- Температура продуктів згорання на виході із зони максимального теплового навантаження:

$$g''_{\max} = \frac{100}{100 - q_4} \frac{Q_n^p \beta_{\text{зони}} + Q_{\text{пов}} - Q_6}{Vc''_{\max}} - \frac{\sigma_0 a_{\text{зони}} (T''_{\max})^4 (\psi F)}{B_p^{\text{зони}} Vc''_{\max}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

- Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні максимального теплового навантаження:

$$q_{\text{пр}}^{\max} = \sigma_0 a_{\text{зони}} \frac{[(g''_{\max})^4 - g_a^4]}{2} \psi_{\text{ср}}, \text{ кВт/м}^2 \quad (2)$$

- Температура згорання на виході із наступних зон:

$$g'' = \frac{\Delta\beta_{\text{сз}} Q_n^p}{Vc''} + \frac{c'}{c''} g' - [1 + (\frac{g''}{g'})^4] \frac{\sigma_0 a_{\text{зони}} (g')^4 [(\psi'' - \psi') F_{\text{ср}} + F_{\text{см}} \psi_{\text{ср}}]}{2B_p^{\text{зони}} Vc''}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

- Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в наступних зонах:

$$q_{\text{пр}} = \sigma_0 a_{\text{зони}} \frac{[(g')^4 - (g'')^4]}{2} \psi_{\text{ср}}, \text{ кВт/м}^2 \quad (4)$$

- Температура зовнішньої стінки екранних труб:

$$t_{\text{см}} = t_s + \Delta t + \beta \mu q_{\max} \left( \frac{\delta_{\text{см}}}{\lambda} \cdot \frac{2}{1 + \beta} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

На прикладі котлоагрегату Е-58-18-280 було запропоновано замінити стандартні паличники, що розташовані в два яруси для газомазутного палива або в один ярус для твердого, на пристрої меншої потужності але зі збільшенням їх кількості та розташувати по кутах топки в чотири яруси. Таке рішення дозволяє розтягнути зону активного горіння по висоті топки, що в свою чергу призведе до рівномірного розподілення теплового навантаження на екранні труби по висоті топки, зокрема в зоні активного горіння. На рисунку 1 представлено розбиття топки на зони горіння. Розподіл топки на чотири зони горіння та зону активного горіння виконано по рекомендаціям літератури [9].

При будь-якій компоновці паликових пристроїв вони розташовуються в зоні активного горіння (зона АГ). При одноярусному розташуванні паличників зона активного горіння має висоту 3.2м для визначеного котла (рисунк 1), при двоярусному розташуванні зона активного горіння має висоту 3,66м, а при чотириярусному 4,4м., що обумовлено міжпаличковими відстанями. На рисунку 2 зображено питоме теплове навантаження при одно-, дво- та чотириярусному розташуванні паличників. З графіку теплового навантаження екранних труб топкової камери (рисунк 2) видно, що зменшення одиничної потужності паличників та збільшення їх кількості (ярусів) призводить до зменшення питомого теплового навантаження. Так при одноярусному розташуванні максимальне питоме теплове навантаження складає 590 кВт/м<sup>2</sup>, при двоярусному 560 кВт/м<sup>2</sup>, та при чотириярусному 510кВт/м<sup>2</sup>. Завдяки збільшення кількості рядів паличників нижній ярус паличників розташовується нижче, що призводить до збільшення теплового навантаження на

нижніх відмітках топки. Відповідно збільшення кількості пальників призводить до зменшення нерівномірності теплосприйняття випарних труб.

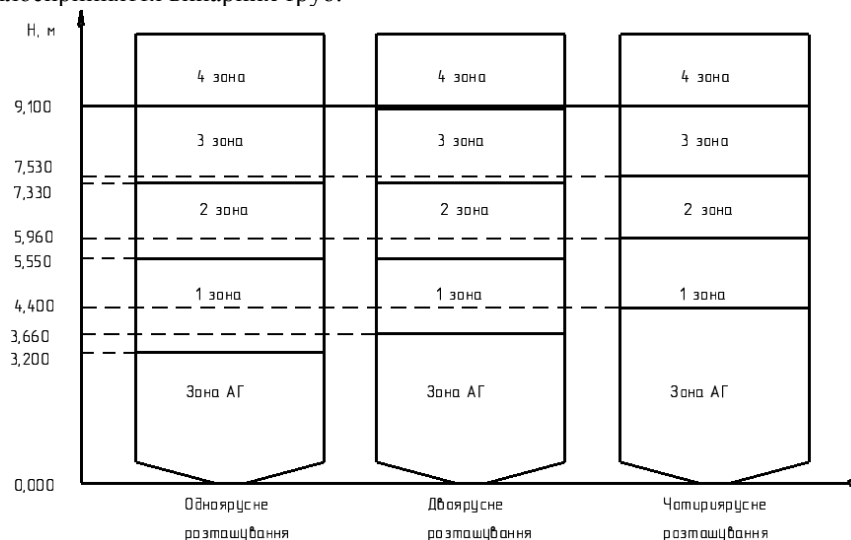


Рисунок 1 – Розбиття топки на зони горіння

Так при застосуванні чотириярусного розташування пальників теплосприйняття зони активного горіння та першої зони змінюється в межах 35% в порівнянні з іншими компоновками пальникових пристроїв. Так теплове навантаження нижньої ділянки зони активного горіння зростає на 35%. Зникають явно виділені зони максимального теплового навантаження, які в межах зон активного горіння та зони 1 мають відхилення більш ніж на 100% (для одно- та двоярусного розташування). Порівнюючи одно- та двоярусне розташування пальників (рисунок 2) можна зробити висновки, що при збільшенні кількості пальників зона максимального теплового навантаження збільшується по висоті при зменшенні абсолютного значення. Значення та характер розподілу теплового напруження, що отриманні в результаті розрахунку та представлено на рисунку 2 для одно та двоярусного розташування пальників співпадає з результатами експериментальних робіт [4] та CDF моделювання [7].

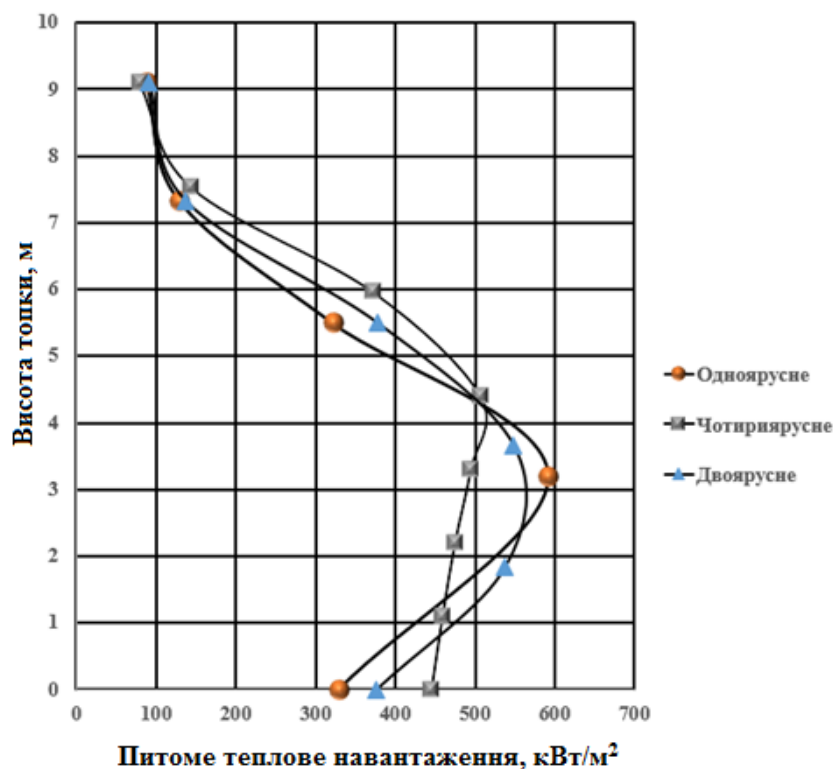


Рисунок 2 – Питоме теплове навантаження при одно-, дво- та чотириярусному розташуванні пальників

На рисунку 3 показано зміну зовнішньої температури стінки екраних труб. З застосуванням кількярусного розташування пальників більш рівномірно розподіляється теплове навантаження екраних труб, а відповідно вирівнюється зовнішня температура стінки екраних труб по висоті в зоні активного горіння. Згідно рисунку 3 максимальна локальна температура стінки труби знижується з 422 С при одноярусному розташуванні до 407 С та 367 С при двоярусному та чотириярусному розташуванні пальників відповідно.

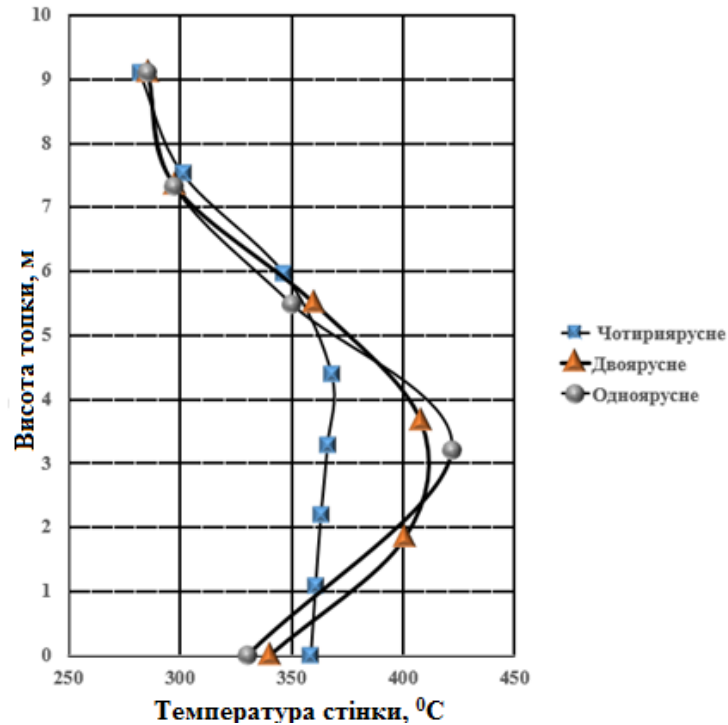
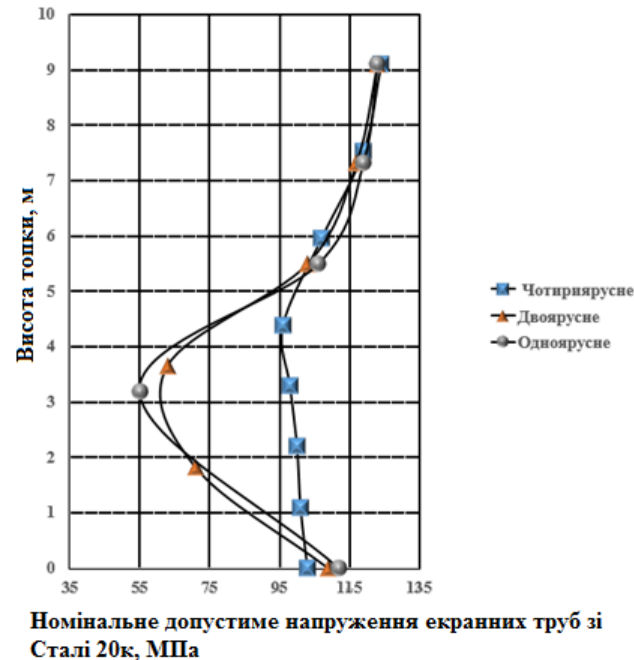


Рисунок 3 – Зміна зовнішньої температури стінки екраних труб

Термін експлуатації металу екраних труб напряму залежить від максимальної температури стінки в зонах найбільшого теплового навантаження впродовж тривалої експлуатації. На рисунку 4 зображено допустиме теплове напруження по висоті топki котла в залежності від рядності розташування пальників. Цей графік обернено пропорційний температурі стінки металу та показує зони найбільших вразливостей труб. Згідно рисунку 4 можуть бути визначені зони контролю температур стінки металу та теплового навантаження.



Номінальне допустиме напруження екраних труб зі Сталі 20к, МПа

Рисунок 4 –Графік зміни номінального допустимого напруження Сталі 20к в залежності від температури по висоті топki

З рисунку 4 видно, що зі збільшенням ярусності пальників збільшується допустиме напруження, а відповідно подовжується термін експлуатації екранних труб котла. Особливо це виражено при чотириярусному розташуванні пальників. Оскільки руйнація екранної труби відбувається не по всій довжині, а локально в зонах перегріву.

В таблиці 1 наведено максимальне теплове навантаження, максимальна температура стінки екранної труби без урахування температурної розвірки та допустиме напруження металу, що відповідає даним температурам при терміні експлуатації  $10^5$  та  $3 \times 10^5$  годин [10]. Згідно даної таблиці можна зробити висновок, що при розподіленні теплового навантаження, а відповідно пониження температури зменшується вплив температурного старіння на метал труб, а відповідно збільшується надійність котельного агрегату.

Таблиця 1 – Максимальне теплове навантаження, максимальна температура та допустиме напруження без урахування температурної розвірки

Позначення	Одноярусне	Двоярусне	Чотириярусне
$q_{\max}$ , кВт/м <sup>2</sup>	590	560	510
$t_{\max}$ , °C	422	407	367
$\sigma$ , Мпа (при $t_{\text{експ}}=10^5$ годин)	78	87	96
$\sigma$ , Мпа (при $t_{\text{експ}}=3 \times 10^5$ годин)	55	63	96

### Висновки

З аналізу проведених розрахунків можна зробити наступні висновки:

1. Зростання кількості пальників зі зменшенням одиничної потужності призводить до більш рівномірного теплосприйняття по висоті на екранні труби.
2. При збільшенні кількості пальників збільшується середнє теплове навантаження зони активного горіння що призводить до збільшення паровмісту в нижній частині зони активного горіння та відповідно зростання швидкості паро рідинної суміші в екранних трубах та відповідно до збільшення інтенсивного охолодження випарних труб в областях найбільшого теплового навантаження.
3. Збільшення кількості пальників призводить до зменшення максимального теплового навантаження відповідно в цих зонах зменшується температура стінки металу на 20-30°C, що при тривалому терміні експлуатації призводить до зменшення температурного старіння а відповідно подовження міжремонтного терміну експлуатації котла.
4. При розташуванні пальників в чотири ряди зменшується пікове максимальне теплове навантаження з 100 % до 86,5% (590 кВт/м<sup>2</sup> до 510 кВт/м<sup>2</sup>).

### Список використаної літератури

1. Мейкляр М.В. Современные котельные агрегаты ТКЗ 3 изд. / М.В. Мейкляр. – Москва, Энергия, 1978. – 223 с.
2. Локшин В.А. Гидравлический расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / В.А. Локшин, Д.Ф. Петерсон, А.Л. Шварц. – Москва, Энергия, 1978. – 256 с.
3. Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators Design, Applications, and Calculations By V. Ganarathy, ABCO Industries Abilene, Texas, U.S.A.2003
4. Холщев В. В., Сравнительный анализ двух экспериментов, проведенных в разные годы на мазутных котлах/ Электрические станции, 2001, 3, с12-14
5. Weglowski, B, Taler, J, and Duda, P. Monitoring of thermal stresses in steam generators. Czech Republic: N. p., 2003. Web.
6. <http://algoritmist.ru/korroziya-i-korrozionnye-povrezhdeniya/xarakter-povrezhdeniya-ehkrannyx-trub-gazomazutnyx-kotlov.html>
7. [Three-Dimensional Thermal Stress Distribution of Opposed Firing Boiler: Numerical Study and Experimental Verification](#) Yunjin Ao; Na Li; and Qulan Zhou. 2019
8. Лебедев И.К. Гидродинамика паровых котлов / И.К. Лебедев. – Москва, Энергоатомиздат, 1987. – 240 с.
9. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) 2 изд. / [Н.В. Кузнецов, В.В. Митор, И.Е. Дубовский и другие]. – Москва, Энергия, 1973. – 296 с.
10. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды РД 10-249-98 / [В.С. Котельников, Ю.К. Петреня, Н.А. Махутов и другие]. – Москва, 1998. – 210 с.

M. Lohvyniuk, Msc  
Y. Novakivskiy, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-8682-5710  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## INCREASING OF REABILITY OF WORK OF BOILERS BY EQUAL DISTRIBUTION OF THE HEAT LOAD OVER THE HEIGHT OF FIREBOX

Detection of one of the methods for reducing the emergency screens of boiler units pipes is in the process of being discovered. Specially used in the even distribution of heat load in the active combustion zone, replacing the burners with 1-2 tier arrangement by 2-4 tier, reducing the single power of the finger. Investigation of the supported solution, with the posture of the boiler. The mathematical calculation model and graphical division of the boiler furnace into combustion zones are presented. The results of the research showed that a large number of burners and a decrease in the unit power of the population, which reaches a greater uniform thermal voltage, are detected by the height of the shielded pipe, reducing peak maximum consumption from 100% to 86.5% (590 kW / m<sup>2</sup> to 510 kW / m<sup>2</sup>) As the number of burners increases, the thermal load in the lower part of the combustion zone increases, which results in more intense boiling, as a consequence of the increase in the velocity of the vapor-liquid mixture in the screen tubes and, accordingly, the cooling of the evaporator tubes in the regions of the highest heat load. The temperature of the screen metal in the zones of maximum heat load of the pipes is reduced by 20-30 °C, which, with a long service life, leads to a decrease in temperature aging, and consequently an extension of the inter-repair life of the boiler. The disadvantage of this method is the complication and complication of the manufacture of screen pipes, increase the hydraulic resistance of the lifting pipes by increasing the number of bends of pipes, complicates the system of supply of fuel and air. The results of the calculations are presented in graphical form, as the dependence of the specific heat load, the temperature of the outer wall of the pipe, the allowable thermal stress, the height of the pipe at one-, two- and four-tier arrangement of burners in the zone of active combustion.

**Key words:** heat perception, active combustion zone, posture calculation, screen tubes, wall temperature, service life.

### References

1. Meikler M.V. Modern boiler units TKZ 3 pub. / M.V. Meker. – Moscow, Energy, 1978. – 223 p.
2. Lokshin V.A. Hydraulic calculation of boiler units (normative method) / V.A. Lokshin, D.F. Peterson, A.L. Schwartz. – Moscow, Energy, 1978. – 256 p.
3. Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators Design, Applications, and Calculations By V. Ganapathy, ABCO Industries Abilene, Texas, U.S.A.2003
4. Holshchev VV, Comparative analysis of two experimental oil-fired boilers tested in different years / Power Plants, 2001, 3, p12-14
5. Weglowski, B, Taler, J, and Duda, P. Monitoring of thermal stresses in steam generators. Czech Republic: N. p., 2003. Web.
6. <http://algoritmist.ru/korrozija-i-korrozionnye-povrezhdenija/xarakter-povrezhdenija-ehkrannyx-trub-gazomazutnyx-kotlov.html>
7. [Three-Dimensional Thermal Stress Distribution of Opposed Firing Boiler: Numerical Study and Experimental Verification](#) Yunjin Ao; Na Li; and Qulan Zhou. 2019
8. Lebedev I.K. Hydrodynamics of steam boilers / I.K. Lebedev. – Moscow, Energiyatompublisher, 1987. – 240 p.
9. Thermal calculation of boiler installations (regulatory method). 2 pub. / [N.V. Kuznetsov, V.V. Mitor, I.E. Dubovskiy and others]. – Moscow, Energy, 1973. – 296 p.
10. Standards for calculating the strength of stationary boilers and pipelines of steam and hot water GD 10-249-98 / [V.S. Kotelnikov, Y.K. Petrenia, N.A. Makhutov and others]. – Moscow, 1998. – 210 p.

Надійшла 15.10.2019  
Received 15.10.2019