

В. Л. КАВЕРЦЕВ, В. О. ДЯГІЛЄВ**ПОБУДУВАННЯ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ВОДО-ВОДЯНОГО ТЕПЛООБМІННИКА У СКЛАДІ МУЛЬТИПАЛИВНОГО КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ**

Метою даної статті є створення напряму для розробки комплексної програми розрахунку мультитопливних котельних агрегатів. У статті пропонується розрахунок водо-водяного теплообмінника який входить до складу мультитопливного котла. Представлений варіант логічної блок-схеми даного розрахунку можна буде використовувати для розробки варіантів конструкцій мультитопливних котельних агрегатів за допомогою програмних комплексів в комп'ютерному середовищі.

Ключові слова: енергетика, котельний агрегат, розрахунок, математична модель, теплообмінник.

В. Л. КАВЕРЦЕВ, В. А. ДЯГИЛЕВ**ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ВОДО-ВОДЯНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА В СОСТАВЕ МУЛЬТИТОПЛИВНОГО КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА**

Целью данной статьи является создание направления к разработке комплексной программы расчета мультитопливных котельных агрегатов. В статье предлагается расчет водо-водяного теплообменника который входит в состав мультитопливного котла. Представленный вариант логической блок-схемы данного расчета можно будет использовать для разработки вариантов конструкций мультитопливных котельных агрегатов с помощью программных комплексов в компьютерной среде.

Ключевые слова: энергетика, котельный агрегат, расчет, математическая модель, теплообменник.

V. KAVERTSEV, V. DYAHILIEV**MODEL CONSTRUCTION TO DESIGN THE WATER-WATER HEAT EXCHANGER AS AN INTEGRAL PART OF THE MULTIFUEL BOILER UNIT**

It was shown that an efficient use of fuel and energy resources provides a regular power supply for the State. The metallurgy industry is the main sector of industry for which the irrational use of fuel is an urgent problem. Serial boiler units that are used by metallurgy companies were designed for the natural gas and black oil burning only and as a result these fail to meet current requirements. Now, we design new multifuel boiler units that can operate using two and even more types of fuel and we also upgrade and reconstruct already available boiler units of this type. We suggest the solutions for complicated engineering problems in the form of different computations done to define optimal characteristics for the boiler equipment. This scientific paper delves into the design of the water-water heat exchanger that forms an integral part of the multifuel boiler unit. This heat exchanger can also be used for the reconstruction of already available boilers. The developed logic block diagram is intended for the computations done to design the water-water heat exchanger and it will be used by the software package for the computation of the separation in the multifuel boiler unit to simplify computations. It was noted in the conclusions that the model algorithm and logframe would enable the computation of an ample amount of the elements and circuitry for the multifuel boiler equipped with the water-water heat exchanger.

Key words: power engineering, boiler unit, computation, mathematical model and the heat exchanger.

Вступ

Розвиток промисловості країни в значній мірі визначається безперебійним і достатнім енергопостачанням промисловості, транспорту, сільського господарства й побуту.

В енергетиці України основну роль відіграють потужні теплові електростанції. Однак не можна забувати й про промислові котельні. Потрібно враховувати, що більшість із них були побудовані в 50–60 роки, їхнє обладнання вкрай зношене й у ряді випадків не підлягає ремонту. Одним з найбільш діючих засобів підвищення ефективності витрати палива є перехід до комплексних енерготехнологічних методів використання палива, а також використання вторинних енергоресурсів.

Збереження досягнутого потенціалу й забезпечення перспективного розвитку вимагає істотного технічного відновлення галузі. Поряд із цим необхідно здійснювати маловитратні заходи, які швидко окупаються, і перспективні проекти, на базі яких у майбутньому буде реалізовуватися ши-

рокомасштабна реабілітація й заміна застарілого обладнання.

Мета роботи

Метою даної статті є створення напряму для розробки комплексної програми розрахунку мультитопливних котельних агрегатів. У статті пропонується розрахунок водо-водяного теплообмінника який входить до складу мультитопливного котла. Представлений варіант логічної блок-схеми даного розрахунку можна буде використовувати для розробки варіантів конструкцій мультитопливних котельних агрегатів за допомогою програмних комплексів в комп'ютерному середовищі. Розроблені рішення можуть бути застосовані при розробці перспективних конструкцій мультитопливних котельних агрегатів, здатних працювати в широкому діапазоні експлуатаційних навантажень.

Викладення основного матеріалу

В Україні знаходиться в експлуатації немала кількість котельних агрегатів, що працюють на природному газі і в той же час знаходяться на території коксохімічних або металургійних підприємств, де досить багато виробляється коксового або доменного газів, якого в достатній кількості, щоб використовувати в якості палива. Мова йдеться про серійні газомазутні котельні агрегати, які спочатку були розраховані на спалювання тільки цих двох видів палива. Тому доцільним є використання коксових, доменних, та інших газів, які виробляються підприємствами, в якості палива для котельних агрегатів, встановлених на місцевих ТЕЦ. Однак, перехід на більш широкий спектр використання палив в котлі можливо здійснити в рамках реконструкції підприємства, або окремої котельні [1].

Відомо, що для цього розроблюються техніко-економічні обґрунтування, результати яких дають відповідь про доцільність проведення, наприклад, реконструкції котельного агрегату. Тут враховується велика кількість основних показників. До них відносяться витрати на паливо, витрати на експлуатацію, вартість робіт і т.п. Крім того, якщо мова йде про спалювання декількох палив, або їх суміші, необхідно визначити найбільш економічний режим роботи. З урахуванням цього визначається термін окупності проекту.

В даний час розроблено досить багато версій моделей і програм теплових розрахунків котлів різних типорозмірів [2–5]. Ці моделі і програми мають різне функціональне призначення: деякі з них призначені для проведення конструктивних розрахунків, інші – для виконання перевірочних або оптимізаційних, діагностичних розрахунків і досліджень.

У попередній нашій статті наведено варіант алгоритму і логіко-структурної схеми моделі теплогідрравлічного розрахунку котла, яка враховує все різноманіття елементів і схемних рішень, що застосовуються для мультіпаливних котельних установок, а також побудована блок-схема програми розрахунку системи сепарації мультіпаливного котельного агрегату [6]. У даній статті ми пропонуємо подальший розрахунок (рис. 1).

Коксовий газ є основним видом палива коксохімічних заводів і являє собою вторинний продукт коксування вугілля. Вихід газу відповідає 15–20 % по масі або 300–350 м³/год при одержуванні коксу. Коксовий газ містить відносно невелику кількість баласту, зміст азоту й вуглекислоти становить 8–15 %.

Теплота згоряння коксового газу $Q_{\text{н.г.}} = 4000\text{--}4400$ ккал/м³. Коксовий газ є цінним паливом для тепловикористовуючих установок. Проте широке використання коксового газу в котельнях і ТЭЦ

ускладнюється інтенсивною низькотемпературною корозією хвостових поверхонь нагріву (водяного економайзера й повітропідігрівників) і забиванням відкладеннями їх міжтрубного простору.

Відомо, що при спалюванні коксового газу утворюється сірчаний ангідрид SO₂. Значна частина SO₂ окислюється до сірчастого ангідриду SO₃. Це відбувається, в основному, у топці при високих температурах і частково на покритих окисною плівкою трубах пароперегрівника. Для низькотемпературних поверхонь нагріву SO₂ і SO₃ у газоподібному стані небезпечні. Однак при з'єднанні SO₃ з водяними парами й конденсації при температурі стінки рівній температурі «точки роси» вони утворюють сірчисту й особливо небезпечну сірчану кислоту, які кородують труби поверхонь нагріву. Температура «точки роси» для продуктів згоряння визначається наявністю SO₃ і парціального тиском пари у димових газах і перебуває в межах 125–180 °С. Високе значення «точки роси» для коксового газу обумовлює необхідність застосування різних способів спалювання коксового газу, що дозволяє знизити корозійну активність димових газів.

Швидкість корозії металу залежить від матеріалу, температури стінки поверхні нагріву, змісту сірки в паливі, наявності вологи й умов спалювання палива.

Існуючі методи боротьби із сірчаноокислою корозією:

- збільшення температури стінки труб хвостових поверхонь нагріву до $t_{\text{ст}} > t_{\text{р}} + 15$, де $t_{\text{р}}$ – температура «точки роси» продуктів згоряння коксового газу. (Виконання цієї досягається підігрівом живильної води у водо-водяному теплообміннику);

- ступеневе спалювання коксового газу з малими коефіцієнтами надлишку повітря організація внутрішньої топкової рециркуляції димових газів;
- введення адитивів.

Температура «точки роси» для даного котла при спалювання коксового газу визначена за експериментальними даними і дорівнює 125 °С, що є вище температури живильної води ($t_{\text{п}} = 104$ °С), тому необхідне встановлення водо-водяного теплообмінника. Він являє собою кожухотрубчатий теплообмінник із плаваючою головою, двоходовий по гріючому й обігрівальному середовищі.

У кожухотрубчастому теплообміннику (рис. 2) одне з середовищ, що обмінюються теплом – I рухається усередині труб – в трубному просторі, а інше – II – в міжтрубному, омиваючи пучок труб зовні. При цьому середовище, що нагрівається, направляють знизу – вгору, а середовище, що віддає тепло, – в протилежному напрямі. Його застосування дозволить захистити водяний економайзер від сірчаноокислої корозії при спалюванні коксового газу.

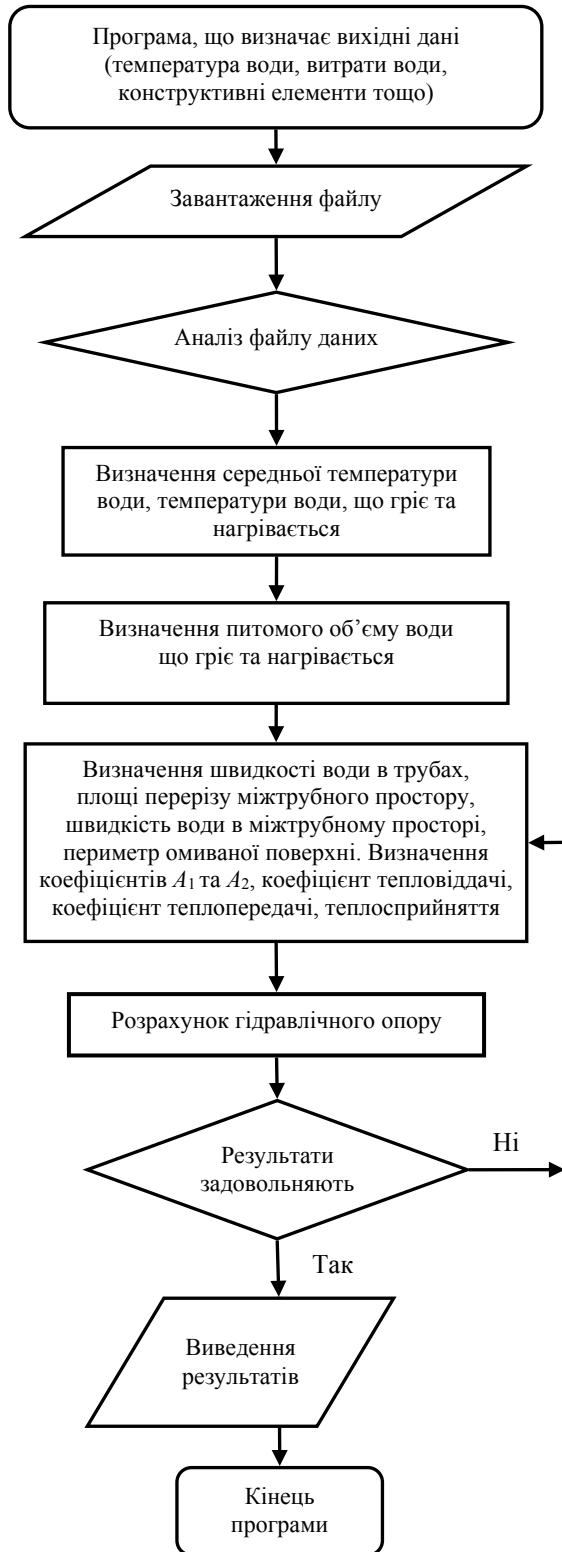


Рис. 1 – Логічна блок-схема розрахунку водо-водяного теплообмінника

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Значення
Витрата гріючої води та води, що нагрівається, G , кг/год.	78750
Збільшення ентальпії води в підігрівнику, Δi , ккал/кг	25
Температура води, що гріє: – на вході, t'_g , °C – на виході, t''_g , °C	224 204
Температура води що нагрівається: – на вході, t'_n , °C – на виході, t''_n , °C	104 129
Конструктивні характеристики: – діаметр кожуха, мм – діаметр трубок, мм – кількість трубок, n , шт. – діаметр патрубків, що підводить, мм	325×15 20×2 85 108×6

Середня температура води, що гріє

$$t_{гр} = \frac{t'_g + t''_g}{2}, \quad (1)$$

$$t_{гр} = \frac{204 + 224}{2} = 214 \text{ °C.}$$

Середня температура води що нагрівається

$$t_n = \frac{t'_n + t''_n}{2}, \quad (2)$$

$$t_n = \frac{104 + 129}{2} = 116,5 \text{ °C.}$$

Більша різниця температур

$$\Delta t_{\delta} = t''_g - t'_n, \quad (3)$$

$$\Delta t_{\delta} = 204 - 104 = 100 \text{ °C.}$$

Менша різниця температур

$$\Delta t_m = t'_g - t''_n, \quad (4)$$

$$\Delta t_m = 224 - 129 = 95 \text{ °C.}$$

Площа живого перетину трубок

$$f_{тр} = 0,785 d^2 n, \quad (5)$$

$$f_{тр} = 0,785 \cdot 0,016^2 \cdot 85 = 0,0171 \text{ м}^2.$$

Середній питомий об'єм води, що гріє

$$v_{гр} = 0,00106 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Середній питомий об'єм води, що нагрівається

$$v_n = 0,00106 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Швидкість води в трубах

$$\omega_{гр} = \frac{G v_n}{3600 f_{тр}}, \quad (6)$$

$$\omega_{гр} = \frac{78750 \cdot 0,00106}{3600 \cdot 0,0171} = 1,36 \text{ м/с.}$$

Площа перерізу міжтрубного простору

$$f_m = 0,785 (D^2 - d_{нар}^2) n, \quad (7)$$

$$f_m = 0,785 \cdot (0,295^2 - 0,02^2 \cdot 85) = 0,0416 \text{ м}^2.$$

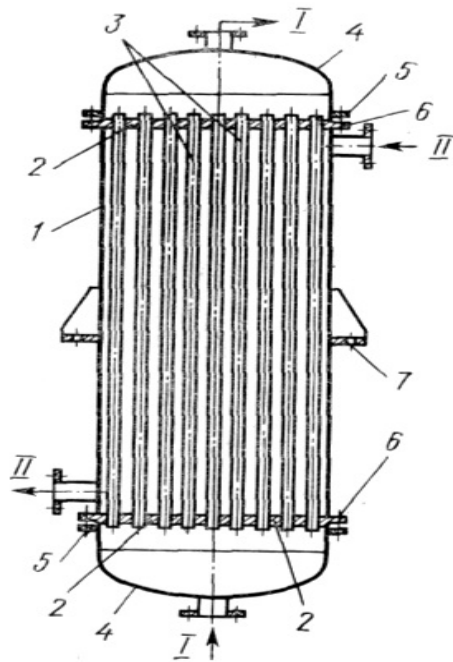


Рис. 2 – Водо-водяний теплообмінник:
 1 – корпус теплообмінника; 2 – трубні решітки;
 3 – трубні пучки; 4 – днище; 5 – фланці; 6 – болти;
 7 – лапки для кріплення; I – вхід та вихід води, що нагрівається; II – вхід та вихід води, що гріє

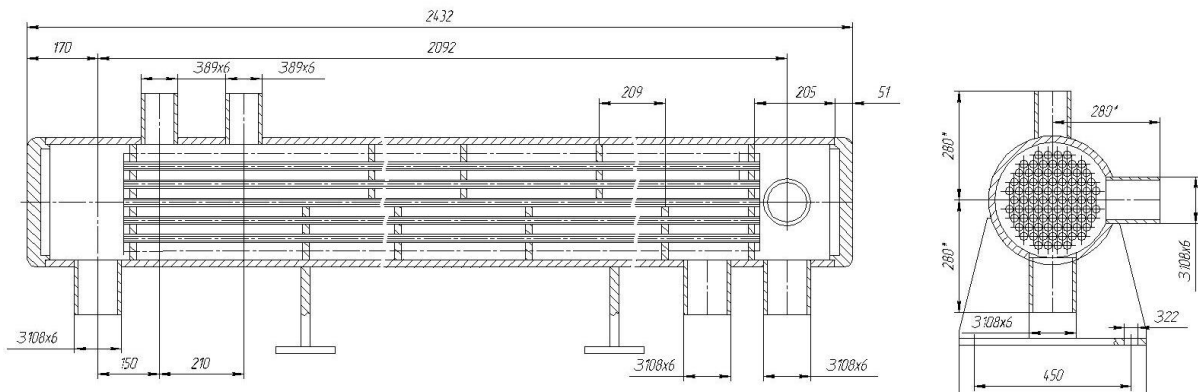


Рис. 3 – Кресленник водо-водяного теплообмінника

Швидкість води в міжтрубному просторі (з урахуванням перегородок)

$$\omega_M = \frac{G_{v_{гр}}}{3600 F_M}, \quad (11)$$

$$\omega_M = \frac{78750 \cdot 0,0012}{3600 \cdot 0,022} = 1,06 \text{ м/с.}$$

Периметр омиваної поверхні

$$U = \pi(D_K + nd), \quad (12)$$

$$U = 3,14(0,299 + 85 \cdot 0,02) = 6,27 \text{ м.}$$

Еквівалентний діаметр міжтрубного простору в перетині перегородки

Швидкість води, що гріє

$$\omega_M = \frac{G_{v_{гр}}}{3600 f_M}, \quad (8)$$

$$\omega_M = \frac{78750 \cdot 0,0012}{3600 \cdot 0,0416} = 0,63 \text{ м/с.}$$

Для збільшення швидкості теплоносія встановлюємо поперечні сегментні перегородки в трубному просторі й тим самим збільшуємо коефіцієнт тепловіддачі з боку води, що гріє [6].

Усереднена поверхня по кресленнику (рис. 3), м:

- по 1-му ряду $H_1 = 0,382$;
- по 2-му ряду $H_2 = 0,185$;
- по 3-му ряду $H_3 = 0,184$;
- по 4-му ряду $H_4 = 0,971$;
- по 5-му ряду $H_5 = 1,208$.

Кількість рядів $Z = 11$ шт.

Сумарна поверхня

$$H_s = \pi L n d, \quad (9)$$

$$H_s = 3,14 \cdot 0,167 \cdot 85 \cdot 0,02 = 0,892 \text{ м}^2.$$

Усереднений перетин для проходу води що гріється

$$F_M = \frac{L H_s}{2(H_1 + H_2 + H_3 + H_5) + 3H_4}, \quad (10)$$

$$F_M = \frac{0,167 \cdot 0,892}{2 \cdot 1,959 + 3 \cdot 0,971} = 0,022 \text{ м}^2.$$

$$d_E = \frac{4 f_M}{U}, \quad (13)$$

$$d_{\lambda} = \frac{4 \cdot 0,0416}{6,27} = 0,027 \text{ м.}$$

Коефіцієнт A_1

$$A_1 = 1400 + 18 \bar{t}_{гр} - 0,035 \bar{t}_{гр}^2, \quad (14)$$

$$A_1 = 1400 + 18 \cdot 214 - 0,035 \cdot 214^2 = 3649.$$

Коефіцієнт A_2

$$A_2 = 1400 + 18 \bar{t}_H - 0,035 \bar{t}_H^2. \quad (15)$$

За використанням запропонованої структури були виконані тестові розрахунки, для котельного агрегату у склад якого входить водо-водяного теп-

лообмінника. Фрагмент результатів розрахунку наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку

Параметр	Значення
Коефіцієнт теплопередачі, ккал/(м ² ·год·°С)	2441
Теплосприйняття, Гкал/год	1,97 10 ⁶
Поверхня ВВП, м ²	8,3
Довжина трубок, м	1,72
Кількість секцій, <i>n</i>	12

Висновки

У даній статті наведено один з декількох варіантів напрямку побудовання моделі розрахунку водо-водяний теплообмінник, який встановлюється для захисту поверхонь нагріву, зниження концентрації NO_x і SO₂ у димових газах, забезпечення надійної й економічної роботи котла. Для захисту водяного економайзера який входить до складу мультипаливного котельного агрегату, який може працювати в складі ТЕС металургійного підприємства з урахуванням конструкції.

За результатами тестових розрахунків, можна зробити попередній висновок, проте що розроблений, та на ведений у даній статті варіант алгоритму і логіко-структурної схеми розрахунку може дозволити отримати більш оптимальні показники конструктивних і схемних рішень, що застосовуються для мультипаливних котельних установок в умовах їх сучасного проектування та виготовлення. Крім того, на підставі отриманих попередніх результатів тестових розрахунків, можна вже говорити про перспективу створення комплексної програми розрахунку, яка охоплювала й елементи і вузли мультипаливного котельного агрегату. Це в решті допоможе змоделювати оптимальну конструкцію мультипаливного котла, здатного працювати на різних видах палива, в різних експлуатаційних режимах. Однак, це потребує внесення низки додатків та доопрацювань, що є темою подальших наукових досліджень в даному актуальному напрямі.

Список літератури

1. Каверцев В. Л., Дягілев В. О. Обзор проблем эффективного использования топливно-энергетических ресурсов в промышленном секторе Украины та можливі оптимальні шляхи їх вирішення. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 10(1232). С. 92–96. Бібліогр.: 4 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.13.
2. Левин М. М., Волковицкая П. И., Лаптин Ю. П. Система КРОКУС – автоматизированное проектирование, комплексные расчеты, оптимизация котельных установок. *Энергетика и Электрификация*. Киев, 2001. № 7. С. 45–48.
3. Бернадзеvский В. С. Математические модели – основа систем автоматизированного проектирования паровых котлов. *Теплоэнергетика*. Москва, 1997. № 9. С. 20–23.
4. Ефимов А. В., Меньшикова Е. Д., Аль-Тувайни Адель. Разработка имитационной модели котельной установки для автоматизированной системы управления и диагностики энергоблоков электростанций. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2001. № 7. С. 72–78.
5. Бернадзеvский В. С., Оскорбин Н. М. Основные положения теплового расчета паровых котлов на ЭВМ. *Теплоэнергетика*. Москва, 2002. № 8. С. 48–59.
6. *Тепловой расчет котельных агрегатов : нормативный метод*. Москва: Энергия, 1973. 296 с.

References (transliterated)

1. Kavertsev V. and Dyaghilev V. (2017), "Reviewing an Efficiency of the Use of Fuel and Power Resources for the Industry of Ukraine", Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment, no. 10(1232), pp. 92–96, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.13.
2. Levin M. M., Volkovitskaya P. I. and Laptin Y. P. (2001), "Sistema KROKUS – avtomatizirovannoe proektirovanie, kompleksnye raschety, optimizacija kotel'nyh ustanovok [CROCUS system – automated design, complex calculations, optimization of boiler plants]", *Energitika i Elektrofikatsiya*, vol. 7, pp. 45–48, Kiev.
3. Bernadzhevskiy V. S. (1997), "Matematycheskiye modely – osnova system avtomatizirovannogo proektirovaniya parovykh kotlov [Mathematical models are the basis of the systems for the automated design of feather boilers]", *Teploenergetika*, vol. 9, pp. 20–23, Moscow.
4. Efimov A. V., Menshikova E. D. and Al-Tuvayni Adel. (2001), "Razrabotka imitacionnoj modeli kotel'noj ustanovki dlja avtomatizirovannoj sistemy upravlenija i diagnostiki jenergoblokov jelektrostancij [Development of a simulation model of a boiler plant for an automated control and diagnostic system for power units of power plants]", *Visnik NTU "KhPI"*, vol. 7. pp. 72–78, Kharkiv.
5. Bernadzhevskiy V. S. and Oskorbin N. M. (2002), "Osnovnye polozhenija teplovogo rascheta parovykh kotlov na EVM [The main provisions of the thermal calculation of steam boilers on a computer]", *Teploenergetika*, vol. 8, pp. 48–50, Moscow.
6. Kuznetsov N. V. and Mitor V. V. (1973), *Teplovoj raschet kotel'nyh agregatov : normativnyj metod* [Thermal calculation of boiler units. Normative method], Energiya, Moscow.

Надійшла (received) 20.05.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Каверцев Валерій Леонідович (Каверцев Валерий Леонидович, Kavertsev Valerii) – кандидат технічних наук, доцент кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; email: kaverseff@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9472-1658>.

Дягілев Вадим Олександрович (Дягилев Вадим Александрович, Dyahiliev Vadym) – аспірант, кафедри парогенераторобудування, технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: dyaga.v@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6823-7221>.