УДК 697.7:303.442:536.423.4

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТРУБЧАСТОГО ГАЗОВОГО НАГРІВАЧА У КОНДЕНСАЦІЙНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ

БЕРЕЗЮК Г. Г. [1*], *ст. викл.,*
ТКАЧОВА В. В. [2], *к. т. н, доц.,*
СОЛОД Л. В. [3], *к. т. н, доц.*

[1*] Кафедра системного аналізу та моделювання у теплогазопостачанні, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-06, e-mail: aberezuik@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4790-3421
[2] Кафедра системного аналізу та моделювання у теплогазопостачанні, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. (0562) 46-98-06, e-mail: leratkacheva@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852
3 Кафедра системного аналізу та моделювання у теплогазопостачанні, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. (0562) 46-98-06, e-mail: solody@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-4789-9514

Анотація. ***Мета.*** Використання в конструкції трубчастого газового нагрівача режиму конденсації водяної пари з газоповітряної суміші дає можливість підвищити ефективність використання газового палива. Для розширення діапазону використання трубчастих газових нагрівачів за рахунок їх роботи у конденсаційному режимі необхідно провести ряд теоретичних та експериментальних досліджень. Метою статті є розробка методики експериментального дослідження трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі роботи для виявлення ефективності роботи нагрівача, визначення кількісних характеристик процесу конденсації водяної пари з газоповітряної суміші. ***Методика.*** Для дослідження роботи трубчастого нагрівача у конденсаційному режимі пропонується експериментальна установка, яка складається з газопальникового пристрою, трубчастого лінійного нагрівача, блоку подачі водяної пари, повітряного охолоджувального блоку, дослідної ділянки, вентилятору, який обладнаний газоповітряним ежектором, кондесатозбірника, який з'єднується з лінійним обігрівачем за допомогою дренажної трубки перед витяжним вентилятором. В ході експериментальних досліджень вимірюються параметри: витрата газоповітряної суміші, кількість пари, що подається, тиск парогазової суміші, температура парогазової суміші на вході дослідної ділянки, температура газоповітряної суміші на виході дослідної ділянки, лінійні розміри дослідної ділянки, кількість конденсату, температура конденсату. За результатами вимірювання визначаються об'ємна густина розподілення в об'ємі джерел фазового переходу та кількість теплоти, що виділяється у процесі конденсації пари з газоповітряної суміші. ***Результати.*** Розроблена методика експериментального дослідження трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі роботи дає змогу визначити кількісні характеристики процесу конденсації водяної пари з газоповітряної суміші, а само кількість додаткової теплоти, що можливо отримати при конденсації водяної пари. ***Наукова новизна.*** Розроблена методика експериментальних досліджень трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі роботи. ***Практична значимість.*** Наведена методика дозволяє експериментально визначити кількісні характеристики процесу конденсації водяної пари з газоповітряної суміші у нагрівачі та обґрунтувати доцільність конденсаційного режиму роботи.

Ключові слова: трубчасті газові нагрівачі; методика, експериментальні дослідження; конденсація водяної пари

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРУБЧАТОГО ГАЗОВОГО НАГРЕВАТЕЛЯ В КОНДЕНСАЦИОННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

БЕРЕЗЮК А. Г. [1*], *ст. преп.,*
ТКАЧЕВА В. В. [2], *к. т. н, доц.,*
СОЛОД Л. В. [3], *к. т. н, доц.*

[1*] Кафедра системного анализа и моделирования в теплогазоснабжении, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-06, e-mail: aberezuik@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4790-3421
[2] Кафедра системного анализа и моделирования в теплогазоснабжении, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. (0562) 46-98-06, e-mail: leratkacheva@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852
3 Кафедра системного анализа и моделирования в теплогазоснабжении, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. (0562) 46-98-06, e-mail: solody@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-4789-9514

Аннотация. ***Цель.*** Использование в конструкции трубчатого газового нагревателя режима конденсации водяных паров из газовоздушной смеси позволяет повысить эффективность использования газового топлива. Для расширения диапазона использования трубчатых газовых нагревателей за счет их работы в конденсационном режиме необходимо провести ряд теоретических и экспериментальных исследований. Целью статьи является разработка методики экспериментального исследования трубчатого газового нагревателя в конденсационном режиме работы для выявления эффективности работы, определения количественных характеристик процесса конденсации водяного пара из газовоздушной смеси. ***Методика.*** Для исследования работы трубчатого нагревателя в конденсационном режиме предлагается экспериментальная установка, которая состоит из газогорелочного устройства, трубчатого линейного нагревателя, блока подачи водяного пара, воздушного охлаждающего блока, опытного участка, вентилятора, который оборудован газовоздушным эжектором, кондесатосборника, который соединяется с линейным обогревателем с помощью дренажной трубки перед вытяжным вентилятором. В ходе экспериментальных исследований измеряются: расход газовоздушной смеси, количество подаваемого пара, давление парогазовой смеси, температура парогазовой смеси на входе опытного участка, температура газовоздушной смеси на выходе опытного участка, линейные размеры опытного участка, количество конденсата, температура конденсата. По результатам измерения определяются объемная плотность распределения в объеме источников фазового перехода и количество теплоты, выделяющейся в процессе конденсации пара из газовоздушной смеси. ***Результаты.*** Разработанная методика экспериментального исследования трубчатого газового нагревателя в конденсационном режиме работы позволяет определить количественные характеристики процесса конденсации водяного пара из газовоздушной смеси, а именно количество дополнительной теплоты, выделяемое при конденсации водяного пара. ***Научная новизна.*** Впервые разработана методика экспериментальных исследований трубчатого газового нагревателя в конденсационном режиме работы. ***Практическая значимость.*** Приведенная методика позволяет экспериментально определить количественные характеристики процесса конденсации водяного пара из газовоздушной смеси в нагревателе и обосновать целесообразность конденсационного режима работы.

Ключевые слова: трубчатые газовые нагреватели; методика; экспериментальные исследования; конденсация водяного пара

METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF TUBULAR GAS HEATER IN THE CONDENSING MODE

BEREZIUK A. G.[1*], *Sen. Inst.*
TKACHOVA V. V.[2], *Cand. Sc. (Tech.), Ass. prof,*
SOLOD L. V.[3], *Cand. Sc. (Tech.), Ass. prof.*

[1*] Department of systems analysis and modeling heat and gas supply, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, +38 (0562) 46-98-06, e-mail: aberezuik@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4790-3421
[2] Department of systems analysis and modeling heat and gas supply, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. (0562) 47-17-22, e-mail: leratkacheva@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852
[3] Department of systems analysis and modeling heat and gas supply, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. (0562) 47-17-22, e-mail: solody@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-4789-9514

Abstract. ***Purpose.*** Condensation mode of water vapor from the gas mixture in the tubular gas heater structure allows to use fuel gas more efficiently. It is necessary to carry out a number of theoretical and experimental studies to expand the range of use of tubular gas heaters by virtue of their work in condensing mode. The purpose of the article is to develop a methodology of experimental research of the tubular gas heater in the condensing mode to test the effectiveness of work, determine the quantitative characteristics of the process of water vapor condensation from the gas mixture. ***Methodology***. The experimental installation is available for research of work of the tubular heater in the condensing mode. The installation consists of gas-burning device, linear tubular heater, device of water vapor supply, device of air cooling, experimental area, ventilator, condensate collector, drainage pipe. The ventilator is equipped with gas-air ejector. Measurement subject: consumption of gas-air mixture, quantity of supplied vapor, pressure of the vapor-gas mixture, inlet temperature of the vapor-gas mixture, discharge temperature of the gas-air mixture, linear sizes of experimental area, quantity of condensate, temperature of condensate. The characteristics that are defined: volumetric density of spreading in the volume of sources of phase transition and quantity of heat which is exhaled in the process of vapor condensation from gas-air mixture. ***Findings.*** The methodology of experimental research of tubular gas heater in the condensing mode of work allows to determine the quantitative characteristics of the water vapor condensation process in the gas-air mixture, namely the quantity of additional heat which is produced during the condensation process of water vapor. ***Originality.*** The methodology of experimental research of tubular gas heater in the condensing mode is developed for the first time. ***Practical value.*** The methodology allows to determine experimentally the quantitative characteristics of the process of water vapor condensation from the gas-air mixture in the heater and justify the appropriateness of the condensing mode.

Keywords: tubular gas heaters; methodology; experimental research; condensation of water vapor

Постановка проблеми

Трубчасті газові обігрівачі використовуються у децентралізованих системах теплопостачання середніх та великих виробничих приміщень, що забезпечує рівномірний розподіл тепла у робочій зоні та економію палива. Підвищити ефективність використання газового палива можливо шляхом використання в конструкції обігрівача режиму конденсації водяної пари з газоповітряної суміші. Для розширення діапазону використання трубчастих газових нагрівачів за рахунок їх роботи у конденсаційному режимі необхідно провести ряд додаткових теоретичних та експериментальних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Експериментальні дослідження трубчатих газових нагрівачів проводились у роботах [7, 8] та інших. Але конденсаційний режим роботи не розглядався. Технічне рішення конденсаційного трубчастого нагрівача пропонується у [6]. Математична модель ділянки трубчастого газового нагрівача з конденсацією водяної пари наведена у роботах [2, 3] включає в себе рівняння збереження маси, руху та енергії. Деякі величини, що входять до математичної моделі доцільно визначати експериментально. Експериментальні дослідження конденсації пари з парогазової суміші переважно присвячені визначенню середніх характеристик тепло- і масообміну, які не дають повної картини перебігу процесу [1, 4, 5, 9]. Тому для визначення конкретних характеристик тепло- і масообміну при конденсації водяної пари у трубчастому газовому нагрівачу необхідно провести експериментальні дослідження.

Мета

Метою статті є розробка методики експериментального дослідження трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі роботи. Метою експериментальних досліджень є виявити ефективність роботи трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі, визначити кількісні характеристики процесу конденсації водяної пари з газоповітряної суміші, а само кількість додаткової теплоти, що можливо отримати при конденсації водяної пари.

Виклад матеріалу

Для дослідження роботи трубчастого нагрівача у конденсаційному режимі пропонується експериментальна установка, яка складається з газопальникового пристрою, трубчастого лінійного нагрівача, блоку подачі водяної пари, повітряного охолоджувального блоку, дослідної ділянки, де безпосередньо відбувається конденсація водяної пари, вентилятору, який обладнаний газоповітряним ежектором, кондесатозбірника, який з'єднується з лінійним обігрівачем за допомогою дренажної трубки перед витяжним вентилятором. Схема експериментальної установки наведена на рис. 1.

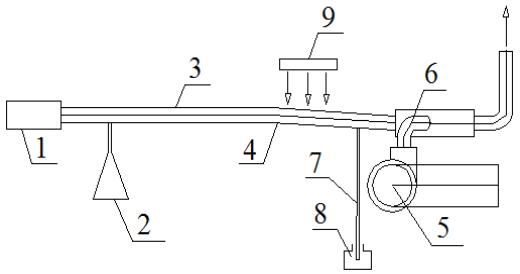

Рис 1. Схема експериментальної установки / The scheme of the experimental setup:
1 – газопальниковий блок ; 2 – блок подачі водяної пари ; 3 – трубчастий лінійний нагрівач; 4 - дослідна ділянка; 5 – вентилятор; 6 - газоповітряний ежектор; 7 – дренажна трубка; 8 – конденсатозбірник; 9 –.повітряний охолоджувальний блок.

Газоповітряна суміш з газопальникового пристрою надходить до трубчастого лінійного нагрівача. В якості палива планується використання пелет. Блок подачі водяної пари здійснює подачу пари у сухі продукти згоряння, що імітує склад димових газів газоподібного палива. Переміщення парогазової суміші вздовж нагрівача від газового пальника до газоповітряного ежектора забезпечується за рахунок розрідження, що створюється в ежекторі. Для охолодження поверхні трубчастого нагрівача передбачається повітряний охолоджуючий блок. Конденсація водяної пари на поверхні здійснюється у кінцевій частині нагрівача (дослідна ділянка), конденсат стікає по внутрішній похилій поверхні нагрівача та по дренажній трубці у конденсатозбірник.

В ході експериментальних досліджень вимірюються такі параметри:

- витрата газоповітряної суміші G;
- кількість пари, що подається $m_п$;
- тиск парогазової суміші $P_с$;
- температура парогазової суміші на вході дослідної ділянки $t_{вх}$;
- температура газоповітряної суміші на виході дослідної ділянки $t_{вих}$;
- лінійні розміри дослідної ділянки l;
- кількість конденсату $m_к$;
- температура конденсату $t_к$.

Варіюючим фактором є витрата газопарової суміші.

Вимірювання проводяться при температурі парогазової суміші 50 - 40 ^{0}C.

Для проведення вимірювання обираються стандартні прилади, які випускаються серійно, робота на яких регламентується інструментами, ДСТУ та іншими офіційними документами. Методи вимірювання базуються на законах метрології.

Витрата парогазової суміші визначається методом перепаду тиску за допомогою витратоміру

змінного перепаду тиску на звужуючому пристрої. Принцип дії даного приладу базується на вимірюванні різниці тисків, що створюється стандартною діафрагмою, яка встановлена у повітропроводі.

Залежність між витратою та перепадом тиску визначається з рівняння Бернуллі й рівняння нерозривності потоку:

$$G = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P} \quad , \qquad (1)$$

де G - об'ємна витрата, м^3/с;

α - коефіцієнт витрати звужуючого пристрою;

ε – коефіцієнт розширення потоку газу;

d - діаметр отвору звужуючого пристрою, м^2;

ρ - густина речовини, кг/м^3;

ΔР – перепад тиску на звужуючому пристрої, Па.

Звужуючий пристрій встановлюється на горизонтальній прямолінійній ділянці повітропроводу діаметром Dy = 150 мм перпендикулярно, при цьому вісь звужуючого пристрою співпадає з віссю повітропроводу. Для вимірювань використовується діафрагма з діаметром d=100 мм.

Спосіб відбору перепаду тиску – фланцевий. Для вимірювання різниці тиску використовується перетворювач різниці тиску Сапфір-22ДД.

Кількість пара, що подається можна визначити за потужністю парогенератора:

$$m_n = \frac{Q}{r} \text{, кг/с} \qquad (2)$$

де Q – потужність, кВт;

r – теплота пароутворення, кДж/с.

Вимірювання тиску парогазової суміші проводиться шляхом прямого вимірювання рідинним U – подібним манометром.

Температури парогазової суміші на вході дослідної ділянки та газоповітряної суміші на виході вимірюється ХК – термопарами. Кожна з термопар підключена до ТРМ-138. При цьому зчитування даних може здійснюватися безпосередньо з дисплея ТРМ, або за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення на ПК, підключеному до ТРМ 138.

Кількість конденсату, що утворюється визначається зважуванням на лабораторних вагах СВА.

Температура конденсату вимірюється термометром лабораторним ТЛ-2.

За результатами вимірювання визначається:

- об'ємна густина розподілення в об'ємі джерел фазового переходу, кг/м^3·с:

$$m = \frac{m_к}{\tau \cdot V_{діл}} \quad , \qquad (3)$$

де $m_к$ – маса конденсату, кг;

τ – час проведення експерименту. с;

$V_{діл}$ – об'єм, в якому відбувається фазовий перехід, м^3;

- кількість теплоти, що виділяється у процесі конденсації пари з газоповітряної суміші, кДж:

$$Q = m_к \cdot r \qquad (4)$$

де $m_к$ – маса конденсату, кг;

r - теплота пароутворення за температурою конденсату.

Наукова новизна і практична значимість

Вперше розроблена методика експериментальних досліджень трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі роботи. Наведена методика дозволяє експериментально визначити кількісні характеристики процесу конденсації водяної пари з газоповітряної суміші у нагрівачі та обґрунтувати доцільність конденсаційного режиму роботи.

Висновки

1. Для розширення діапазону використання трубчастих газових нагрівачів за рахунок їх роботи у конденсаційному режимі необхідно провести експериментальні дослідження.

2. Розроблена методика експериментальних досліджень трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі роботи, яка дозволяє експериментально визначити кількісні характеристики процесу конденсації водяної пари з газоповітряної суміші у нагрівачі та виявити ефективність роботи трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика: учеб. руководство: Для втузов / Г. Н. Абрамович. – 5-е изд., перераб. – Москва: Наука, 1991. – 600 с.

2. Березюк А. Г. Математическое моделирование трубчатого газового нагревателя с учетом конденсации водяного пара из газовоздушной смеси / А. Г. Березюк, В. В. Ткачова, В. Ф. Иродов // Zbiyr raportyw naukowych. «Naykowe prace, praktyka, obracomania, innowacje» - Zakopane: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2013. – С. – 7–13.

3. Березюк Г. Г. Математичне моделювання ділянки трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі роботи / Г. Г. Березюк, В. Ф. Іродов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ, ПГАСА, 2014. – Вип. 5. – С. – 6–9.

4. Зудин Ю. Б. Приближенный кинетический анализ интенсивной конденсации [Електронный ресурс] / Ю. Б. Зудин // Теплофизика и аэромеханика. – 2015. – Вып 1. – С. 73–85. – Режим доступа: http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=162998. – Загл. с экрана.

5. Кулінченко В. Р. Теплопередача з елементами масообміну (теорія і практика процесу): підруч. для студентів ВНЗ / В. Р. Куліченко, О. Ю. Шевченко, В. А. Піддубний. – Київ : Фенікс, 2014. – 918 с.

6. Пристрій для газового опалення: пат. 89963 Україна (UA) : МПК F 24 D 10 / 00. / Березюк Г. Г., Іродов В. Ф., Ткачова В. В. (Україна) ; заявник та патентовласник Березюк Г. Г., Іродов В. Ф., Ткачова В. В. (Україна). - № u2013 12820 ; заявл. 04.11.2013 ; опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9. - 4 с.

7. Солод Л. В. Метод розрахунку і раціональні параметри інфрачервоних трубчастих газових обігрівачів: автореф. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.03 / Л. В. Солод : Харківський нац. ун-т будівнц. та архітектури. – Харків, 2011. – 20 с.

8. Шаптала Д. Є. Підвищення ефективності трубчастих газових нагрівачів для променевого опалення та підігріву припливного повітря: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.03 / Д. Є. Шаптала: Харківський нац. ун-т будівнц. та архітектури. – Харків, 2013. – 19 с.

9. E. A. T. van den Akker Thermodinamic analysis of molecular dynamics simulation of evaporation and condensation [Virtual Resource] / E. A. T. van den Akker, A. J. H. Frijns, A. A. van Steenhoven, P. A. J. Hilbers // 5th European Thermal-Sciences Conference, The Netherlands. – 2008 – 8 p. – Access Mode : http://www.eurotherm2008.tue.nl/Proceedings_Eurotherm2008 /papers/Micro_Nano-scale_Heat_Transfer/MNH_14.pdf. – Title from Screen.

REFERENCES

1. Abramovich G. N. *Prikladnaja gazovaja dinamika* [Applied gas dynamics]. Moskva: Nauka, 1991, 600 p. (in Russian).

2. Berezjuk A. G., Tkachova V. V. and Irodov V. F. Matematicheskoe modelirovanie trubchatogo gazovogo nagrevatelja s uchetom kondensacii vodjanogo para iz gazovozdushnoj smesi [Mathematical modeling of the tubular gas heater based on the condensation of water vapor from the gas concoction]. *Zbiur raportuw naukowych. «Naykowe prace, praktyka, obracomania, innowacje»* [Zbiur raportuw research. "Naykowe work, practice, obracomania, innovations»]. Zakopane: Wydawca, 2013, pp. 7–13. (in Russian).

3. Berezjuk G. G. and Irodov V. F. Matematychne modelyuvannya dilyanky trubchastoho hazovoho nahrivacha u kondensatsiynomu rezhymi roboty [Mathematical modeling of the area of tubular gas heater in the condensing mode of work]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. PDABA. Dnipropetrovsk, 2014, iss 5, pp. 6–9. (in Ukrainian).

4. Zudin Yu. B. Priblizhennyi kineticheskii analiz intensivnoi kondensatsii [An approximate kinetic analysis of intense condensation]. *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and Aeromechanics]. 2015, issue 1, pp. 78-85. Available at: http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=162998http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=162998. (in Russian).

5. Kulichenko V. R., Shevchenko O. Yu. and Piddubnyi V. A. *Teploperedacha z elementamy masoobminu (teoriia i praktyka protsesu)* [Heat transfer with elements mass transfer(teoriya and practice processes)]. Kiyiv : Feniks, 2014, 918 p. (in Ukrainian).

6. Berezjuk G. G., Irodov V. F. and Tkachova V. V. *PristrIy dlya gazovogo opalennya: pat. 89963 Ukrayina (UA): MPK F24D 10/00* [Device for gas heating: pat. 89963 Ukrayina (UA): MPK F24D 10/00]. 2014.

7. Solod L. V. *Metod rozrahunku i ratsionaini parametri infrachervonih trubchastih gazovih obigrivachiv. Avtoreferat. kand.* [The method of calculating and rational parameters of tubular infrared gas heaters. Abstract of Ph. D. dissertation]. Kharkivskiy nats. un-t budivnts. ta arkhitekturi. Kharkiv, 2011, 20 p. (in Ukrainian).

8. Shaptala D.Je. *Pidvyshhennja efektyvnosti trubchastyh gazovyh nagrivachiv dlja promenevogo opalennja ta pidigrivu pryplyvnogo povitrja. Avtoreferat. kand.* [Improved tube gas heaters for radiant heating and forced air heating. Abstract of Ph. D. dissertation]. Kharkivskiy nats. un-t budivnts. ta arkhitekturi. Kharkiv, 2013, 19 p. (in Ukrainian).

9. E. A. T. van den Akker, Frijns A. J. H. , A. A. van Steenhoven and. Hilbers P. A. J *Thermodinamic analysis of molecular dynamics simulation of evaporation and condensation. 5th European Thermal-Sciences Conference, The Netherlands*, 2008, 8 p. Available at: http://www.eurotherm2008.tue.nl/Proceedings_Eurotherm2008/papers/Micro_Nano-scale_Heat_Transfer/MNH_14.pdf

Стаття надійшла в редколегію 20.09.2016