

УДК 697.7 – 027.45

КВАЗИДВУМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМОВ ТРУБЧАТОГО ГАЗОВОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

ТКАЧЕВА В. В. ^{1*}, к.т.н, доц.,
ИРОДОВ В.Ф. ², д.т.н, проф.

^{1*} Кафедра теплотехники и газоснабжения, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. (0562) 47-17-22, e-mail: leratkacheva@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852

^{2*} Кафедра теплотехники и газоснабжения, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. (0562) 47-17-22, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID:0000-0001-8772-9862

Аннотация. Цель. В настоящее время существует целый ряд не решенных задач повышения надежности трубчатых газовых нагревателей (ТГН). Причиной различных дефектов ТГН является перегрев поверхности трубы нагревателя, при котором могут возникать деформации и прогары стенок. Эти процессы возникают в линейной части жаровых труб от высоких температур газов внутри трубы. Перегревы могут появляться также при запуске нагревателя, при котором температура за короткий промежуток времени может достигать максимальной величины, при этом относительно тонкие стенки трубы прогреваются быстро и неравномерно. Как показали экспериментальные исследования ТГН, большие перепады имеют температуры по периметру наружной поверхности трубы нагревателя. Для повышения точности математического моделирования трубчатых газовых нагревателей предлагается учесть фактор влияния распределения температур по угловой координате поверхности нагревателя. **Методика.** Работа посвящена математическому моделированию теплового и гидравлического режимов трубчатого газового нагревателя. Предлагается, что начальный и основной участки нагревателя не имеют тепловой изоляции и тепловой поток передается через стенку трубы в окружающее воздушное пространство. Известна математическая модель участков, которая зависит лишь от одной продольной координаты вдоль нагревателя и состоит из двух групп уравнений - уравнений теплообмена и уравнений движения. Для получения квазидвумерной математической модели теплового и гидравлического режимов ТГН предлагается учесть зависимость температуры поверхности нагревателя не только от линейной, но и от угловой координаты. **Результаты.** Разработана квазидвумерная математическая модель гидравлического и теплового режимов газового трубчатого нагревателя, которая представляет собой совокупность обыкновенных дифференциальных уравнений, при этом параметры режимов зависят как от линейной координаты, так и частично от угловой координаты. На основе разработанной модели можно решать прямую задачу расчета параметров нагревателя путем численного интегрирования. Модель основана на уравнениях сохранения массы, движения и энергии, а также теплового баланса. При этом рассматривались двумерный стационарный тепловой и гидравлический режимы. Достоверность двумерной математической модели газового трубчатого нагревателя обеспечивается тем, что она разработана на основе экспериментальных исследований и основана на математической модели трубчатого газового нагревателя, достоверность которой экспериментально доказана. **Научная новизна.** Построена квазидвумерная математическая модель ТГН на основе экспериментальных данных распределения температуры по периметру трубчатого газового нагревателя в зависимости от конструктивных и режимных параметров. **Практическая значимость.** Использование модели для расчетов поможет повысить эффективность проектных решений и качество функционирования трубчатого газового нагревателя. Предложенная математическая модель позволит проводить исследования при расчете надежности ТГН.

Ключевые слова: трубчатые газовые нагреватели, надежность, квазидвумерная математическая модель, система уравнений.

КВАЗИДВОВИМІРНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО ТА ГІДРАВЛІЧНОГО РЕЖИМІВ ТРУБЧАТОГО ГАЗОВОГО НАГРІВАЧА

ТКАЧОВА В. В. ^{1*}, к.т.н, доц.,
ИРОДОВ В.Ф. ², д.т.н, проф.

^{1*} Кафедра теплотехніки і газопостачання, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. (0562) 47-17-22, e-mail: leratkacheva@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852

² Кафедра теплотехніки і газопостачання, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. (0562) 47-17-22, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID:0000-0001-8772-9862

Анотація. Мета. Нині є цілий ряд не вирішених задач підвищення надійності трубчастих газових нагрівачів (ТГН). Причиною різних дефектів ТГН є перегрів поверхні труби нагрівача, при якому можуть виникати деформації і прогари стінок. Ці процеси виникають в лінійній частині жарових труб від високих температур газів всередині труби. Перегрів можуть з'являтися також при запуску нагрівача, при якому температура за короткий проміжок часу може досягати максимальної величини, при цьому відносно тонкі стінки труби прогріваються швидко і нерівномірно. Як показали експериментальні дослідження ТГН, великі перепади мають температури по периметру зовнішньої поверхні труби нагрівача. Для підвищення точності математичного моделювання трубчастих газових нагрівачів пропонується врахувати фактор впливу розподілу температур по кутовій координаті поверхні нагрівача. **Методика.** Робота присвячена математичному моделюванню теплового і гідравлічного режимів трубчастого газового нагрівача. Пропонується, що початкова та основна ділянки нагрівача не мають теплової ізоляції і тепловий потік передається через стінку труби в навколишній повітряний простір. Відома математична модель ділянок, яка залежить лише від однієї поздовжньої координати уздовж нагрівача і складається з двох груп рівнянь - рівнянь теплообміну і рівнянь руху. Для отримання квазидвовимірної математичної моделі теплового і гідравлічного режимів ТГН пропонується врахувати залежність температури поверхні нагрівача не тільки від лінійної, але й від кутової координати. **Результати.** Розроблена квазидвовимірна математична модель гідравлічного і теплового режимів газового трубчастого нагрівача являє собою сукупність звичайних диференціальних рівнянь, при цьому параметри режимів залежать як від лінійної координати, так і частково від кутової координати. На основі розробленої моделі можна вирішувати пряму задачу розрахунку параметрів нагрівача шляхом чисельного інтегрування. Модель заснована на рівняннях збереження маси, руху та енергії, а також теплового балансу. При цьому розглядалися двовимірний стаціонарний тепловий і гідравлічний режими. Достовірність двовимірної математичної моделі газового трубчастого нагрівача забезпечується тим, що вона розроблена на основі експериментальних досліджень та заснована на математичній моделі трубчастого газового нагрівача, достовірність якої експериментально доведена. **Наукова новизна.** Побудована квазидвовимірна математична модель ТГН на основі експериментальних даних розподілу температури по периметру трубчастого газового нагрівача в залежності від конструктивних і режимних параметрів. **Практична значимість.** Використання моделі для розрахунків допоможуть підвищити ефективність проектних рішень та якість функціонування трубчастого газового нагрівача. Запропонована математична модель дозволить проводити дослідження при розрахунку надійності ТГН.

Ключові слова: трубчасті газові нагрівачі, надійність, квазидвовимірна математична модель, система рівнянь.

QUASI TWO-DIMENSIONAL MATHEMATICAL MODEL OF THE THERMAL AND HYDRAULIC REGIMES OF THE TUBE GAS HEATER

TKACHOVA V. V. ^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Ass. prof,
IRODOV V.F. ², Dr. Sc. (Tech.), Prof.

^{1*} Department of heat technic 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

² Department of heat technic 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: vfirodov@i.ua, ORCID ID:0000-0001-8772-9862

Abstract. Purpose. Currently, there are long line of unsolved tasks of increase the reliability of the tube gas heaters (TGH). The cause of various defects in TGH is overheating of the surface of heater. As a result the strain and burnout walls is appeared. These processes can be in the linear part of the flame tube from the high temperature gas inside the pipe. The overheating can be arised during starting too. The temperature can reach the maximum value in a short term. The relatively thin walls of the tube are heated fast and unevenly. According to the experimental researches of TGH the temperature have a large fluctuant of temperature along the perimeter of the outer surface of the heater. Is proposed to take into account the factor of influence of the temperature distribution in the angular coordinate on the surface of the heater for increase of accuracy of mathematical modeling of tube gas heaters. **Methodology.** This work is devoted to mathematical modelling of the thermal and hydraulic regimes in tube gas heater. It is offered the beginning and main parts of the heater do not have a thermal insulation and heat flux is transmitted through the pipe wall into the surrounding airspace. The well-known mathematical model of the parts depends on the only coordinate longitudinal position along the heater and consists of two groups of equations such as heat transfer and motion. Is proposed to take into account the dependence the surface temperature of the heater not only from the linear coordinate but also from the angular coordinate for getting quasi two-dimensional mathematical model of thermal and hydraulic regimes TGH. **Findings.** It was developed a quasi two-dimensional mathematical model of the hydraulic and thermal regimes of gas tube heater. There are a set of ordinary differential equations. The parameters of regimes depend on both the linear and partly on the angular coordinate. According to the problem can solve by direct calculation of the parameters of the heater by numerical integration. The model is based on the equations of preservation of mass, movement and energy also on heat balance. The two dimensional stationary thermal and hydraulic regimes was calculated. Accuracy of data of a two dimensional mathematical model of gas tube heater is proved. It is based on experimental researches of a mathematical model of the tube gas heater. **Originality.** The quasi two- dimensional mathematical model TGH is constructed. It was based on experimental researches of temperature distribution along the perimeter of the tube gas heater in dependence on the projecting and regimes characteristics. **Practical value.** Using of the models for calculation results will help to improve the efficiency of design decisions and the quality of the functioning of the tube gas heater. That model will allow the investigate of TGH.

Keywords: tube gas heaters, reliability, quasi two dimensional mathematical model, systems of equations.

Введение

Повышение надежности трубчатых газовых нагревателей (ТГН), а также проектных решений с нагревателями является актуальной задачей. Причиной различных дефектов ТГН часто является перегрев поверхности трубы нагревателя, при котором могут возникать деформации и прогары стенок. Это возникает от высоких температур омывающих газов, которым подвергается линейная часть жаровых труб нагревателей. Перегревы могут появляться также при запуске нагревателя, при котором температура за короткий промежуток времени может достигать максимальной величины, при этом относительно тонкие стенки трубы прогреваются быстро и неравномерно.

Как показали экспериментальные исследования ТГН [7], температуры имеют большие перепады по периметру наружной поверхности трубы нагревателя. Для повышения точности математического моделирования трубчатых газовых нагревателей предлагается учесть фактор влияния распределения температур по угловой координате

Цель

Ставилась задача разработать квазидвумерную математическую модель ТГН на основе экспериментальных данных распределения температуры по периметру трубчатого газового нагревателя в зависимости от конструктивных и режимных параметров.

Методика

Был рассмотрен начальный и основной участки трубчатого газового нагревателя, где происходит выделение тепла в движущийся поток газовой смеси при сгорании газового факела.

Предположим, что начальный участок нагревателя не имеет тепловой изоляции и тепловой поток передается через стенку трубы в окружающее воздушное пространство. Математическая модель начального участка [2] состоит из двух групп уравнений - уравнений теплообмена и уравнений движения. В этом случае течение и теплообмен - стационарные процессы и параметры газовой смеси зависят лишь от одной продольной координаты вдоль нагревателя.

В работах [4,6,10] предлагается численная модель газодинамических процессов двухфазной среды в устройствах различной конфигурации. Для моделирования процесса используется осредненная по Рейнольдсу система уравнений Навье-Стокса. В приведенных уравнениях газовой динамики введено много эмпирических коэффициентов, которые трудно определить.

Опираясь на результаты [3,8] для начального участка и уравнения теплообмена и движения для

основного участка, математическую модель начального участка можно записать в виде:

Уравнения теплообмена

$$dQ_{1к} = \pi D dx \alpha_1 (T - T_{wi}) \quad (1)$$

$$dQ_{1л} = \pi D dx c_0 \varepsilon (T^4 - T_{wi}^4) 10^{(-8)} \quad (2)$$

$$dQ_2 = \pi D dx \frac{\lambda}{\delta} (T_{wi} - T_{wo}) \quad (3)$$

$$dQ_3 = \pi D dx c_o \varepsilon_w (T_{wo}^4 - T_o^4) 10^{(-8)} \quad (4)$$

$$dQ_4 = \pi D dx \alpha_2 (T_{wo} - T_o) \quad (5)$$

$$dQ_1 = dQ_{1к} + dQ_{1л} \quad (6)$$

$$dQ_1 = dQ_2 \quad (7)$$

$$dQ_2 = dQ_3 + dQ_4 \quad (8)$$

$$d(\rho w F C_p T) = -dQ_1 + dQ_0, \text{ при } 0 < x \leq L_f \quad (9)$$

$$dQ_0 / dx = Q_0 / S_f 2\pi \cdot y_f(x), \text{ при } 0 < x \leq L_f \quad (10)$$

где dQ_1 - тепловой поток, передаваемый от газовой смеси к трубе; dQ_2 - тепловой поток, передаваемый теплопроводностью через стенку трубы; dQ_3 - тепловой поток, передаваемый излучением от стенки трубы в окружающее пространство; dQ_4 - тепловой поток, передаваемый конвекцией от стенки трубы в окружающее пространство; α_1 - коэффициент теплоотдачи от потока газовой смеси к стенке нагревателя; α_2 - коэффициент теплоотдачи от наружной стенки в окружающее пространство; T - температура газовой смеси; T_{wi} - температура внутренней стенки трубы; T_{wo} - температура наружной стенки трубы; x - линейная координата поверхности нагревателя; λ , δ - соответственно коэффициент теплопроводности материала стенки, толщина; D - наружный диаметр нагревателя; C_p - изобарная теплоемкость газовой смеси; Q_0 - общий тепловой поток от сгорания горючего газа в горелке; L_f - общая длина газового факела, S_f - площадь поверхности факела, y_f - радиус фронта горения, могут быть определены при помощи эмпирических уравнений.

Уравнения движения

$$dp = -\Lambda \cdot dx/D \cdot \rho \frac{w^2}{2} + dh \cdot (\rho_a - \rho) \cdot g \quad (11)$$

$$d\rho = (d\rho - \rho R dT)/RT \quad (12)$$

$$dw = (-\rho w dF - w F d\rho)/\rho F \quad (13)$$

где: ρ - плотность газовой смеси; w - средняя линейная скорость движения газовой смеси по излучающей трубе; F - площадь поперечного сечения трубы; P, T - абсолютные давление и температура газовой смеси в данном сечении излучающей трубы; R - газовая постоянная, зависящая от состава газовой смеси после полного сгорания горючего газа; dp - перепад давления газовой смеси на участке длиной dx ; Λ - коэффициент трения.

Для получения квазидвумерной математической модели теплового и гидравлического режимов ТГН, предлагается рассматривать зависимость температуры поверхности нагревателя как функцию от линейной и угловой координат:

$$T_{wi} = T_{wi}(x, \varphi)$$

$$T_{wo} = T_{wo}(x, \varphi) \quad (14)$$

$$T_o = const,$$

где φ - угловая координата поверхности нагревателя; T_o - абсолютная температура окружающей среды в отопительном помещении.

Исходя из зависимости (14), развивая экспериментальные исследования [7], предложено математическую модель (1)–(13) изменить, а именно тепловые потоки представить в виде:

$$dQ_{1к} = D/2 \int_0^{2\pi} \alpha_1 [T - T_{wi}(x, \varphi)] d\varphi dx \quad (15)$$

$$dQ_{1л} = \frac{D}{2} c_0 \int_0^{2\pi} \varepsilon_1 [T^4 - T_{wi}^4(x, \varphi)] d\varphi dx 10^{(-8)} \quad (16)$$

$$dQ_{3л} = \frac{D}{2} c_0 \int_0^{2\pi} \varepsilon_2 [T_{wo}^4(x, \varphi) - T_o^4] d\varphi dx 10^{(-8)} \quad (17)$$

$$dQ_{3к} = \frac{D}{2} \int_0^{2\pi} \alpha_2 [T_{wo}(x, \varphi) - T_o] d\varphi dx \quad (18)$$

$$dQ_2 = \frac{D}{2} \frac{\lambda}{\delta} \int_0^{2\pi} [T_{wi}(x, \varphi) - T_{wo}(x, \varphi)] d\varphi dx \quad (19)$$

$$dQ_{1к} + dQ_{1л} = dQ_2 = dQ_{3к} + dQ_{3л}, \quad (20)$$

где ε_1 - эффективная степень черноты при излучении газовой среды на внутреннюю стенку трубы; ε_2 - эффективная степень черноты материала наружной поверхности нагревателя.

Зависимость $T_{wo} = (\varphi)$ можно определить на основе экспериментальных исследований, например в виде:

$$\frac{T_{wo}(\varphi)}{T_{wocp}} = f(\varphi, T, w, D). \quad (21)$$

Система алгебраических уравнений (15)–(20) становится замкнутой. Численное интегрирование системы (1)–(21) можно выполнять следующим образом. Уравнение (15)–(19) можно привести к уравнениям в виде конечных разностей на интервале Δx , эти уравнения можно рассматривать как замкнутую систему нелинейных уравнений относительно температур T_{wicp} и T_{wocp} . После определения этих температур можно вычислить все составляющие тепловых потоков и численно интегрировать систему уравнений (11)–(13), например, методом Эйлера.

Результаты

Разработана квазидвумерная математическая модель гидравлического и теплового режимов газового трубчатого нагревателя, которая представляет собой совокупность обыкновенных дифференциальных уравнений, при этом параметры режимов зависят как от линейной координаты, так и частично от угловой координаты.

Научная новизна и практическая значимость

Использование модели для расчетов поможет повысить эффективность проектных решений и качество функционирования трубчатого газового нагревателя.

Выводы

Построена квазидвумерная математическая модель ТГН на основе экспериментальных данных распределения температуры по периметру трубчатого газового нагревателя в зависимости от конструктивных и режимных параметров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ /
REFERENCES

1. Болотских, Н. Н. Энергоэффективные мультиторельные системы серии HLV для инфракрасного газового отопления производственных помещений / Н. Н. Болотских // Комунальне господарство міст: Науково-технічний збірник. – 2012. – №103. – С. 301–308.
Bolotskih N. N. Jenergojefektivnye multitorielnye sistemy serii HLV dlja infrakrasnogo gazovogo otoplenija proizvodstvennyh pomeshhenij [Energy efficient multi burner systems for the HLV Series infrared gas heating industrial premises]. *Komunal'ne gospodarstvo mist: Naukovo-tehnichnij zbirnik - Utilities city: Scientific and Technical Collection*, 2012, №103, pp. 301 - 308.
2. Дудкин, К. В. Трубчатые газовые нагреватели для теплоснабжения в сельской местности / К. В. Дудкин, В. В. Ткачева, В. Ф. Иродов; LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. –156 с.
Dudkin K. V., Tkacheva V. V., Irodov V. F. *Trubchatye gazovye nagrevateli dlja teplosnabzhenija v sel'skoj mestnosti* [Tube gas heaters for heat supply in the countryside]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 156 p.
3. Иродов, В. Ф. Математическое моделирование и расчет инфракрасного трубчатого газового обогревателя / В. Ф. Иродов, Л. В. Солод // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. - Дніпропетровськ: ДВНЗ ПДАБтаА, - 2010. – Вып. 52, ч.1. – С. 130–132.
Irodov V. F., Solod L.V. *Matematicheskoe modelirovanie i raschet infrakrasnogo trubchatogo gazovogo obogrevatelya* [Mathematical modeling and calculation of tubular infrared gas heater] *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie .Building, materials sciences, mechanic engineering: Sbornik Nauchnyh Trudov - Building, materials sciences, mechanic engineering: Collection of scientific papers. Dnipropetrovsk*, 2010, issue 52, pp. 130-132.
4. Камалова, Г. А. Математическое моделирование газодинамических процессов двухфазной среды в устройствах различной конфигурации / Г. А. Камалова, А. Ж. Наймалова // Математический журнал. – 2005. - №1. – С. 52-66.
Kamalova G. A., Najmalova A. Zh. *Matematicheskoe modelirovanie gazodinamicheskikh processov dvuhfaznoj sredy v ustrojstvah razlichnoj konfiguracii* [Mathematical modeling of dynamic processes in the two-phase protection devices of various configurations] // *Matematicheskij zhurnal - Mathematical Journal*, 2005, no. 1, pp. 52-66.
5. Кныш, Л. И. Особенности расчёта поля скорости при течении вязкой несжимаемой жидкости в каналах полукруглой формы / Л. И. Кныш, В. И. Давыдов // Вісник Дніпропетровського національного університету ім. О.Гончара. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 14, - Т. 1. – pp. 174–180.
Knysh, L. I. Osobennosti raschjota polja skorosti pri techenii vjazkoj neszhimaemoj zhidkosti v kanalah polukrugloj formy [Features of the calculation of the velocity field in the flow of an incompressible viscous fluid in the semicircular canals]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu*
6. Найманова, А. Ж. Математическое моделирование турбулентного горения в сложном канале / А. Ж. Найманова // Математический журнал. – 2009. - №1. – С. 55-64.
Najmanova A. Zh. *Matematicheskoe modelirovanie turbulentnogo gorenija v slozhnom kanale* [Mathematical modeling of turbulent combustion in complex channel]// *Matematicheskij zhurnal - Mathematical Journal*, 2009, no. 1, pp. 55-64.
7. Ткачева, В.В. Индуктивные моделирования трубчатого газового нагревателя та пальника на пелетах / В. В. Ткачева, Р. В. Барсук // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. -Дніпропетровськ: ДВНЗ ПДАБтаА, 2014. – Вып. 78. – С. 275–281.
Tkachova V.V. *Induktivne modeljuvannja trubchatogo gazovogo nagrivača ta pal'nika na peletah* [Inductive modeling gas tube heater and burner for pellets] / V. V. Tkachova, R. V. Barsuk // *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie .Building, materials sciences, mechanic engineering: Sbornik Nauchnyh Trudov - Building, materials sciences, mechanic engineering: Collection of scientific papers. Dnipropetrovsk*, 2014, issue. 78. pp. 275–281.
8. Шаптала, Д. С. 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 / Шаптала Дарина Євгенівна: Харківський нац. ун-т будівнц. та арх.-пр. - Харків, 2013.- 19 с.
Shaptala D. Je. *Pidvyshhennja efektyvnosti trubchastyh gazovyh nagrivačiv dlja promenevogo opalennja ta pidigrivu pryplyvnogo povitlja*: Avtoreferat. Diss. [Improved tubular gas heaters for radiant heating and forced air heating. Author's abstract]. Harkiv, 2013. 19 p.
9. Юдаев, Б. Н. Теплопередача:учебник для вузов / Б. Н. Юдаев. – Москва, 1981. – 352 с.
Yudaev B. N. *Teploperedacha. Uchebnik dlja vuzov* [Heat: Textbook for Universities]. Moscow, 1981. 352 p.
10. Камалова, Г. А. Modelling of Turbulent Reacting Flows in Furnace Devices / G. A. Kamalova, V. E. Messerle, A. Zn. Ustimenko // *Termophysics and Aeromechanics*. – 2008. – Vol. 15. – №1. – pp. 139 - 151.
Kamalova G.A., Messerle V.E., Naimanova A.Zh., Ustimenko A.B. *Modelling of Turbulent Reacting Flows in Furnace Devices. Termophysics and Aeromechanics*, 2008, vol.15, no. 1, pp. 139-151.
11. Kamp, Andreas. Optimale Platzierung von Strahlungsheizungen / Andreas Kamp // *HLH*, 1991. – № 9. – pp. 509–514.
Kamp Andreas. *Optimale Platzierung von Strahlungsheizungen. HLH*, 1991, no. 9, pp. 509-514.
12. Herschel Sir Wm. Infrared Handbook / Sir Wm Herschel // *Concepts of Radiant Heating*. Roberts Gordon, 1994. – pp. 17 - 35.
Sir Wm Herschel. *Infrared Handbook. Concepts of Radiant Heating. Roberts Gordon*, 1994, pp. 17 - 35.

Стаття рекомендована к публікації д-ром.техн.наук, проф. А. С. Беликовым (Україна); д-ром.техн.наук, проф. С. З. Полищуком (Україна)

Статья поступила в редколлегию 22.09.2015