

УДК 697.7 – 027.45

ПРО ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ КВАЗІДВОВИМІРНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНКИ ВИРОГІДНОСТІ ВІДМОВИ РОБОТОЗДАТНОСТІ ВНАСЛІДОК ПОЯВИ ПРОГАРІВ В ТРУБЧАСТИХ ГАЗОВИХ НАГРІВАЧАХ

ТКАЧОВА В. В.^{1*}, к.т.н, доц.,

^{1*} 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) 47-17-22, e-mail: leratkacheva@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852

Анотація. Мета. Одинична властивість надійності, яка знайшла відображення в даній роботі, є безвідмовність. Експлуатація трубчастих газових нагрівачів характеризується рядом специфічних особливостей, що впливають на рівень аварійності (поломки). До числа таких особливостей відносяться відмови роботоздатності, внаслідок різних типів пошкоджень трубчастої частини нагрівача. Такими пошкодженнями є прогари, що відбуваються, як правило, через внутрішню високотемпературну корозію. Як показують експериментальні дослідження, продукти згоряння газу, просуваючись уздовж трубчастої частини, нагрівають поверхню нагрівача нерівномірно. Метою даної роботи є оцінка ймовірності відмов роботоздатності нагрівача шляхом удосконалення методики його розрахунку. Для досягнення мети необхідно розробити таку модель теплового та гідравлічного режимів ТГН, яка б враховувала нерівномірність розподілу температур по периметру поверхні нагрівача по його довжині. **Методика.** Аналіз ймовірності відмов роботоздатності, внаслідок прогарів, дав можливість розробити квазідвовимірну математичну модель теплового та гідравлічного режимів, яка складається з рівнянь теплообміну і руху. Представлені рівняння математичної моделі відрізняються від відомої опублікованої математичної моделі [3] рівняннями зв'язку розподілу температури по поверхні нагрівача в залежності від кутової координати. У розробленому алгоритмі розрахунку [3,7-9], у відповідних пунктах програми, був введений додаток у вигляді емпіричної залежності безрозмірного виду. В останній виділена сукупність параметрів, що впливають на розподіл температур по периметру нагрівача за рахунок конвективного руху. **Результати.** Отримані необхідні експериментальні дані про характер зміни температури по периметру нагрівача. Розроблено емпіричну залежність, в якій враховано вплив розподілу температур не тільки по лінійній, але і по кутовій координатам. **Наукова новизна.** Розроблено квазідвовимірну математичну модель теплового та гідравлічного режимів, яка додатково враховує нерівномірність розподілу температур по периметру нагрівача в залежності від кутової координати. Отримано методику розрахунку, яка дає можливість оцінити ймовірність відмов роботоздатності ТГН внаслідок прогарів. **Практична значимість.** Розроблено алгоритм і модифікована програма для розрахунку за допомогою комп'ютера. Отримані результати розрахунку можуть бути використані під час проектування, експлуатації та аналізу діючого устаткування в системах теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами.

Ключові слова: трубчасті газові нагрівачі; розрахунок; надійність; безвідмовність; квазідвовимірна математична модель; прогари

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КВАЗИДВУМЕРНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗОВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВСЛЕДСТВИЕ ПРОГАРОВ ТРУБЧАТЫХ ГАЗОВЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

ТКАЧЕВА В. В.^{1*}, 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. (0562) 47-17-22, e-mail: leratkacheva@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852

Аннотация. Цель. Единичным свойством надежности, которое нашло отражение в данной работе, является безотказность. Эксплуатация трубчатых газовых нагревателей характеризуется рядом специфических особенностей, влияющих на уровень аварийности (поломки). К числу таких особенностей относятся отказы работоспособности, вследствие различных типов поврежденной трубчатой части нагревателя. К таким повреждениям относятся прогары, происходящие, как правило, из-за внутренней высокотемпературной коррозии. Как показывают экспериментальные исследования, продукты сгорания газа, продвигаясь вдоль трубчатой части, нагревают поверхность нагревателя неравномерно. Целью данной работы является оценка вероятности отказов работоспособности нагревателя путем усовершенствования методики его расчета. Для достижения цели необходимо разработать такую модель теплового и гидравлического режимов ТГН, которая бы учитывала неравномерность распределения температур по периметру поверхности нагревателя, по его длине. **Методика.** Анализ

вероятности отказов работоспособности, вследствие прогаров, дал возможность разработать квазидвумерную математическую модель теплового и гидравлического режимов, которая состоит из уравнений теплообмена и движения. Представленные уравнения математической модели отличаются от известной опубликованной математической модели [3] уравнениями связи распределения температуры по поверхности нагревателя в зависимости от угловой координаты. В разработанном алгоритме расчета [3,7-9], в соответствующих пунктах программы, было введено дополнение в виде эмпирической зависимости безразмерного вида. В последней выделена совокупность параметров, влияющих на распределение температур по периметру нагревателя за счет конвективного движения. **Результаты.** Получены необходимые экспериментальные данные о характере изменения температуры по периметру нагревателя. Разработана эмпирическая зависимость, в которой учтено влияние распределения температур не только по линейной, но и по угловой координатам. **Научная новизна.** Разработана квазидвумерная математическая модель теплового и гидравлического режимов, которая дополнительно учитывает неравномерность распределения температур по периметру нагревателя в зависимости от угловой координаты. Получена методика расчета, которая дает возможность оценить вероятность отказов работоспособности ТГН, вследствие прогаров. **Практическая значимость.** Разработан алгоритм и модифицирована программа для расчета при помощи компьютера. Полученные результаты расчета могут быть использованы во время проектирования, эксплуатации и анализа действующего оборудования в системах теплоснабжения с трубчатыми газовыми нагревателями.

Ключевые слова: трубчатые газовые нагреватели; расчет; надежность; безотказность, квазидвумерная математическая модель; прогары

THE FEASIBILITY OF USE QUASI TWO-DIMENSIONAL MATHEMATICAL MODELS FOR ESTIMATION OF FAILURE PROBABILITIES EFFICIENCY ON ACCOUNT OF BURNOUTS IN THE TUBE GAS HEATERS

ТКАЧОВА В. В.^{1*}, *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, тел. (0562) 47-17-22, e-mail: leratkacheva@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852

Abstract. Purpose. The identity property of reliability, which is reflected in this work, is failure - free operation. Operation tube gas heaters are characterized by a number of specific features affecting the level of accident (breakage). Such performance features include failures efficiency, due to various types of damage of the tube heater. Such damage burnouts are derived usually from internal high temperature corrosion. As shown by experimental researches, the gas combustion products moving along the tube part of the heater surface is heated irregularly. The purpose of this work is to estimate the probability of failure efficiency of the heater by improving its method of calculation. To achieve of the purpose must be developed a model of thermal and hydraulic regimes TGH, which takes into account the irregular of temperature distribution along the perimeter surface of the heater along its length. **Methodology.** Analysis of the probability of performance failure efficiency due to burnouts, made it possible to develop a quasi two-dimensional mathematical model of the thermal and hydraulic regimes, which consists of equations of heat and motion. Presented equations of the mathematical model different from the known published mathematical model [3] equations for the temperature distribution of the heater surface connection depending on the angular coordinate. The developed algorithm for calculating [3,7-9], the relevant paragraphs of the program, was introduced in addition a dimensionless empirical relationship of the form. The final set of isolated parameters affecting the temperature distribution at the perimeter of the heater due to convective motion. **Findings.** The necessary experimental data on the nature of the changes in the perimeter of the heater temperature. A empirical relationship, which takes into account the effect of temperature distribution not only in linear, but the angular coordinates too. **Originality.** A quasi two-dimensional mathematical model of thermal and hydraulic conditions, which further takes into account the irregular distribution of temperature on the heater perimeter depending on the angular position. We obtain a calculation method which allows us to estimate the probability of failure efficiency TGH, due to burnouts. **Practical value.** The algorithm and the modified program to calculate through the computer was developed. These calculation results can be used during the design, operation and analysis of the existing equipment in heating systems with a tube gas heater.

Keywords: tube gas heaters; calculation; reliability; failure - free operation; quasi two dimensional mathematical model; burnouts

Вступ

При роботі трубчастого газового нагрівача відбувається значне нагрівання лінійної частини нагрівача. Температура поверхні труби коливається в діапазоні 600-1000°C, в залежності від призначення і виконання ТГН.

Умови експлуатації трубчастих газових нагрівачів визначаються можливою високотемпературною корозією їх тонких стінок продуктами згоряння, внаслідок перегріву сталі до високих температур. Такий процес прийнято називати хімічною корозією [1,2]. Зокрема, дефектом трубчастої частини ТГН є перегрів, що призводить до викривлення і прогару стінки.

Зростання температури перегріву спостерігається при затягуванні смолоскипу в початкову ділянку трубчастої частини нагрівача.

При локальній високотемпературній корозії руйнування відбувається на окремих ділянках поверхні, решта поверхні металу не підлягає ушкодженню.

При тривалій роботі нагрівача, під впливом дифузійних процесів, може істотно змінюватися структура, а отже і властивості металу, з якого виготовлений нагрівач. У цих умовах метал також стає менш міцним в результаті окрихчування і графітізації. Таке знеміцнювання лінійної частини нагрівача може призвести до аварійної втрати міцності.

При запусках нагрівача також можуть з'являтися перегриви, за яких температура за короткий проміжок часу може досягати максимальної величини. При цьому відносно тонкі стінки прогріваються швидко і нерівномірно, що може призвести до викривлення температурного поля перед пальником і до відмов роботоздатності внаслідок прогарів.

Під прогарами трубчастих частин нагрівача прийнято розуміти їх розриви на деяких ділянках зі збільшенням діаметра, внаслідок повзучості металу при високих температурах всередині труби. Швидкість корозії, як будь-якої хімічної реакції, залежить від температури. Підвищення температури на 100 °С може збільшити швидкість корозії на кілька порядків. Перегрів знижує жароміцність металу трубчастої частини нагрівача. В результаті зменшується товщина стінки металу всередині нагрівача і підвищується його крихкість. Такі дефекти запобігають підбором жаростійких матеріалів. У зоні високих температур згоряння газу, лінійна частина трубчастих газових нагрівачів може бути виготовлена з жароміцної алюмінізованої сталі або нержавіючої сталі, в залежності від марки сталі [10].

Мета

Найважливішою одиничною властивістю надійності трубчастих газових нагрівачів є безвідмовність. У більшості випадків, частота відмов ТГН здійснюється внаслідок прогарів їх лінійної частини. Як показали експериментальні дослідження, у верхній трубчастій частині нагрівача температури значно вище, ніж в діаметрально-протилежному напрямку. Оцінка відмов роботоздатності нагрівачів з причин прогарів дає можливість ще на стадії конструювання і проектування враховувати розподіл температури як по довжині, так і по периметру поверхні нагрівача.

Метою даної роботи є оцінка ймовірності відмов роботоздатності нагрівача шляхом удосконалення методики його розрахунку. Для досягнення мети необхідно розробити модель теплового та гідравлічного режимів ТГН.

Методика

Трубчаста частина нагрівача являє собою циліндричну оболонку (рис. 1) довжиною l , товщиною стінки δ і внутрішнім діаметром нагрівача d . В результаті експериментальних досліджень були отримані значення температур на внутрішній T_{wi} і зовнішній T_{wo} поверхнях нагрівача в залежності від кутової координати φ .

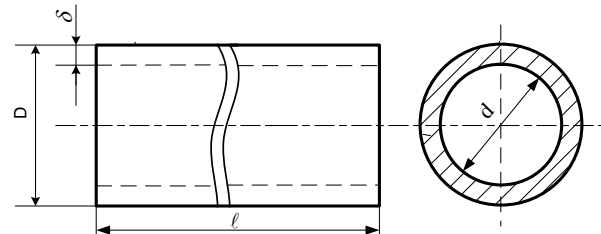
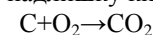


Рис.1. Трубчаста частина нагрівача / Tube part of the heater

В результаті експериментальних досліджень ТГН було встановлено, що розподіл температур по периметру трубчастої частини має різні значення у верхній і нижній зонах нагрівача в залежності від кутової координати і розподіляється по периметру труби нерівномірно, тому що гарячі гази, що утворюються в результаті горіння палива, піднімаються до верхньої частини поверхні.

При горінні палива відбувається швидке високотемпературне окислення металу нагрівача. Наприклад, якщо використовуються у якості палива пелети, то основною масою їх складу є чистий вуглець, який не має стадії піролізу і горить безпосередньо, без синтезу води.

Горіння вуглецю в надлишку кисню:



Щоб паливо згоряло повністю, необхідно виконання двох умов:

- 1) достатня кількість кисню з повітрям;
- 2) достатня температура, щоб всі складові палива добре реагували з цим киснем.

Повітря, що надходить в область горіння, має кімнатну температуру. Надмірне надходження повітря призводить до зниження температури в області горіння, що погіршує процес горіння і призводить до окислення металу трубчастої частини нагрівача. На розвиток цього процесу впливають інтенсивні теплові потоки, що змінюються у часі. Поверхня металу завжди покрита тонким шаром окислів. У певному діапазоні температур цей шар міцно зкріплений з основною масою металу і є щільним. З підвищенням температури нагрівача від газоповітряної суміші, міцність і щільність оксидної плівки (FeO_2 , Fe_2O_3) знижуються. При певній температурі, що характерна для металу трубчастої частини нагрівача, щільність плівки різко падає і кисень безперешкодно проникає до

чистого металу і окислює його. Цей процес називається окалиноутворенням. Окалина утворюється на трубах внаслідок перегріву їх до температур, що значно перевищують розрахункові. Розроблено квазидвовимірну математичну модель гідралічного і теплового режимів газового трубчастого нагрівача [8] на основі експериментальних досліджень являє собою сукупність звичайних диференціальних рівнянь. В процесі моделювання, у підході до використання двовимірної математичної моделі турбулентного горіння в складному каналі [5,6], використовується усереднена по Рейнольдсу система рівнянь Нав'є-Стокса. Емпіричні коефіцієнти, що входять в рівняння газової динаміки, визначати не дуже зручно. Авторами [3,4,7-9] було запропоновано врахувати залежність температури на поверхні нагрівача не тільки від лінійної, але і від кутової координати. На основі розробленої моделі можна вирішувати пряму задачу розрахунку параметрів нагрівача шляхом чисельного інтегрування. Квазидвовимірну математичну модель [7-9] містить рівняння теплообміну і рівняння руху, які представлені у вигляді:

Рівняння теплообміну

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

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

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

$$dQ_{3К} = \frac{D}{2} \int_0^{2\pi} \alpha_2 [T_{wo}(x, \varphi) - T_o] d\varphi dx \quad (4)$$

$$dQ_2 = \frac{D}{2} \frac{\lambda}{\delta} \int_0^{2\pi} [T_{wi}(x, \varphi) - T_{wo}(x, \varphi)] d\varphi dx \quad (5)$$

$$dQ_{1К} + dQ_{1Л} = dQ_2 = dQ_{3К} + dQ_{3Л} \quad (6)$$

$$d(\rho w F C_p T) = -dQ_1 + dQ_0, \text{ при } 0 < x \leq L_f \quad (7)$$

$$dQ_0/dx = Q_0/S_f 2\pi \cdot y_f(x), \text{ при } 0 < x \leq L_f \quad (8)$$

Рівняння руху

$$dp = -A \cdot dx/D \cdot \rho \frac{w^2}{2} + dh \cdot (\rho_a - \rho) \cdot g \quad (9)$$

$$dp = (dp - \rho RdT)/RT \quad (10)$$

$$dw = (-\rho w dF - wF dp/dF) \quad (11)$$

де: $dQ_{1К}$ – тепловий потік, що передається конвекцією від газоповітряної суміші до стінки випромінюючої труби; $dQ_{1Л}$ – тепловий потік, що передається випромінюванням від газоповітряної суміші до стінки випромінюючої труби; dQ_2 – тепловий потік від внутрішньої поверхні стінки нагрівача до зовнішньої поверхні, що передається теплопровідністю; $dQ_{3Л}$ – тепловий потік, що передається випромінюванням від зовнішньої поверхні нагрівача в навколишнє середовище опалювального приміщення; $dQ_{3К}$ – тепловий потік від зовнішньої стінки нагрівача в навколишній простір опалювального приміщення, що передається конвекцією; α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від потоку газоповітряної суміші до стінки нагрівача; α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої стінки в опалювальне приміщення; T , T_{wi} – температура газоповітряної суміші і температура внутрішньої поверхні стінки нагрівача; x – лінійна координата поверхні нагрівача; λ , δ , T_{wo} – відповідно коефіцієнт теплопровідності матеріалу, товщина та температура зовнішньої поверхні стінки нагрівача; D – зовнішній діаметр нагрівача; c_p – теплоємність при постійному тиску газоповітряної суміші; ε_1 – ефективна ступінь чорноти при випромінюванні газоповітряної суміші на внутрішню стінку труби; ε_2 – ефективна ступінь чорноти матеріалу зовнішньої поверхні нагрівача; Q_0 – тепловий потік, що надходить у газоповітряну суміш при згорянні горючого газу; L_f – довжина зони горіння газу, S_f – площа поверхні смолоскипу, y_f – радіус фронту горіння, які можуть бути визначені за допомогою емпіричних рівнянь; ρ – густина газоповітряної суміші; w – середня лінійна швидкість руху газоповітряної суміші по випромінюючій трубі; F – площа поперечного перерізу труби; P , T – абсолютні тиск та температура газоповітряної суміші в даному перерізі випромінюючої труби; R – газова постійна, що залежить від складу газоповітряної суміші після повного згорання горючого газу; dp – перепад тиску газоповітряної суміші у нагрівачі на ділянці довжиною dx ; A – коефіцієнт тертя.

Характерною особливістю моделі є наявність залежності температури поверхні нагрівача не тільки від лінійної, але і від кутової координати.

Розподіл температури по поверхні трубчастої частини ТГН в залежності від кутової координати φ має вигляд:

$$T_{wi} = T_{wi}(x, \varphi), T_{wo} = T_{wo}(x, \varphi) \quad (12)$$

Можна виділити сукупність параметрів, що впливають на розподіл температур по периметру нагрівача за рахунок конвективного руху і залежність (12) представити в наступному вигляді:

$$\theta_{wi} = \theta(\varphi, Gr, Re) \quad (13)$$

де: θ_{wi} – відносна температура внутрішньої поверхні нагрівача.
Відносна температура внутрішньої поверхні виражається у вигляді:

$$\theta_{wi} = \frac{T_{wi}(\varphi)}{T_{wi_{cp}}} \quad (14)$$

Врахування чинників впливу (13) представлено емпіричним шляхом. Наприклад, загальна функціональна залежність між фізичними величинами може мати вигляд:

$$\theta_{wi} = k_{Gr} \cdot k_{Re} \cdot \theta_{wi}(\varphi) \quad (15)$$

У формулі (15) прийняті наступні позначення: k_{Gr} – коефіцієнт впливу числа Грасгофа, k_{Re} – коефіцієнт впливу числа Рейнольдса.

Після перетворення рівняння (15), наприклад, були отримані співвідношення безрозмірного виду: $\theta_{wi} = [1,06 - 0,038 \cdot \varphi] \cdot 1,07 \cdot Gr^{-0,03} \cdot 0,99 \cdot Re^{-0,005}$

$$\cdot 0,99 \cdot Re^{-0,005} \quad (16)$$

Такий розрахунок дає можливість оцінити ймовірність відмов роботоздатності в трубчастій частині нагрівача, за яких можуть виникати прогари.

Результати

Розрахунок розподілу температури по довжині і периметру поверхні нагрівача з використанням квазидвовимірної математичної моделі, показав, що у верхній частині поверхні нагрівача при $\varphi=0^\circ$, температури значно вище, ніж в діаметрально-протилежному напрямку при $\varphi=180^\circ$, а також дозволив отримати дані про вплив розподілу температур по кутовій координаті поверхні нагрівача на його теплові і гідравлічні характеристики.

Наукова новизна і практична значимість

Запропонована квазидвовимірною математичною моделлю допоможе підвищити точність математичного моделювання при дослідженні надійності ТГН, зокрема, врахувати такі властивості як нерівномірність нагріву газоповітряною сумішшю поверхні нагрівача по довжині і по периметру ТГН.

Висновки

На підставі розробленої квазидвовимірної математичної моделі трубчастого газового нагрівача і сформульованої методики розрахунку теплового і гідравлічного режиму роботи нагрівачів, отримана безрозмірна залежність, що описує вплив кутової координати на розподіл температур по периметру трубчастого нагрівача.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Акользин П. А. Коррозия и защита металлов теплоэнергетического оборудования / П. А. Акользин. – Москва: Энергоиздат, 1983. – 302 с.
2. Ивановский В. Н. Теоретические основы процесса коррозии нефтепромыслового оборудования / В. Н. Ивановский // Инженерная практика. – 2010. – №6. – С. 4-14.
3. 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.
4. Иродов В. Ф. Эволюционный поиск решений задач системного анализа у теплоснабжении з трубчастими газовими нагрівачами / В. Ф. Иродов, В. В. Ткачева, Г. Я. Чорноморець // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем / ДНУ ім. О.Гончара. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 81–82.
5. Камалова Г. А. Математическое моделирование газодинамических процессов двухфазной среды в устройствах различной конфигурации / Г. А. Камалова, А. Ж. Найманова // Математический журнал. – 2005. – №1. – С. 52-66.
6. Найманова А. Ж. Математическое моделирование турбулентного горения в сложном канале / А. Ж. Найманова // Математический журнал. – 2009. – №1. – С. 55-64.
7. Ткачова В. В. Индуктивне моделювання трубчастого газового нагрівача та пальника на пелетах / В. В. Ткачова, Р. В. Барсук // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднeпр. гос. акад. стр-ва и архитектуры ; под общ. ред. В. И. Большакова. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 78. – С. 275–281. – (Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении).

8. Ткачева В. В. Квазидвумерная математическая модель теплового и гидравлического режимов трубчатого газового нагревателя / В. В. Ткачева, В. Ф. Иродов // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднeпр. гос. акад. стр-ва и архитектуры ; под общ. ред. В. И. Большакова. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 84. – С. 192–196. – (Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве).
9. Ткачева В. В. Расчет теплового и гидравлического режимов трубчатого газового нагревателя с использованием квазидвумерной математической модели / В. В. Ткачева // Zbiur raportuw naukowych. «Inzynieria i technologia. Osiagniecia naukowe, rozwoj, propozycje» (29.09.2016 – 30.09.2016) - Warszawa, 2016. – pp. 11 – 21.
10. Ульянин Е.А. Коррозионные стойкие стали и сплавы / Е. А. Ульянин. – Москва: Металлургия, 1991. – 256 с.

REFERENCES

1. Akolzin P.A. *Korroziya i zaschita metallov teploenergeticheskogo oborudovaniya* [Corrosion and protection of metals of thermal power equipment]. Moskva: Energoizdat, 1983, 302 p. (in Russian)
2. Ivanovskiy V.N. *Teoreticheskie osnovy protsessa korrozii neftepromyislovogo oborudovaniya* [Theoretical basis of the process of corrosion of oilfield equipment]. Inzhenernaya praktika – *Engineering practice*, 2010, no. 6, pp. 4-14. (in Russian).
3. Dudkin K.V., Tkacheva V.V. and Irodov V.F. *Trubchatye gazovye nagrevateli dlja teplosnabzhenija v selskoj mestnosti* [Tube gas heaters for heat supply in the countryside]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014, 156 p. (in Russian)
4. Irodov V.F., Tkachova V.V. and Chornomorets H.Ya. *Yevoliutsiynyy poshuk rishen zadach sustemnogo analizu u teplopostachanni z trubchastymy gazovymy nagrивachamy* [The evolutionary search for solutions to problems of heat supply systems analysis of tubular gas heaters]. *Matematychna ta programne zabezpechennia intelektualnikh system – Mathematical and software of intelligent systems*, 2015, pp. 81-82. (in Ukrainian).
5. Kamalova G.A. and Naymalova A.Zh. *Matematicheskoe modelirovanie gazodinamicheskikh processov dvuhfaznoj sredy v ustrojstvakh 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. (in Russian).
6. Naymanova 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. (in Russian).
7. Tkachova V.V. and Barsuk R.V. *Induktyvne modeliuвання trubchastoho hazovoho nahrivacha ta palnyka na peletakh* [Inductive modeling of tubular gas heater and burner on pellets] *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie : Sb. nauch. trudov* [Construction, materials science, mechanical engineering : Coll. scientific. works], 2014, issue 78, pp. 275–281. (in Ukrainian).
8. Tkacheva V.V. and Irodov V.F. *Kvazidvumernaya matematicheskaya model teplovogo i gidravlicheskogo rezhimov trubchatogo gazovogo nagrevatelya* [Quasi two-dimensional mathematical model of the thermal and hydraulic regimes of the tube gas heater]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie : Sb. nauch. trudov* [Construction, materials science, mechanical engineering : Coll. scientific. works], 2015, issue 84, pp. 192-196. (in Russian).
9. Tkacheva V.V. *Raschet teplovogo i gidravlicheskogo rezhimov trubchatogo gazovogo nagrevatelya s ispolzovaniem kvazidvumernoy matematicheskoy modeli* [Calculation of the thermal and hydraulic regimes of the tube gas heater using quasi two-dimensional mathematical model]. *Zbiur raportuw naukowych. «Inzynieria i technologia. Osiagniecia naukowe, rozwojm, propozycyj»* [Collection of scientific papers. "Engineering and technology. Scientific advances, development, proposals], (29.09.2016 – 30.09.2016). Warszawa, 2016, pp. 11-21. (in Russian).
10. Ulyanin E.A. *Korroziionnyie stoykie stali i splavy* [Corrosion-resistant steel and alloys]. Moskva: Metallurgiya, 1991, 256 p. (in Russian).

Стаття надійшла в редколегію 09.09.2016