

УДК 697.7 – 027.45

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАЗИДВУМЕРНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА 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 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

^{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) 47-17-22, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

Аннотация. *Цель.* Надежность трубчатых газовых нагревателей недостаточно изучена. Исследование единичного свойства надежности - безотказности, является одним из важных направлений в повышении эффективности проектных решений и качества функционирования. Известна одномерная математическая модель ТГН [1]. Однако эта модель не позволяет учитывать такие свойства как неравномерность нагрева трубчатой части нагревателя. Подход к использованию двумерной математической модели турбулентного горения в сложном канале [3,4] требует довольно громоздкого определения эмпирических показателей. Предложенная авторами квазидвумерная математическая модель [2,6] учитывает зависимость температуры поверхности нагревателя не только от линейной, но и от угловой координат. Расчет, с использованием последней модели, позволит получить экспериментальные зависимости для дальнейшего изучения вопросов надежности. **Методика.** Квазидвумерная математическая модель ТГН состоит из двух групп уравнений – уравнений теплообмена и уравнений движения. К этой группе уравнений следует добавить уравнение связи распределения температуры по поверхности трубчатой части ТГН в зависимости от угловой координаты. Это уравнение, по нашему мнению, целесообразно определить по результатам экспериментальных исследований. В результате экспериментов варьируются такие параметры как расход, диаметр, а зависимость представляется в безразмерном виде. **Результаты.** Разработанная методика расчета теплового и гидравлического режимов ТГН позволяет получить распределение температур как по длине, так и по периметру поверхности нагревателя. В частности можно получать значения температур в верхней части поверхности нагревателя, которые значительно выше, чем в диаметрально-противоположном направлении. **Научная новизна.** В статье показано, что квазидвумерную математическую модель с эмпирической зависимостью распределения температур по параметрам можно использовать для расчета распределения температур поверхности нагревателя. **Практическая значимость.** Такой расчет позволяет оценивать возможность появления отказов вследствие перегрева поверхности ТГН, при котором могут возникать прогары его линейной части.

Ключевые слова: трубчатые газовые нагреватели; расчет; надежность; безотказность; квазидвумерная математическая модель; система уравнений

ВИКОРИСТАННЯ КВАЗИДВОВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛООВОГО І ГІДРАВЛІЧНОГО РЕЖИМІВ ТРУБЧАТОГО ГАЗОВОГО НАГРІВАЧА

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

^{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

^{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.* Надійність трубчастих газових нагрівачів недостатньо вивчена. Дослідження одиничної властивості надійності - безвідмовності, є одним з важливих напрямків у підвищенні ефективності проектних рішень та якості функціонування. Відома одновимірною математичною моделлю ТГН [1]. Але ця модель не дозволяє враховувати такі властивості як нерівномірність нагріву трубчастої частини нагрівача. Підхід до використання двовимірної математичної моделі турбулентного горіння в складному каналі [3,4] вимагає досить громіздкого визначення емпіричних показників.

Запропонована авторами квазидвовимірна математична модель [2,6] враховує залежність температури поверхні нагрівача не тільки від лінійної, але і від кутової координат. Розрахунок, з використанням останньої моделі, дозволить отримати експериментальні залежності для подальшого вивчення питань надійності. **Методика.** Квазидвовимірна математична модель ТГН складається з двох груп рівнянь - рівнянь теплообміну і рівнянь руху. До цієї групи рівнянь слід додати рівняння зв'язку розподілу температури по поверхні трубчастої частини ТГН в залежності від кутової координати. Це рівняння, на нашу думку, доцільно визначити за результатами експериментальних досліджень. В результаті експериментів варіюються такі параметри як витрата, діаметр, а залежність представляється в безрозмірному вигляді. **Результати.** Розроблена методика розрахунку теплового і гідравлічного режимів ТГН дозволяє отримати розподіл температур як по довжині, так і по периметру поверхні нагрівача. Зокрема можна отримувати значення температур у верхній частині поверхні нагрівача, які значно вище, ніж в діаметрально-протилежному напрямку. **Наукова новизна.** У статті показано, що квазидвовимірну математичну модель з емпіричною залежністю розподілу температур по параметрам можна використовувати для розрахунку розподілу температур поверхні нагрівача. **Практична значимість.** Такий розрахунок дозволяє оцінювати можливість появи відмов внаслідок перегріву поверхні ТГН, при якому можуть виникати прогари його лінійної частини.

Ключові слова: трубчасті газові нагрівачі; розрахунок; надійність; безвідмовність; квазидвовимірна математична модель; система рівнянь

USING QUASI TWO-DIMENSIONAL MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATION OF THE THERMAL AND HYDRAULIC MODES TUBE GAS HEATER

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

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. Tube gas heaters reliability (TGH) poorly understood. Study unit property of reliability - failure – free operation is one of the important areas to improve the efficiency of design solutions and quality performance. Known dimensional mathematical model (TGH) [3]. However, this model does not take into account properties such as the irregularity of heating of the tube heater. The approach to the use of two-dimensional mathematical model of turbulent combustion in complex channel [5,6] requires rather cumbersome definition of empirical indicators. The proposed by the authors quasi-two-dimensional mathematical model [4,8] takes into account the dependence of the surface temperature of the heater not only linear, but also on the angular coordinates. The calculation using the latest model will provide the experimental dependence for further study of the issues of reliability. **Methodology.** Quasi two-dimensional mathematical model TGH consists of two groups of equations - heat transfer equations and the equations of motion. The equation of the temperature distribution on the surface of the tubular connection part TGH depending on the angular coordinate should be added to the equations of this group. This equation, in our opinion, is expedient to determine the results of experimental studies. The experiments have vary parameters such as flow rate, diameter and dependence is represented in a dimensionless form. **Findings.** The method of calculation of the thermal and hydraulic modes TGH allows you to take a temperature distribution along the length and along the perimeter surface of the heater. In particular temperature values may be obtained in the upper part of the heater surface which is considerably higher than the diametrically opposite direction. **Originality.** The article shows that the quasi two-dimensional mathematical model of the empirical distribution of temperature with dependence of the parameters used to calculate the surface temperature distribution of the heater. **Practical value.** This calculation makes it possible to evaluate the possibility of failure due to overheating of the surface of the TGH, which may appear burnouts of its linear part.

Keywords: tube gas heaters; calculation; reliability; failure – free operation; quasi two dimensional mathematical model; systems of equations

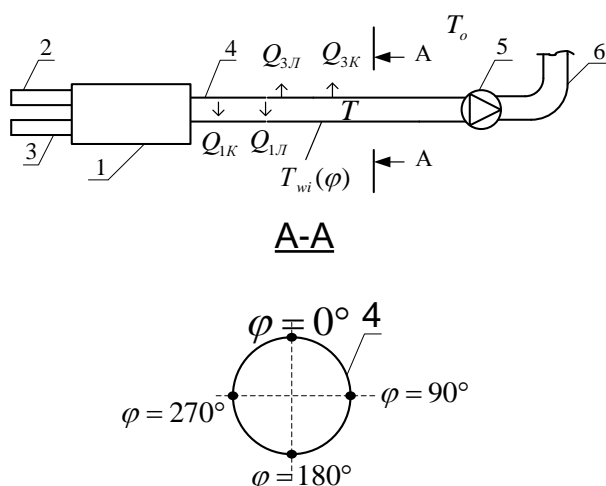
Введение

Надежность является одним из приоритетных показателей, учитываемых на этапах проектирования, реконструкции и эксплуатации трубчатых газовых нагревателей (рис 1).

В настоящее время существует целый ряд нерешенных задач повышения надежности трубчатых газовых нагревателей (ТГН). Одним из недостатков ТГН является неравномерность нагрева горелками

труб по длине и периметру и, следовательно, снижение их срока службы и надежности трубчатой части нагревателя, вследствие перегрева поверхности трубы нагревателя, при котором могут возникнуть деформации и прогары стенок. Эти процессы возникают в линейной части жаровых труб от высоких температур газов внутри трубы. Как показали экспериментальные исследования ТГН, большие перепады имеют температуры по периметру поверхности линейной части нагревателя.

Для повышения эффективности проектных решений и качества функционирования трубчатых газовых нагревателей, для расчетов целесообразно использовать квазидвумерную математическую модель [2,6], разработанную на основе экспериментальных данных. Важнейшим исследуемым параметром безотказной работы ТГН является распределение температуры поверхности трубы, как по длине, так и по периметру поверхности нагревателя.



A-A

Рис.1. Принципиальная схема трубчатого газового нагревателя: / Schematic diagram of the tube gas heater:

- 1 – pelletная горелка; 2 – трубчатая часть нагревателя; 3 – вытяжной вентилятор;
- 4 – патрубок удаления отработанных продуктов сгорания. / 1 – pellet burner; 2 – tube part of the heater;
- 3 – extractor fan;
- 4 – removing exhaust pipe of the combustion products.

Цель

Известна одномерная математическая модель ТГН [1]. В этом случае течение и теплообмен – стационарные процессы и параметры газовой смеси зависят лишь от одной продольной координаты вдоль нагревателя. Эта модель не позволяет учитывать такие свойства как неравномерность нагрева трубчатой части нагревателя. В подходе к использованию двумерной математической модели турбулентного горения в сложном канале [3,4], в процессе моделирования, используется осредненная по Рейнольдсу система уравнений Навье-Стокса. Эмпирические коэффициенты, входящие в уравнение газовой динамики определять не очень удобно, довольно громоздко. Авторами [2,5-7] было предложено учесть зависимость температуры на поверхностях нагревателя не только от линейной, но и от угловой координаты.

Методика

Квазидвумерная математическая модель [2,6] содержит уравнения теплообмена и уравнения движения, которые представлены в виде:

Уравнения теплообмена

$$dQ_{1Л} = \frac{D}{2} c_0 \int_0^{2\pi} \epsilon_1 [T^4 - T_{wi}^4(x, \varphi)] d\varphi \quad (1)$$

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

$$dQ_{3Л} = \frac{D}{2} c_0 \int_0^{2\pi} \epsilon_2 [T_{wo}^4(x, \varphi) - T_o^4] d\varphi dx 10^{(-8)} \quad (3)$$

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

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

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

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

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

Уравнения движения

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

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

$$dw = (-\rho w dF - wFd p F dF) \quad (11)$$

где: dQ_1 – тепловой поток, передаваемый от газовой смеси к трубе; $dQ_{1Л}$ – тепловой поток, передаваемый излучением от газовой смеси к трубе; $dQ_{1К}$ – тепловой поток, передаваемый конвекцией от газовой смеси к трубе; dQ_2 – тепловой поток, передаваемый теплопроводностью через стенку трубы; $dQ_{3Л}$ – тепловой поток, передаваемый излучением от стенки трубы в окружающее пространство, $dQ_{3К}$ – 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; x – линейная координата поверхности нагревателя; λ, δ – соответственно коэффициент

теплопроводности материала стенки, толщина; D – наружный диаметр нагревателя; c_p – изобарная теплоемкость газозвдушной смеси; ε_1 – эффективная степень черноты при излучении газозвдушной среды на внутреннюю стенку трубы; ε_2 – эффективная степень черноты материала наружной поверхности нагревателя; 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; ρ – плотность газозвдушной смеси; w – средняя линейная скорость движения газозвдушной смеси по излучающей трубе; F – площадь поперечного сечения трубы; P, T – абсолютные давление и температура газозвдушной смеси в данном сечении излучающей трубы; R – газовая постоянная, зависящая от состава газозвдушной смеси после полного сгорания горючего газа; dp – перепад давления газозвдушной смеси на участке длиной dx ; A – коэффициент трения.

К этой группе уравнений следует добавить уравнение связи распределения температуры по поверхности трубчатой части ТГН в зависимости от угловой координаты:

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

где: φ – угловая координата поверхности нагревателя, T_{wi} – абсолютная температура внутренней поверхности нагревателя, T_{wo} – абсолютная температура наружной поверхности нагревателя.

В зависимости (12) можно выделить совокупность параметров, влияющих на распределение температур по периметру нагревателя за счет конвективного движения и представить в следующем виде:

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

где: θ_{wi} – относительная температура внутренней поверхности нагревателя.

Относительную температуру внутренней поверхности можно выразить в виде:

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

Учет факторов (13) можно представить эмпирическим путем, например, общая функциональная зависимость между физическими величинами может иметь вид:

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

Это уравнение, по нашему мнению, целесообразно определить по результатам экспериментальных исследований, в ходе которых варьируются такие параметры: объемный расход газа; внутренний диаметр, толщина стенки и длина

трубы-излучателя, а зависимость представляется в безразмерном виде.

После преобразования уравнения (15), например, можно получить соотношение безразмерного вида:

$$\theta_{wi} = [1,06 - 0,038 \cdot \varphi] \cdot 1,07 \cdot Gr^{-0,03} \cdot 0,99 \cdot Re^{-0,005} \quad (16)$$

В представленных формулах приняты следующие обозначения: k_{Gr} – коэффициент влияния числа Грасгофа, k_{Re} – коэффициент влияния числа Рейнольдса.

Для проведения расчета необходимо знать только температуру газозвдушной смеси $T_{wi, cp}$, которая определяется из условия баланса тепла (6) на каждом шаге интегрирования.

Такой расчет можно произвести с помощью алгоритма [1], модификация которого позволяет учесть факторы влияния распределения температур не только по линейной, но и по угловой координатам поверхности нагревателя. В соответствующих пунктах программы необходимо рассчитать суммарные конвективные и лучистые составляющие теплового потока по периметру нагревателя.

В качестве примера (табл. 1) представлено решение задачи расчета линейного нагревателя с учетом распределения температуры по его периметру в зависимости от угловой координаты. Для этого, условно, нагреватель был разделен по периметру на 4 равные части.

Таблица 1

Результаты расчета задачи распределения температуры по периметру нагревателя / The results of calculation of task of the temperature distribution around heater's perimeter

Длина нагревателя, $l, \text{м}$	Температуры по периметру нагревателя, °C		
	при $\varphi=0^\circ$	при $\varphi=90^\circ$, $\varphi=270^\circ$	при $\varphi=180^\circ$
0,5	175	155	145
1	340	300	282
1,5	467	412	388
2	385	339	319
2,5	320	282	265
3	275	242	228
3,5	241	212	200
4	214	189	178
4,5	192	170	160
5	175	154	145
5,5	159	140	132
6	146	129	121
6,5	135	119	112

Продолжение таблицы 1

Длина нагревателя, ζ , м	Температуры по периметру нагревателя, °С		
	при $\varphi=0^\circ$	при $\varphi=90^\circ$, $\varphi=270^\circ$	при $\varphi=180^\circ$
7	124	110	103
7,5	116	102	96
8	108	95	90
8,5	100	88	83
9	94	83	78
9,5	88	77	73
10	83	73	69
10,5	78	69	65
11	74	65	61
11,5	70	61	58
12	66	58	55

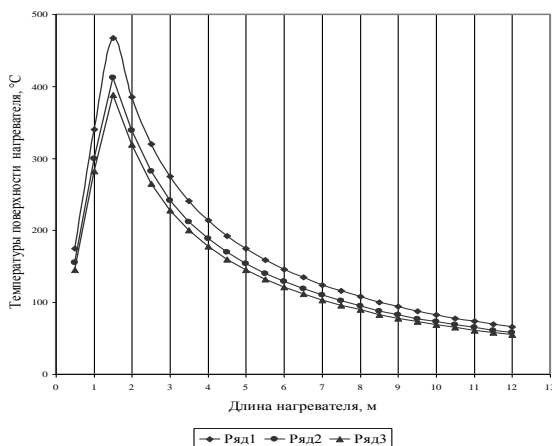


Рис. 2. График распределения температуры поверхности нагревателя по его периметру: / Graph of surface temperature distribution of the heater around its perimeter:

Ряд 1 – температуры поверхности нагревателя при $\varphi = 0^\circ$;
Ряд 2 – температуры поверхности нагревателя при $\varphi = 90^\circ$;
Ряд 3 – температуры поверхности нагревателя при $\varphi = 180^\circ$. / Row 1 – temperature of the heater surface at $\varphi = 0^\circ$;

Row 2 temperature of the heater surface at $\varphi = 90^\circ$; Row 3 – temperature of the heater surface at $\varphi = 180^\circ$.

Результаты расчета показывают, что в верхней части поверхности нагревателя при $\varphi = 0^\circ$, температуры значительно выше, чем в диаметрально-противоположном направлении при $\varphi = 180^\circ$.

Результаты

Разработанный алгоритм решения задачи теплового и гидравлического расчета нагревателя при известных начальных параметрах позволяет получать данные о влиянии распределения температур по угловой координате поверхности нагревателя на его тепловые и гидравлические характеристики.

Научная новизна и практическая значимость

Квазидвумерную математическую модель с эмпирической зависимостью (16) можно использовать для расчета распределения температур, как по длине, так и по периметру поверхности нагревателя. Такой расчет позволяет оценивать возможность появления отказов вследствие нагрева и прогаров поверхности нагревателя.

Выводы

На основании разработанной квазидвумерной математической модели трубчатого газового нагревателя экспериментально получена зависимость, которая описывает влияние угловой координаты на распределение температур по периметру трубчатого нагревателя. Сформулирована задача расчета теплового и гидравлического режимов работы нагревателей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. Иродов В. Ф. Еволюційний пошук рішень задач системного аналізу у теплопостачанні з трубчастими газовими нагрівачами / В. Ф. Иродов, В. В. Ткачова, Г. Я. Чорноморець // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем / ДНУ ім. О.Гончара. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 81–82.
3. 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.
4. Найманова А. Ж. Математическое моделирование турбулентного горения в сложном канале / А. Ж. Найманова // Математический журнал. – 2009. – №1. – С. 55-64.
5. Ткачова В. В. Індуктивне моделювання трубчастого газового нагрівача та пальника на пелетах / В. В. Ткачова, Р. В. Барсук // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Придн. 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).
6. Ткачева В. В. Квазидвумерная математическая модель теплового и гидравлического режимов трубчатого газового нагревателя / В. В. Ткачова, В. Ф. Иродов // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Придн. 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).

7. 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.

REFERENCES

1. Dudkin K.V., Tkacheva V.V. and Irodov V.F. *Trubchatye gazovye nagrevateli dlya teplosnabzheniya v selskoy mestnosti* [Tube gas heaters for heat supply in the countryside]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014, 156 p. (in Russian)
2. Irodov V.F., Tkachova V.V. and Chornomorets H.Ya. *Evolutsiynyy poshuk rishen zadach sistemnogo analizu u teplopostachanni z trubchastymy hazovymy nahrivachamy* [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).
3. Kamalova G.A. and Naymalova A.Zh. *Matematicheskoe modelirovanie gazodinamicheskikh protsessov dvukhfaznoy sredy v ustroystvakh razlichnoy konfiguratsii* [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).
4. 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).
5. 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).
6. Tkacheva V.V. and Irodov V.F. *Kvazidvumernaya matematicheskaya model teplovogo i gidravlicheskogo rezhimov trubчатого газового нагревателя* [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).
7. Tkacheva V.V. *Raschet teplovogo i gidravlicheskogo rezhimov trubчатого газового нагревателя 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, propozycj» [Collection of scientific papers. "Engineering and technology. Scientific advances, development, proposals], (29.09.2016 – 30.09.2016). Warszawa, 2016, pp. 11-21. (in Russian).