

УДК 519.6

## МАТЕМАТИЧНЕ ТА ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ТРУБЧАСТИХ ГАЗОВИХ НАГРІВАЧІВ, РОЗТАШОВАНИХ У БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

ЧОРНОМОРЕЦЬ Г. Я. <sup>1\*</sup>, асп.,ПРОДОВ В. Ф. <sup>2</sup>, д. т. н., проф.

<sup>1\*</sup> Кафедра теплотехніки і газопостачання, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-17-22, e-mail: ChHYa@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4964-5785

<sup>2</sup> Кафедра теплотехніки і газопостачання, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-17-22, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

**Анотація. Постановка проблеми.** Для проектування і конструювання трубчастих газових нагрівачів у будівельних конструкціях необхідно розв'язати задачі аналізу та синтезу такої системи опалення. Математична модель даної системи складається з: математичної моделі самого трубчастого газового нагрівача як гідравлічного ланцюга, математичної моделі розповсюдження тепла в будівельній конструкції і відповідних граничних умов, які їх пов'язують. Для розв'язання задач аналізу та синтезу необхідне відповідне математичне та інформаційне забезпечення. **Мета статті** - виклад розробленого математичного та інформаційного забезпечення, які дозволяють розв'язувати задачі аналізу та синтезу систем опалення з трубчастими газовими нагрівачами, розташованими у будівельних конструкціях. **Висновок.** Математичне забезпечення включає в себе розробку алгоритмів і програм для числового розв'язання задач аналізу та синтезу розглянутої системи опалення. Інформаційне забезпечення включає весь необхідний набір параметрів, що характеризують теплофізичні властивості матеріалів, які застосовуються в системі опалення, і параметрів, що характеризують теплообмін між теплоносієм і елементами системи опалення. Розроблено алгоритми розв'язання задач аналізу та синтезу системи опалення з трубчастими газовими нагрівачами, розташованими в будівельних конструкціях, засновані на еволюційному пошуку найбільш переважних рішень, і відповідне програмне забезпечення. Виконано експериментальне дослідження й отримано результати, що дозволяють розраховувати теплопередачу від газоповітряної суміші до граничної поверхні будівельної конструкції, що дозволить отримати повне інформаційне забезпечення для розв'язання задач аналізу та синтезу системи опалення. Розроблене математичне та програмне забезпечення дозволяє розв'язувати задачі аналізу та синтезу систем опалення з трубчастими газовими нагрівачами, розташованими в будівельних конструкціях. Трубчасті газові нагрівачі розташовані у будівельних конструкціях дозволяють з невеликими капітальними витратами забезпечити опалення приміщень. Для якісного проектування таких систем необхідно розв'язувати задачі аналізу (розрахунку) та синтезу (проектування та керування режимами).

**Ключові слова:** трубчасті нагрівачі; будівельні конструкції; математична модель; алгоритм еволюційного пошуку

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРУБЧАТЫХ ГАЗОВЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

ЧЕРНОМОРЕЦ Г. Я. <sup>1\*</sup>, асп.,ПРОДОВ В. Ф. <sup>2</sup>, д. т. н, проф.

<sup>1\*</sup> Кафедра теплотехники и газоснабжения, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-17-22, e-mail: ChHYa@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4964-5785

<sup>2</sup> Кафедра теплотехники и газоснабжения, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-17-22, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

**Аннотация. Постановка проблемы.** Для проектирования и конструирования трубчатых газовых нагревателей в строительных конструкциях необходимо решить задачи анализа и синтеза такой системы отопления. Математическая модель данной системы состоит из: математической модели самого трубчатого газового нагревателя как гидравлической цепи, математической модели распространения тепла в строительной конструкции и соответствующих граничных условий, которые их связывают. Для решения задач анализа и синтеза необходимо соответствующее математическое и информационное обеспечение. **Цель работы** - изложение разработанного математического и информационного обеспечения, которое позволяет решать задачи

анализа и синтеза систем отопления с трубчатыми газовыми нагревателями, расположенными в строительных конструкциях. **Вывод.** Математическое обеспечение включает в себя разработку алгоритмов и программ для численного решения задач анализа и синтеза рассматриваемой системы отопления. Информационное обеспечение включает весь необходимый набор параметров, характеризующих теплофизические свойства материалов, применяемых в системе отопления, и параметров, характеризующих теплообмен между теплоносителем и элементами системы отопления. Разработаны алгоритмы решения задач анализа и синтеза системы отопления с трубчатыми газовыми нагревателями, расположенными в строительных конструкциях, основанные на эволюционном поиске наиболее предпочтительных решений, и соответствующее программное обеспечение. Выполнено экспериментальное исследование и получены результаты, позволяющие рассчитывать теплопередачу от газоздушной смеси до граничной поверхности строительной конструкции, что позволит получить полное информационное обеспечение для решения задач анализа и синтеза системы отопления. Разработанное математическое и программное обеспечение позволяет решать задачи анализа и синтеза систем отопления с трубчатыми газовыми нагревателями, расположенными в строительных конструкциях. Трубчатые газовые нагреватели, расположенные в строительных конструкциях, позволяют с небольшими капитальными затратами обеспечить отопление помещений. Для качественного проектирования таких систем необходимо решать задачи анализа (расчета) и синтеза (проектирование и управление режимами).

**Ключевые слова:** *трубчатые нагреватели; строительные конструкции; математическая модель; алгоритм эволюционного поиска*

## MATHEMATICAL AND INFORMATION SUPPORT FOR CALCULATION AND DESIGN OF TUBE GAS HEATERS LOCATED IN STRUCTURES

CHORNOMORETS H. Y. <sup>1\*</sup>, P. G.,  
IRODOV V. F. <sup>2</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.

<sup>1\*</sup> Department of Heat Technique and Gas Supply, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phon. +38 (0562) ) 47-17-22, e-mail: ChHYa@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4964-5785

<sup>2</sup> Department of Heat Technique and Gas Supply, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phon. +38 (0562) ) 47-17-22, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

**Abstract. Raising of problem.** For the design and construction of tube gas heaters in building structures to need solve the problems of analysis and synthesis of such heating system. The mathematical model of this system is consists of: mathematical model of the tube gas heater, mathematical model of heat distribution in the building structure and corresponding boundary conditions. To solve the tasks of analysis and synthesis must be appropriate mathematical and information support. **Purpose.** The purpose of this paper is to describe the developed mathematical and information support that solve the problems of analysis and synthesis of heating systems with gas tube heaters, located in building constructions. **Conclusion.** Mathematical support includes the development of algorithms and software for the numerical solution of problems analysis and synthesis heating system. Information support includes all the necessary parameters characterizing the thermal properties of materials which used in the heating system, and the parameters characterizing the heat exchange between the coolant and components of the heating system. It was developed algorithms for solving problems of analysis and synthesis heating system with tube gas heater located in structures to use evolutionary search algorithm and software. It was made experimental study and was obtained results allow to calculate the heat transfer from the gas-air mixture to the boundary surface of the building structure. This results and computation will provide full information support for solving problems of analysis and synthesis of the heating system. Was developed mathematical and software support, which allows to solve the problems of analysis and synthesis heating systems with gas tube heaters, located in building structures. Tube gas heaters located in the building structures allows with small capital expenditures to provide space heating. Is necessary to solve the problems of analysis (calculation) and synthesis (design and management regimes) for high-quality design of such systems.

**Keywords:** *tube heaters; building structures; mathematical model; evolutionary search algorithm*

**Постановка проблеми.** Трубчасті газові нагрівачі, розташовані у будівельних конструкціях – це автономна система як опалення, так і теплопостачання. Канали можуть розташовуватись у підлозі, стелі або стінах. Для розроблення та проектування цих нагрівачів необхідно мати їх інформаційне та математичне забезпечення.

**Аналіз публікацій.** Променисті трубчасті нагрівачі досить широко застосовуються у виробничих приміщеннях, торгових приміщеннях, на складах, у спортивних та виставкових залах тощо [2]. Порівняно з традиційними системами повітряного та водяного опалення використання таких нагрівачів дозволяє знизити споживання палива та

зменшити витрати на обігрів приміщень [1; 10].

Один із варіантів променевого опалення - це розміщення каналів трубчастих нагрівачів у суцільному середовищі, наприклад, у будівельній конструкції. На основі математичних моделей трубчастих газових нагрівачів [3; 4; 6; 19] у технічному рішенні [14] наведено математичну модель трубчастих нагрівачів у будівельній конструкції. У праці [11] описано вибір раціональних параметрів проектування такої системи, де у результаті еволюційного випадкового пошуку найбільш переважних рішень [7; 8] були визначені оптимальні товщини верхньої кришки трубчастого нагрівача, які забезпечують близьку до постійної величини температуру зовнішньої поверхні.

Розроблено розрахунок теплообміну між газоповітряною сумішшю в каналі будівельної конструкції трубчастого нагрівача і опалюваним простором [12]. У праці [13] аналітичним методом перевірено теплопередачу від газоповітряної суміші на поверхню будівельної конструкції каналу. Наведено методику експериментальних досліджень трубчастих нагрівачів у будівельних конструкціях [15]. Для підтвердження економічної доцільності використання трубчастих нагрівачів, розташованих у просторі будівельної конструкції, розроблено техніко-економічне порівняння даної системи з традиційною водяною системою опалення. Результати порівняння підтвердили переваги використання трубчастих нагрівачів у будівельних конструкціях [16].

У результаті проведених досліджень для розрахунків та проектування трубчастого нагрівача, розташованого у будівельній конструкції, виявилось недостатнім математичне та інформаційне забезпечення. Наприклад, наявність результатів експериментального дослідження даної системи, які б підтвердили проведені розрахунки.

**Мета статті** полягає в тому, щоб навести методи розрахунку та результати експериментальних досліджень трубчастих газових нагрівачів у будівельних конструкціях для їх проектування та подальшого дослідження.

**Виклад основного матеріалу.** Трубчастий нагрівач, розташований всередині будівельної конструкції, має просту конструкцію. Розміщення каналів газоповітряної суміші у будівельній конструкції підлоги (план та розріз каналу) наведено на рисунку 1.

Принцип роботи даного пристрою такий самий, як і трубчастого нагрівача, вільно розташованого в опалюваному просторі. Продукти згоряння палива з пальника надходять до каналів трубчастого нагрівача. Канали передають тепло зі своєї поверхні в будівельну конструкцію, а звідти в опалюване середовище.

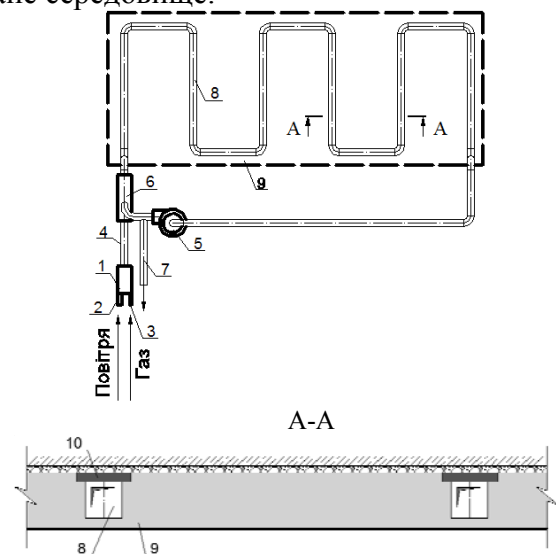


Рис. 1. Трубчастий газовий нагрівач, розміщений у підлозі /

*Tube gas heater located in the floor:*

- 1 - газовий пальник; 2 - патрубок подачі повітря;
- 3 - патрубок подачі газу; 4 - початкова ділянка лінійного нагрівача в теплоізоляції; 5 - витяжний вентилятор;
- 6 - ежектор; 7 - патрубок відводу газоповітряної суміші;
- 8 - канали газоповітряної суміші;
- 9 - конструкція підлоги; 10 - бетонна пласина.

Спираючись на [14], математичну модель гідравлічних і теплових режимів даної системи опалення можна навести у вигляді:

Рівняння збереження маси:

$$G = \rho w F = \text{const}, \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність газоповітряної суміші,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $w$  – середня лінійна швидкість руху газоповітряної суміші всередині каналу,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $F$  – площа поперечного перерізу каналу,  $\text{м}^2$ .

Рівняння стану газоповітряної суміші у вигляді рівняння стану ідеального газу:

$$p = \rho R T, \quad (2)$$

де  $p, T$  – абсолютні тиск та температура газоповітряної суміші в даному перетині каналу, Па, К;  $R$  – газова постійна, залежна від складу газоповітряної суміші після повного згоряння горючого газу, Дж/кг К.

Рівняння руху газоповітряної суміші усередині випромінюючої труби:

$$dp = -A \cdot dz/D \cdot \rho \frac{w^2}{2}, \quad (3)$$

де  $dp$  – перепад тиску газоповітряної суміші у каналі на ділянці довжиною  $dz$ ;  $A$  – коефіцієнт тертя;  $D$  – внутрішній еквівалентний діаметр каналу, м.

Рівняння теплового балансу для каналу трубчастого нагрівача починаючи від перетину повного згоряння горючого газу до витяжного вентилятора.

Тепловий потік від газоповітряної суміші до внутрішньої стінки каналу, Вт:

$$dQ = k \cdot (T - T_{wi}) \cdot dS, \quad (4)$$

де:  $k$  – коефіцієнт теплопередачі теплоти від газоповітряної суміші на внутрішню поверхню будівельної конструкції, Вт/м<sup>2</sup>°С;  $T_{wi}$  – температура поверхні внутрішньої стінки будівельного каналу, К;  $dS$  – площа теплообмінної поверхні, м<sup>2</sup>.

Рівняння розподілу тепла у будівельній конструкції наведено рівнянням теплопровідності з відповідними граничними умовами у вигляді:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0, \quad (5)$$

де:  $\theta$  – температура всередині конструкції, К;  $x$  та  $y$  – лінійні координати у перетині.

Граничні умови для (5) мають вигляд:

$$k(T - T_{wi}) = -\lambda \left( \frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_w \text{ при } 0 < x < l_w; 0 < y < h_w, \quad (6)$$

де:  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу будівельної конструкції, Вт/м К;  $\left( \frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_w$  – проекція градієнта температури за напрямком нормалі до стінки будівельної конструкції;  $l_w$  – ширина будівельної конструкції, м;  $h_w$  – висота будівельної конструкції, м.

Зміна теплової енергії потоку газоповітряної

суміші, що рухається:

$$d(\rho w F C_p T) = -dQ, \quad (7)$$

де:  $C_p$  – теплоємність газоповітряної суміші при постійному тиску, Дж/кг К.

Для інформаційного забезпечення необхідно визначити значення коефіцієнта теплопередачі  $k$ . Коефіцієнт теплопередачі був визначений у результаті експериментальних досліджень цієї системи опалення.

На рисунку 2 показано вигляд експериментальної установки.



Рис.2. Вигляд експериментальної установки / View of the experimental device

У конструкції розташований металевий нагрівач, над нагрівачем є верхня кришка у вигляді будівельної пластини, яка повинна забезпечувати близьку до постійної величини температуру зовнішньої поверхні нагрівача.

Фізичні величини, які визначають процес теплообміну між газоповітряною сумішшю в каналі будівельної конструкції і повітряним середовищем опалюваного приміщення, виступають:  $T$  – температура в каналі газоповітряної суміші;  $T_{wi}$  – температура знизу пластини;  $T_{we}$  – температура на поверхні пластини;  $G_{нов}$  – витрата припливного повітря;  $G_n$  – витрата палива;  $w$  – середня лінійна швидкість руху газоповітряної суміші всередині каналу, м/с.

Визначення функціональної залежності між фізичними величинами, що описують процес теплообміну:

$$k = f(T, T_{wi}, T_{we}, S, Q) \quad (8)$$

Вказані фізичні величини пов'язані між собою певними співвідношеннями. Деякі із цих параметрів у даному процесі можуть бути змінними, інші – постійними.

За даними експериментальних досліджень розраховано середній коефіцієнт теплопередачі теплоти від газоповітряної сумі-

ші на внутрішню поверхню будівельної пластини, Вт/м<sup>2</sup>°С:

$$k = \frac{Q}{\Delta T S}, \quad (9)$$

де:  $S$  – площа теплообмінної поверхні каналу, м<sup>2</sup>;  $Q$  – середній тепловий потік від газоповітряної суміші в каналі будівельної конструкції на поверхню бетону, Вт;  $\Delta T$  – середнє значення різниці температур газоповітряної суміші і внутрішньої поверхні будівельної пластини, °С.

Спираючись на [5; 9; 17; 18; 20], провели обробку результатів експериментального дослідження. При цьому виконувалитаке:

- оцінювання середнього значення:

$$X_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i; \quad (10)$$

- оцінювання стандартного відхилення:

$$S(X_{cp}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (X_k - X_{cp})^2}{(n-1)}}; \quad (11)$$

- обчислення оцінки середнього квадратичного відхилення результату вимірювання:

$$S_a(X_{cp}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (X_k - X_{cp})^2}{n \cdot (n-1)}}; \quad (12)$$

- обчислення двобічного довірчого інтервалу для середнього значення:

$$X_{cp} - \frac{t}{\sqrt{n}} S_a(X_{cp}) < m < X_{cp} + \frac{t}{\sqrt{n}} S_a(X_{cp}); \quad (13)$$

$$\Delta \partial = t \cdot S_a(X_{cp}). \quad (14)$$

За даними серії експериментальних досліджень розраховано середній коефіцієнт теплопередачі теплоти від газоповітряної суміші крізь стінку металевого каналу на внутрішню поверхню будівельної конструкції  $k$ , Вт/м<sup>2</sup>°С:

$$k = X_{cp} \pm \Delta \partial = 6,64 \pm 0,26, (P_0 = 0,95; n = 11).$$

Результати експериментального дослідження системи опалення з трубчастими газовими нагрівачами, розташованими у будівельній конструкції, показали, що з часом температура газоповітряної суміші в середині будівельного каналу зростає і разом із нею зростає температура на поверхні будівельної пластини, що підтверджує можливість використання даного технічного рішення на практиці. Розподіл температур показано на рисунку 3.

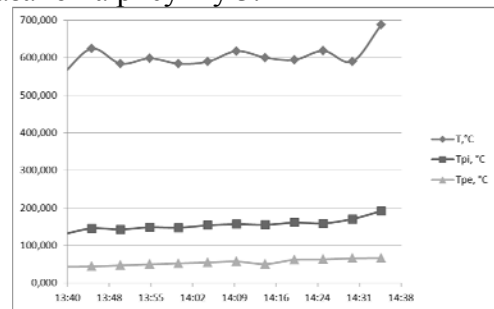


Рис.3. Графік зміни температур у процесі нагрівання Graphotemperature distribution

**Висновок.** Наведено математичну модель гідравлічного і теплового режимів газового трубчастого нагрівача у будівельній конструкції, яку показано у вигляді звичайних диференціальних рівнянь. Наведено результати експериментального дослідження даного трубчастого нагрівача. Рівномірний прогрів будівельної конструкції підтверджує можливість використання такої системи опалення для обігріву приміщень.

Застосування математичної моделі і результатів експериментального дослідження у розрахунках допоможе поліпшити якість проектних робіт і конструювання трубчастих нагрівачів, розташованих у будівельних конструкціях.

## ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Богуславский Л. Д. Экономика теплогазоснабжения и вентиляции / Л. Д. Богуславский, А. А. Симонова, М. Ф. Митин. – Москва : Стройиздат, 1988. – 351 с.
2. Болотских Н. Н. Энергоэффективная система инфракрасного обогрева производственных помещений с большими внутренними площадями / Н. Н. Болотских // Науковий вісник будівництва : зб. наук. пр. / Харків. нац. ун-т буд-ва та архітектури. – Харків, 2012. – Вип. 69. – С. 361–371.
3. Многоконтурные трубчатые газовые нагреватели как средства повышения безопасности воздушно-лучистого отопления / К. В. Дудкин, Ю. В. Хацкевич, Л. В. Солод, Г. Я. Черноморец // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднпр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2011. – Вип. 62. – С. 161–165. – (Безопасность жизнедеятельности 2011).

4. Пристрій для газового опалення : пат. 63793 Україна (UA) : МПК F24D 10/00 / Дудкін К. В., Іродов В. Ф., Чорноморець Г. Я. (Україна) ; заявник та патентовласник Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (Україна). – № 02070772 ; заявл. 25.02.2011 ; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20. – 4 с.
5. Обработка данных средствами Excel при планировании эксперимента / Н. М. Ершова, В. Н. Деревянко, Р. А. Тимченко, О. В. Шаповалова. – Днепропетровск : ПГАСА, 2012. – 350 с.
6. Іродов В. Ф. Математическое моделирование и расчет инфракрасного трубчатого газового обогревателя / В. Ф. Іродов, Л. В. Солод // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Придн. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 52, ч. 1. – С. 130–132.
7. Іродов В. Ф. О построении и сходимости алгоритмов самоорганизации случайного поиска / В. Ф. Іродов // Автоматика. – 1987. – № 4. – С. 34–43.
8. Іродов В. Ф. Эволюционные алгоритмы поиска оптимальных решений / В. Ф. Іродов, Ф. И. Стратан // Методы оптимизации при проектировании систем теплогасоснабжения / Ф. И. Стратан, В. Ф. Іродов ; отв. ред. М. Я. Розкин. – Кишинев, 1984. – С. 16–30.
9. Пінчук С. Й. Організація експерименту при моделюванні та оптимізації технічних систем / С. Й. Пінчук. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Дніпропетровськ : Дніпро-VAL, 2009. – 289 с.
10. Строй А. Ф. Техніко-економічне обґрунтування та визначення галузі застосування променевого газового опалення / А. Ф. Строй, Ю. К. Припотень // Збірник наукових праць. Серія : Галузеве машинобудування, будівництво / Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – Полтава, 1999. – Вып. 4. – С. 113–121.
11. Чорноморець Г. Я. Выбор параметров проектирования трубчатых газовых нагревателей, расположенных в конструкции пола / Г. Я. Чорноморець, В. Ф. Іродов // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Придн. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 68. – С. 441–446. – (Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития).
12. Чорноморець Г. Я. О расчете теплообмена между газоздушной смесью в канале строительной конструкции трубчатого нагревателя и отапливаемым пространством / Г. Я. Чорноморець, В. Ф. Іродов // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Придн. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 70. – С. 238–243. – (Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве).
13. Чорноморець Г. Я. Доцільність використання трубчастих газових нагрівачів для опалення сільськогосподарських будівель / Г. Я. Чорноморець // Тенденции, наработки, инновации, практика в науке : сб. науч. докладов Междунар. науч.-практ. конференции, 29.04.2014-30.04.2014, Люблин / Вестник. Наука и практика. – Варшава, 2014. – Ч. 1. – С. 7–10.
14. Чорноморець Г. Я. Математичне моделювання трубчастих газових нагрівачів, розташованих у будівельних конструкціях / Г. Я. Чорноморець, В. Ф. Іродов // Науковий вісник будівництва : зб. наук. пр. / Харків. нац. ун-т буд-ва та архітектури. – Харків, 2012. – Вып. 68. – С. 395–399.
15. Чорноморець Г. Я. Методика експериментальних досліджень системи опалення з трубчастими газовими нагрівачами, розташованими у будівельних конструкціях / Г. Я. Чорноморець, В. Ф. Іродов // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Придн. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 75. – С. 256–60. – (Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития).
16. Чорноморець Г. Я. Техніко-економічне обґрунтування використання трубчастих нагрівачів розташованих у будівельних конструкціях / Г. Я. Чорноморець // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Придн. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 76. – С. 293–297. – (Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве).
17. Multilevel statistical models and the analysis of experimental data / J. E. Behm, D. Edmonds, J. Harmon, A. Ives // Ecology / Ecological society of America. – 2013. – Vol. 94, iss. 7. – P. 1479–1486.
18. Peters C. A. Statistics for analysis of experimental data / C. A. Peters // Environmental engineering processes laboratory manual. – Princeton, 2001. – P. 1–25. – Режим доступа: – [http://www.princeton.edu/~cap/AEESP\\_Stachap\\_Peters.pdf](http://www.princeton.edu/~cap/AEESP_Stachap_Peters.pdf).
19. Taler D. Mathematical modeling of tube heat exchangers with complex flow arrangement / D. Taler, M. Trojan, J. Taler // Chemical and process engineering / Institute of Chemistry and Organic Technology, Cracow University of Technology. – Cracow, 2011. – Vol. 32, iss. 1. – P. 7–19.
20. Vasishth S. An introduction to statistical data analysis : lecture notes / S. Vasishth. – New York, 2014. – 129 p. – Режим доступа: <http://www.ling.uni-potsdam.de/~vasishth/StatisticsNotesVasishth.pdf>.

## REFERENCE

1. Boguslavskij L.D., Simonova A.A. and Mitin M.F. *Ekonomika teplogazosnabzheniya i ventilyatsii* [The economy of heat and ventilation]. Moskva: Strojizdat, 1988. 351 p. (in Russian).
2. Bolotskikh N.N. *Energoeffektivnaya sistema infrakrasnogo obogreva proizvodstvennykh pomeshchenij s bol'shimi vnutrennimi ploshchadyami* [Energy-efficient infrared heating of production facilities with large inner area]. *Naukovyi visnyk budivnytstva* [Scientific Bulletin of Construction]. Harkiv. nats. un-t bud-va ta arkhitektury. Harkiv, 2012, iss. 69, pp. 361–371. (in Russian).
3. Dudkin K.V., Hatskevich Yu.V., Solod L.V. and Chernomorets G.Ya. *Mnogokonturnye trubchatye gazovye nagrevateli kak sredstva povysheniya bezopasnosti vozdušno-luchistogo otopeniya* [Multiloop tube gas heaters as

- a means of improving the safety radiant heating]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, materials science, mechanical engineering]. Pridneprov. gos. akad. str-va i arkhitektury, Dnepropetrovsk. 2011, iss. 62, pp. 161–165. (in Russian).
4. Dudkin K.V., Irodov V.F. and Chornomorets H.Ya. *Prystrii dlia hazovoho opalennia: pat. 63793 Ukraina (UA): MPK F24D 10/00* [Device for gas heating: pat. 63793 Ukraine (UA): PIC F24D 10/00]. 2011.
  5. Ershova N.M., Derevyanko V.N., Timchenko R.A. and Shapovalova O.V. *Obrabotka dannykh sredstvami Excel pri planirovanii eksperimenta* [Data processing means Excel while the planning of experiment]. Dnepropetrovsk: PGASA, 2012. 350 p. (in Ukrainian).
  6. Irodov V.F. and Solod L.V. *Matematicheskoe modelirovanie i raschet infrakrasnogo trubchatogo gazovogo obogrevatelya* [Mathematical modeling and calculation of tube infrared gas heater]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, materials science, mechanical engineering]. Pridneprov. gos. akad. str-va i arkhitektury, Dnepropetrovsk. 2010, iss. 52(1), pp. 130–132. (in Russian).
  7. Irodov V.F. *O postroenii i skhodimosti algoritmov samoorganizatsii sluchajno poiska* [The construction and convergence of random search algorithms for self-organization]. *Avtomatika* [Automation]. 1987, no. 4, pp. 34–43. (in Russian).
  8. Irodov V.F., Stratan F.I. and Rozkin M.Ya. *Evolyutsionnye algoritmy poiska optimal'nykh reshenij* [Evolutionary algorithms of search for optimal solutions]. *Metody optimizatsii pri proektirovanii sistem teplogazosnabzheniya* [Methods of optimizing for design of heating systems]. Kishinev, 1984, pp. 16–30. (in Russian).
  9. Pinchuk S.Y. *Orhanizatsiia eksperymentu pry modeliuванні ta optymizatsii tekhnichnykh system* [An experiment in modeling and optimization of technical systems]. Dnipropetrovsk: Dniipro-VAL, 2009, 289 p. (in Ukrainian).
  10. Stroi A.F. and Prypoten Yu.K. *Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia vykorystannia promenyvnykh system opalennia u vyrobnychyykh prymishchenniakh* [Feasibility study of using radiation heating systems in production facilities]. *Galuzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo* [Mechanical engineering, construction]. Poltav. nats. tekhn. un-t im. Juriia Kondratiuka. Poltava, 1999, iss. 4, pp. 113–121. (in Russian).
  11. Chornomorets G. Ya. and Irodov V.F. *Vybor parametrov proektirovaniia trubchatykh gazovykh nagrevatelej, raspolozhennykh v konstruksii pola* [Parameters selection of design the tube gas heater located in the floor structure]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, materials science, mechanical engineering]. Pridneprov. gos. akad. str-va i arkhitektury. Dnepropetrovsk, 2013, iss. 68, pp. 441–446. (in Russian).
  12. Chornomorets G.Ya. and Irodov V.F. *O rashchete teploobmena mezhdru gazovozdushnoj smes'yu v kanale stroitel'noj konstruksii trubchatogo nagrevatelya i otaplivaemym prostranstvom* [About calculation of heat transfer between gas-air mixture in channel of the tube heater building structure and the heated space]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, materials science, mechanical engineering]. Pridneprov. gos. akad. str-va i arkhitektury. Dnepropetrovsk, 2013, iss. 70, pp. 238–243. (in Russian).
  13. Chornomorets H. Ya. *Dotsilnist vykorystannia trubchastykh hazovykh nahrivachiv dlia opalennia silskohospodarskykh budivel* [The feasibility of using tube gas heaters for heating agricultural buildings]. *Tendentsii, ziory danykh, innovati, praktika v nauke ch. 1.* [Trends, data sets, innovation and practice in science part 1]. Lublin, Varshava, 2014, pp. 7–10. (in Ukrainian).
  14. Chornomorets H.Ya. and Irodov V. F. *Matematychnye modeliuвання trubchastykh hazovykh nahrivachiv, roztashovanykh u budivnykh konstruksiiakh* [Mathematical modeling of tube gas heaters located in building structures]. *Naukovyj visnyk budivnytstva* [Scientific Bulletin of Construction]. Harkiv. nac. un-t bud-va ta arkhitektury. Harkiv, 2012, iss. 68, pp. 395–399. (in Ukrainian).
  15. Chornomorets H. Ya. and Irodov V.F. *Metodyka eksperimentalnykh doslidzhen systemy opalennia z trubchastymy hazovymy nahrivachamy, roztashovanymy u budivnykh konstruksiiakh* [Methods of experimental studies of tube heating with gas heater, located in building structures]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, materials science, mechanical engineering]. Pridneprov. gos. akad. str-va i arkhitektury. Dnepropetrovsk, 2014, iss. 75, pp. 256 – 260. (in Ukrainian).
  16. Chornomorets H. Ya. *Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia vykorystannia trubchastykh nahrivachiv roztashovanykh u budivnykh konstruksiiakh* [Feasibility study for the use of tubular heaters located in building structures]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, materials science, mechanical engineering]. Pridneprov. gos. akad. str-va i arkhitektury. Dnepropetrovsk, 2014, iss. 76, pp. 293–297. (in Ukrainian).
  17. Behm J.E., Edmonds D., Harmon J. and Ives A. *Multilevel statistical models and the analysis of experimental data. Ecology*. Ecological society of America, 2013, vol. 94, iss. 7, pp. 1479-1486.
  18. Peters C.A. *Statistics for Analysis of Experimental Data. Environmental Engineering Processes Laboratory Manual*. Princeton, 2001, pp. 1-25. Available at: [http://www.princeton.edu/~cap/AEESP\\_Statchap\\_Peters.pdf](http://www.princeton.edu/~cap/AEESP_Statchap_Peters.pdf).
  19. Taler D., Trojan M. and Taler J. *Mathematical modelling of tube heat exchangers with complex flow arrangement. Chemical and Process Engineering*. Institute of Chemistry and Organic Technology, Cracow University of Technology. Cracow, 2011, vol. 32, iss. 1, pp. 7-19.
  20. Vasisht S. *An introduction to statistical data analysis*. New York, 2014, 129 p. Available at: <http://www.ling.uni-potsdam.de/~vasisht/StatisticsNotesVasisht.pdf>.

Рецензент: д-р т. н., проф. В. М. Дерев'янюк

Надійшла до редколегії: 10.11.2015 р. Прийнята до друку: 15.11.2015 р.