

УДК 519.816

## РІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ВОДОГРІЙНОЇ ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧОЇ УСТАНОВКИ НА ПЕЛЕТАХ

БАРСУК Р. В.<sup>1\*</sup>, асист.,ИРОДОВ В. Ф.<sup>2</sup>, д.т.н., проф.

<sup>1\*</sup> Державний вищий навчальний заклад: “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, кафедра системного аналізу та моделювання у теплогазопостачанні, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: Igotrustimater@gmail.com ORCID ID: 0000-0002-9666-7496.

<sup>2</sup> Державний вищий навчальний заклад: “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, кафедра системного аналізу та моделювання у теплогазопостачанні, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862.

**Анотація. Мета.** Вирішити задачу оптимізації конструкції водогрійної теплогенеруючої установки на пелетах. Проаналізувати існуючі типи водогрійних установок. Розробити математичну модель водогрійної тепло генеруючої установки. Застосувати метод Парето оптимізації для вирішення поставленої задачі. Реалізувати програмне забезпечення для розрахунків оптимальної конструкції. **Методика.** Розробити математичну модель водогрійної тепло генеруючої установки. Сформулювати метод Парето оптимізації для розрахунку конструкції. Застосувати еволюційний пошук рішень для розрахунків. **Результати.** Авторами розглянуті роботи по моделюванню теплогенеруючих установок. Розроблена математична модель водогрійної теплогенеруючої установки. Сформульована задача оптимізації конструкції теплогенеруючої установки. Розроблене інформаційне забезпечення для розрахунків оптимальної конструкції установок. Наведено приклад розрахунку оптимальної конструкції теплогенеруючої установки. **Наукова новизна.** Авторами розроблена математична модель водогрійної теплогенеруючої установки. Застосований метод Парето оптимізації розрахунку оптимальної конструкції теплогенеруючої установки на пелетах. Використаний еволюційний метод для вирішення задачі Парето оптимізації. Знайдено рішення за двома критеріями ККД та довжини траси трубчастої частини нагрівача. **Практична значимість.** Показана можливість розрахунку оптимальної конструкції водогрійної теплогенеруючої установки. Реалізоване програмне забезпечення для розрахунків оптимальної конструкції.

**Ключові слова:** математична модель; водогрійна теплогенеруюча установка; Парето оптимізація; еволюційний пошук рішень

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ВОДОГРЕЙНОЙ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ НА ПЕЛЛЕТАХ

БАРСУК Р. В.<sup>1\*</sup>, асист.,ИРОДОВ В. Ф.<sup>2</sup>, д.т.н., проф.

<sup>1\*</sup> Государственное высшее учебное заведение: “Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры”, кафедра системного анализа и моделирования в теплогазоснабжении, ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, e-mail: Igotrustimater@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9666-7496.

<sup>2</sup> Государственное высшее учебное заведение: “Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры”, кафедра системного анализа и моделирования в теплогазоснабжении, ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862.

**Аннотация. Цель.** Решить задачу оптимизации конструкции водогрейной теплогенерирующей установки на пеллетах. Проанализировать существующие типы водогрейных установок. Разработать математическую модель водогрейной теплогенерирующей установки. Применить метод Парето оптимизации для решения поставленной задачи. Реализовать программное обеспечение для расчетов оптимальной конструкции. **Методика.** Разработать математическую модель водогрейной теплогенерирующей установки. Сформулировать метод Парето оптимизации для расчета конструкции. Применить эволюционный поиск решения для расчетов. **Результаты.** Авторами рассмотрены работы по моделированию теплогенерирующих установок. Разработана математическая модель водогрейной теплогенерирующей установки. Сформулирована задача оптимизации конструкции теплогенерирующей установки. Разработано информационное обеспечение для расчетов оптимальной конструкции установок. Приведен пример расчетов оптимальной конструкции теплогенерирующей установки. **Научная новизна.** Авторами разработана математическая модель водогрейной теплогенерирующей установки. Применен метод Парето оптимизации расчета оптимальной конструкции теплогенерирующей установки на пеллетах. Использован эволюционный метод для решения задачи Парето оптимизации. Найдено решение задачи по двум критериям КПД и длины трассы трубчатой части нагревателя. **Практическая**

**значимость.** Показана возможность расчета оптимальной конструкции водогрейной теплогенерирующей установки. Реализовано программное обеспечение для расчетов оптимальной конструкции.

**Ключевые слова:** математическая модель; водогрейная теплогенерирующая установка; Парето оптимизация; эволюционный поиск решений

## SOLUTION OF OPTIMIZATION PROBLEM OF CONSTRUCTION HEAT GENERATION INSTALLATION WORKING ON PELLETS

BARSUK R. V.<sup>1\*</sup>, *asist. Prof.*,  
IRODOV V. F.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

<sup>1\*</sup> State Higher Educational Establishment "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", department of system analysis and modeling in heat and gas supply, street Chernyshevsky, 24-a, 49600, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: Igotrustimeter@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9666-7496.

<sup>2</sup> State Higher Educational Establishment "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", department of system analysis and modeling in heat and gas supply, street Chernyshevsky, 24-a, 49600, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862.

**Annotation. Purpose.** There are aim to solve the problem of optimizing design of water heat-generation installation working on pellets. Also, the task is to analyze existing types of hot water installations. Authors set the aim to develop a mathematical model of hot water heat-generation installation. Then, there are task to apply the Pareto optimization method for solving problem. Implement software to search optimal design. **Methods.** At first, develop mathematical model of hot water heat-generation installation. Then authors formulate the Pareto optimization method for design searching. And for this aim we use evolutionary search for solution calculation. **Results.** Authors considered works about heat-generation modeling. There are mathematical model of water heat-generation installation are develop. The problems of heat-generation optimization construction are formulated. Information support for search optimal design construction shown. There are listed example optimal design search of heat-generation installation. **Scientific novelty.** The authors developed mathematical model of hot water heat-generation installation. The method Pareto optimization applying for calculation optimal design of heat-generation installation working on pellets. There are used evolutionary search methods for solving Pareto optimization problem. There are found solution of task using two criteria such efficiency and length of tubular heater part. **Practical importance.** There are shown possibility for searching optimal design of hot-water heat-generation installation. The software for optimal design calculation is implemented.

**Keywords:** mathematical model; hot water heat-generation installation; Pareto optimization; evolutionary solutions search

### Постановка проблеми

Існують різноманітні типи водогрійних теплогенеруючих установок. У роботі розглядаються типу з трубчастим нагрівачем. Для таких нагрівачів є важливим ККД, що безпосередньо впливає на ефективність роботи. Але він у свою чергу залежить від витрат на обладнання, тобто збільшення довжини нагрівача. Таким чином постає протиріччя реалізації такої установки: або створити з високим ККД, або зменшити вартість.

Найефективніше таку задачу вирішує Парето оптимізація розрахунків, тобто знаходження оптимальних параметрів установки з досить високим ККД та не максимальними витратами.

### Аналіз публікацій

Існують різноманітні конструкційні схеми теплогенеруючих установок, у тому числі для нагрівання повітря системи з рециркуляцією [2 - 5], тощо.

Відомі різноманітні підходи до моделювання трубчастих газових обігрівачів [1,6]. Але задачі даної роботи суттєво відрізняються від наявних.

### Мета статті

Необхідно провести розрахунок порівняльного характеру для підбору оптимальних параметрів водогрійної теплогенеруючої установки, яка працює на пелетах. Для цього потрібно підібрати математичну модель з відповідними залежностями.

### Виклад основного матеріалу

Для моделі, що існує водогрійної установки необхідно розробити математичну модель, яка буде охоплювати необхідні параметри установки. Для цього обрано тепловий і гідравлічний режими ділянки трубчастого нагрівача.

$$M = \rho wF = const \quad (1)$$

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

$$dp = -\lambda \cdot dx/D \cdot \rho \frac{w^2}{2} + dh(\rho_a - \rho)g \quad (3)$$

$$dQ_{1K} = \pi D dx \alpha_1 (T - T_{wi}) \quad (4)$$

$$dQ_{1П} = \pi D dx c_o \varepsilon \varepsilon \left( T^4 - T_{wi}^4 \right) 10^{(-8)} \quad (5)$$

$$dQ_2 = \pi D dx \frac{\lambda}{\delta} \left( T_{wi} - T_{wo} \right) \quad (6)$$

$$dQ_3 = \pi D dx c_o \varepsilon_w \left( T_{wo}^4 - T_o^4 \right) 10^{(-8)} \quad (7)$$

$$dQ_4 = \pi D dx \alpha_2 \left( T_{wo} - T_o \right) \quad (8)$$

$$dQ_1 = dQ_{1K} + dQ_{1П} \quad (9)$$

$$d(\rho w F_p T) = -dQ_1 \quad (10)$$

$$dQ_1 = dQ_2 \quad (11)$$

$$dQ_2 = dQ_3 + dQ_4 \quad (12)$$

де:  $\rho, \rho_a$  – щільність газоповітряної суміші у нагрівачі та повітря у навколишньому середовищі,  $\text{кг/м}^3$ ;  $w$  – середня лінійна швидкість руху газоповітряної суміші по випромінюючій трубі,  $\text{м/с}$ ;  $F$  – площа поперечного перерізу труби,  $\text{м}^2$ ;  $p, T$  – абсолютні тиск та температура газоповітряної суміші в даному перетині випромінюючої труби,  $\text{Па, К}$ ;  $R$  – газова постійна,  $\text{Дж/(кг К)}$ ;  $dp$  – перепад тиску приплині газоповітряної суміші у випромінюючій трубі на ділянці довжиною  $dx$ ;  $A$  – коефіцієнт тертя;  $D$  – внутрішній діаметр труби,  $\text{м}$ ;  $dQ_1$  – тепловий потік від газоповітряної суміші до стінки випромінюючої труби, переданий конвекцією та теплопровідністю,  $\text{Вт}$ ;  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі від потоку газоповітряної суміші до стінки труби,  $\text{Вт/м}^2 \text{К}$ ;  $T_{wi}$  – температура внутрішньої поверхні стінки труби в даному перетині;  $dQ_2$  – тепловий потік від внутрішньої поверхні стінки випромінюючої труби до зовнішньої поверхні, переданий теплопровідністю,  $\text{Вт}$ ;  $\lambda, \delta, T_{wo}$  – відповідно коефіцієнт теплопровідності матеріалу,  $\text{Вт/м К}$ ; товщина,  $\text{м}$  та температура зовнішньої поверхні стінки випромінюючої труби,  $\text{К}$ ;  $dQ_3, dQ_4$  – теплові потоки випромінюванням і конвекцією від поверхні випромінюючої труби в навколишнє середовище опалювального приміщення відповідно,  $\text{Вт}$ ;  $h$  – висота розташування ділянки  $dx$ .

Маємо залежність  $h=h(x)$  – відома функція. Тоді  $dh = h'(x)dx$ . Математична модель, що наведена, відрізняється від математичних моделей, що раніше використовувались для моделювання інфрачервоних трубчастих обігрівачів або трубчастих нагрівачів наявністю гідростатичної складової  $dh(\rho_a - \rho)g$

Розроблений загальний підхід для використання моделі (1)-(12) при розрахунку теплового та гідравлічного режиму нагрівачів. Система рівнянь

теплообміну (4) – (12) замкнена, але нелінійна. За допомогою чисельного методу вирішується система рівнянь (4) – (12) і знаходяться  $dQ_1, dQ_2, dQ_3, dQ_4, T_{wi}, T_{wo}$ . Після перетворень системи (1) – (12) отримаємо вирази для диференціалів:

$$dp = -A \cdot dx/D \cdot \rho \frac{w^2}{2} + dh(\rho_a - \rho)g \quad (13)$$

$$d\rho = (dp - \rho R dt)/(RT) \quad (14)$$

$$dw = (-wF dp - \rho w dF)/(\rho F) \quad (15)$$

Ці вирази можна використовувати для чисельного інтегрування при розрахунках теплового та гідравлічного режимів розроблених нагрівачів.

За допомогою цієї моделі вирішується задача розрахунків основних конструктивних параметрів котла – діаметр та довжина жарової труби, діаметр та довжина димогарних труб.

Задача вирішується як двокритеріальна, і до складу критеріїв входять: ККД установки та капітальні затрати. Звичайно, нас цікавить підвищення ККД та зменшення кап. витрат. Але для збільшення ККД необхідно збільшувати теплообмін частину, що у свою чергу збільшує капітальні витрати. Тому постає протиріччя.

Вирішується задача Парето оптимізації за допомогою еволюційного пошуку рішень.

Таку задачу будемо розглядати далі для трубчастих газових нагрівачів, що розташовані у будівельних конструкціях. Для визначеності будемо розглядати задачу синтезу з наступними критеріями: коефіцієнт корисної дії і довжина нагрівача, від якої залежать капітальні витрати.

Позначимо через  $x = \{x^1, x^2, \dots, x^n\}$  – сукупність параметрів трубчастого нагрівача, які визначають конструктивні і технологічні параметри та які задовольняють математичній моделі нагрівача  $x \in \Psi$ . Будемо вважати, що існують вирази для двох критеріїв  $E_1 = E_1(x), E_2 = E_2(x)$ .

Припускаємо, що для критерію  $E_1(x)$  існує бінарне відношення вибору  $R_{S1}$ , так що запис  $xR_{S1}y$  означає, що рішення  $x$  «краще» ніж рішення  $y$  по критерію  $E_1$ , тобто:

$$xR_{S1}y \Leftrightarrow E_1(x) \geq E_1(y) \quad (16)$$

Також вважаємо, що для критерію  $E_2$  існує бінарне відношення вибору  $R_{S2}$ , так що:

$$xR_{S2}y \Leftrightarrow E_2(x) \leq E_2(y) \quad (17)$$

Побудуємо складне відношення:

$$xR_{S12}y \Leftrightarrow xR_{S1}y \wedge xR_{S2}y \quad (18)$$

На підставі визначень (16) та (17) можна заключити, що  $R_{S1}$  і  $R_{S2}$  – відношення нестрогого порядку, тобто мають властивості рефлексивності, транзитивності та антисиметричності. Тоді можна показати, що складне відношення (18) також буде відношенням нестрогого порядку.

Відношення (2) також визначимо на множині  $\Psi$ , але не всякі елементи (можливі рішення) можна співставити за цим відношенням, тому що критерії  $E_1$  та  $E_2$  можуть суперечити один одному. Тому немає сенсу пошук найбільш переважного рішення по відношенню  $R_{S12}$  на множині  $\Psi$  і також немає сенсу у функції переваги як функції вибору.

Розглянемо функцію вибору у вигляді блокування:

$$S^{R_{S12}}(X) = \{x \in X \mid \forall y \in X \ y \bar{R}_{S12} x\} \quad (19)$$

Для функції вибору (19) будемо вважати, що мають місце сукупність вкладених одна в одну функцій блокування:

$$S_1^{R_{S12}}(X) \subset S_2^{R_{S12}}(X) \subset \dots \subset S_l^{R_{S12}}(X) \quad (20)$$

Відносно функції блокування вважаємо, що для усіх  $S_l^{R_{S12}}(X)$  з послідовності (20) має місце умова:

$$\forall S_l^{R_{S12}}(X) \quad \text{mes} S_l^{R_{S12}}(X) > 0 \quad (21)$$

Будемо вважати, що для пошуку за двома критеріями  $E_1$  та  $E_2$  застосовується алгоритм еволюційного пошуку у вигляді:

$$X_{jk} = S^{R_{S12}}(G(X_{j,k-1})) \quad (22)$$

$$k=1, 2, \dots, n,$$

$$j=1, 2, \dots, N_B,$$

де:  $k$  – крок ітераційного процесу пошуку;

$j$  – номер гілки еволюційного процесу;

$N_B$  – кількість гілок розрахунку еволюційного алгоритму;

$S^{R_{S12}}(X)$  – функція вибору у вигляді (20);

$G(X)$  – функція генерації:

$$G(X) = X \cup G_H(X) \quad (23)$$

де:  $G_H(X)$  – множина нових рішень, що породжені нечітким відношенням генерації  $RG$  з функцією приналежності  $\mu_{RG}(y,x): \Omega \times \Omega \rightarrow [0,1]$ .

$$G_H(X) = \{y \in \Psi \mid \exists x \in X, \mu_{RG}(x,y) > 0\} \quad (24)$$

Відносно функції генерації будемо вважати наступне. Якщо  $x_n$  – нове рішення  $x_n \in G_H(X)$ , то:

$$\forall l = 1, 2, \dots, n$$

$$P\{x_n \in S_l^{R_{S12}}(X)\} \geq \delta > 0 \quad (25)$$

де:  $\delta$  – похибка виконання умови.

Встановлені вимоги, що забезпечують збіжність еволюційного пошуку Парето – оптимальних рішень у задачі синтезу для трубчастих газових нагрівачів. Під збіжністю послідовності  $X_k$  до множини послідовності  $S_l^{R_{S12}}(X)$  з вірогідністю 1 вважається наступне. Який би не був порядковий номер  $j$  послідовності  $S_j^{R_{S12}}(X)$ ,  $j = 1, 2, \dots, l$ , знайдеться такий номер  $K$ , що для усіх  $k \geq K$  з вірогідністю 1 буде виконано  $X_k \subset S_j^{R_{S12}}(X)$ .

Має місце наступна теорема [7]. Якщо сукупність вкладених функцій блокування (20) має властивість (21), функція генерації (23), (24) має властивість (25), а відношення  $R_{S1}$  і  $R_{S2}$  – збіжність послідовності  $X_{jk}$  до множини послідовності  $S_l^{R_{S12}}(X)$  з вірогідністю 1.

Розроблений еволюційний алгоритм пошуку рішень задачі управління проектами за вказаними двома критеріями.

У таблиці 1 наведено приклад розрахунку параметрів водогрійної тепло генеруючої установки.

Таблиця 1

Таблиця розрахунку оптимальних параметрів водогрійної тепло генеруючої установки /  
Table calculation optimal parameters hot-water heat-generation installation

Ітерація	Гілки еволюції									
	1		2		3		4		5	
	ККД	Кап. Витр.	ККД	Кап. Витр.	ККД	Кап. Витр.	ККД	Кап. Витр.	ККД	Кап. Витр.
1	0,874	18,62	0,781	13,2	0,899	20,66	0,871	17,37	0,843	16,75

Продовження таблиці 1

...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
10	0,874	18,62	0,781	13,2	0,9	20,63	0,872	18,29	0,843	16,75
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
20	0,874	18,57	0,781	13,2	0,9	20,54	0,872	18,29	0,843	16,75
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
30	0,875	18,51	0,781	13,2	0,9	20,54	0,872	18,2	0,843	16,75
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
40	0,882	18,13	0,781	13,2	0,9	20,5	0,875	17,8	0,84	16,71
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
50	0,882	18,13	0,781	13,73	0,914	20,49	0,876	17,62	0,844	16,71

Таким чином наведено приклад розрахунку порівняльних параметрів лінійного характеру та теплового.

### Висновок

Запропоновано підхід до розрахунку оптимальних параметрів водогрійної тепло генеруючої установки. У якості параметрів запропоновано використання довжини трубчастої частини установки та теплової потужності. Наведено приклад розрахунку такої установки за двома параметрами на основі математичної моделі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дудкин К. В. Математическое моделирование трубчатых газовых нагревателей для безопасного нагрева воды в объеме со свободной поверхностью / К. В. Дудкин, В. В. Ткачева, Ю. В. Бобырь // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры"; под общ. ред. В. И. Большакова. – Днепропетровск, 2011. – Вып. 62 : Безопасность жизнедеятельности 2011. – С. 166–170.
2. Іродов В. Ф. Регуляризація часткових описів при еволюційному пошуку рішень на основі самоорганізації / Іродов В. Ф., Барсук Р. В. // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. академии стр-ва и архитектуры; под общ. ред. В. И. Большакова. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 84. – С. 111–116.
3. Пристрій для променевого обігріву та нагрівання повітря : пат. 61594 Україна (UA), МПК F24D 10/00, F24C 15/00 / Іродов В. Ф., Осетянська Д. Є., Хацкевич Ю. В.; заявник та власник Придніпр. акад. буд-ва і архітектури. – № u201015435; заявл. 20.12.2010 ; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14.
4. Пристрій для променевого обігріву та нагрівання повітря : пат. 92674 Україна (UA), МПК F24D 10/00, F24D 15/00, F24C 15/00 / винахідники та власники : Барсук Р. В., Іродов В. Ф., Чорнойван А. А. – № u201403524 ; заявл. 05.04.2014 ; опубл. 26.08.2014, Бюл. № 16.
5. Система повітряно-променевого опалення : пат. 83475 Україна (UA), МПК F24D 10/00, F24D 15/00 / винахідники та власники : Дудкін К. В., Іродов В. Ф., Ткачова В. В., Чорноморець Г. Я. – № u 201304161 ; заявл. 03.04.2013 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17.
6. Ткачова В. В. Індуктивне моделювання трубчастого газового нагрівача та пальника на пелетах / Ткачова В. В., Барсук Р. В. // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры ; под общ. ред. В. И. Большакова. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 78 : Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении. – С. 275–281.
7. Чорноморець Г. Я. Моделі і методи аналізу та синтезу трубчастих газових нагрівачів у будівельних конструкціях : дис. ... кандидата техн. наук : 01.05.02 / Чорноморець Галина Яківна ; Придніпров. держ. акад. буд-ва та архітектури. – Дніпро, 2017. – 159 с.

## REFERENCES

1. Dudkin K.V., Tkacheva V.V. and Bobyr Yu.V. *Matematicheskoe modelirovanie trubchatykh gazovykh nagrevatelej dlya bezopasnogo nagreva vody v ob'eme so svobodnoj poverkhnost'yu* [Mathematical modeling of tubular gas heaters for safe water heating in the free-surface volume]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. *Pridnepr. gos. akad. str-va i arkhitektury* [Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnepropetrovsk, 2011, iss. 62, pp. 166–170. (in Russian).
2. Irodov V.F. and Barsuk R.V. *Regulyaryzatsiia chastkovykh opysiv pry evoliutsiinomu poshuku rishen na osnovi samoorganizatsii* [Regularization of partial descriptions with evolutionary solutions search on the basis of self-organization]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. *Pridnepr. gos. akad. str-va i arkhitektury* [Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnepropetrovsk, 2015, iss. 84, pp. 111–116. (in Ukrainian).
3. Irodov V.F., Osetianska D.Ye. and Khatskevych Yu.V. *Prystrii dlia promenevoho obihrivu ta nahrivannia povitria: pat. 61594 Ukraina (UA), MPK F24D 10/00, F24C 15/00* [Device for radiant heating and air heating: pat. 61594 Ukraina (UA), Patent National Classification F24D 10/00, F24C 15/00]. *Prydnipr. akad. bud-va i arkhitektury* [Prydniprovsk'ka Academy of Civil Engineering and Architecture]. No u201015435, 2011. (in Ukrainian).
4. Barsuk R.V., Irodov V.F. and Chernoiivan A.A. *Prystrii dlia promenevoho obihrivu ta nahrivannia povitria: pat. 92674 Ukraina (UA), MPK F24D 10/00, F24D 15/00 F24C 15/00* [Device for radiant heating and air heating: pat. 92674 Ukraina (UA), Patent National Classification F24D 10/00, F24D 15/00 F24C 15/00]. *Prydnipr. akad. bud-va i arkhitektury* [Prydniprovsk'ka Academy of Civil Engineering and Architecture]. № u201403524, 2014. (in Ukrainian).
5. Dudkin K.V., Irodov V.F., Tkachova V.V. and Chornomorets H.Ya. *Systema povitriano-promenevoho opalennia: pat. 83475 Ukraina (UA), MPK F24D 10/00, F24D 15/00* [Air-radiant system of heating: pat. 83475 Ukraina (UA), Patent National Classification F24D 10/00, F24D 15/00]. No. u201304161, 2013. (in Ukrainian).
6. 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]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. *Pridnepr. gos. akad. str-va i arkhitektury* [Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnepropetrovsk, 2014, iss. 78, pp. 275–281. (in Ukrainian).
7. Chornomorets H.Ya. *Modeli i metody analizu ta syntezy trubchastykh hazovykh nahrivachiv u budivel'nykh konstruktivnykh* Cand, Diss. [Models and methods of analysis and synthesis gas tube heaters in building structures. Cand. Diss.]. *Pridnepr. gos. akad. str-va i arkhitektury* [Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipro, 2017, 159 p. (in Ukrainian).