

УДК 65.012

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОГРАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТРУБЧАСТОГО ГАЗОВОГО НАГРІВАЧА НА ПЕЛЕТАХ

БАРСУК Р. В.<sup>1\*</sup>, *асп.*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, Дніпро, Україна, e-mail: [Falazar@yandex.ru](mailto:Falazar@yandex.ru), 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, Дніпро, Україна, e-mail: [vfirodov@i.ua](mailto:vfirodov@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-8772-9862.

**Анотація. Постановка проблеми.** У статті розглядається проблема дослідження тепло генеруючого обладнання. Вказуючи на суттєву перспективу використання програми досліджень нагрівачів, виникає необхідність її оптимізації. Не дивлячись на те, що існує велика кількість робіт по моделюванню цих нагрівачів, для ефективного способу їх конструювання недостатньо. **Аналіз останніх досліджень.** У статті наведені роботи по дослідженню та вивченню трубчатих газових нагрівачів. Відмічені останні роботи з побудови математичних моделей цих нагрівачів. **Мета та завдання.** Метою роботи є оптимізація програми досліджень тепло генеруючих установок. Авторами поставлена задача визначення параметрів, котрі впливають на програму дослідження нагрівачів. Також до неї відноситься визначення параметрів, за якими можна визначити способи оптимізації програми досліджень трубчатих газових нагрівачів. **Висновки.** Розроблені способи оптимізації програми досліджень трубчатих газових нагрівачів. Вказані методи для здійснення оптимізації. Наведені приклади реалізації програми досліджень трубчатих газових нагрівачів. Вказана реалізація цього проекту за допомогою еволюційного пошуку рішень.

**Ключові слова:** програма досліджень; оптимізація; трубчасті газові нагрівачі; функція вибору

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРУБЧАСТОГО ГАЗОВОГО НАГРЕВАТЕЛЯ НА ПЕЛЛЕТАХ

БАРСУК Р. В.<sup>1\*</sup>, *асп.*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, Днепр, Украина, e-mail: [Falazar@yandex.ru](mailto:Falazar@yandex.ru), 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, Днепр, Украина, e-mail: [vfirodov@i.ua](mailto:vfirodov@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-8772-9862.

**Аннотация. Постановка проблемы.** В статье рассматривается проблема исследования трубчатого газового нагревателя. Указывая на существенную перспективу использования программы исследований нагревателей, возникает необходимость ее оптимизации. Несмотря на то что существует большое количество работ по моделированию этих нагревателей, для эффективного способа их конструирования недостаточно. **Анализ последних исследований.** В статье указаны работы по исследованию и изучению трубчатых газовых нагревателей. Отмечены последние работы по построению математических моделей этих нагревателей. **Цель и задания.** Целью работы является оптимизация программы исследований теплогенерирующих установок. Авторами поставлена задача определения параметров, которые влияют на программу исследований нагревателей. Также к ней относятся определение параметров, по которым можно определить способы оптимизации программы исследований трубчатых газовых нагревателей. **Выводы.** Разработаны способы оптимизации программы исследований трубчатых газовых нагревателей. Указаны методы для осуществления оптимизации. Приведены примеры реализации программы исследований трубчатых газовых нагревателей. Указана реализация этого проекта с помощью эволюционного поиска решений.

**Ключевые слова:** программа исследований; оптимизация; трубчатые газовые нагреватели; функция выбора

# INVESTIGATIONS RESEARCH PROGRAM'S MANAGEMENT OF HEAT GENERATION WITH TUBULAR GAS HEATERS WORKING ON PELLETS

BARSUK R. V.<sup>1\*</sup>, *PhD stud.*

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, Dnipro, Ukraine, e-mail: [Falazar@yandex.ru](mailto:Falazar@yandex.ru), 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, Dnipro, Ukraine, e-mail: [vfirodov@i.ua](mailto:vfirodov@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-8772-9862.

**Annotation. Problems formulation.** The article deals with problems heat generation equipment studying. Authors indicate the important perspective of heaters research program, it is necessary for optimizing. Although there are many works about modeling this heaters but it is not enough for efficient construction method. **Recently research analysis.** The article deals with research and investigation works about tubular gas heaters. There are recent works these heaters mathematical construction is noted. **Aims and tasks.** There is setting aim to optimize tubular heaters program research. The task is to determine parameters that influence on the heaters search program. Also its concern determination parameters that identify how to optimize program tubular gas heaters research. **Conclusions.** There are tubular gas heaters optimizing methods are develops. Also indicates the ways for optimization. There are examples tubular gas heaters program research implementation are illustrate. Also shows this project realization with solution evolutionary search.

**Key words:** research program; optimization; tubular gas heaters; choice function

## Постановка проблеми

Розглядається програма досліджень тепло генеруючих установок спеціальної побудови – установок, що використовують трубчасті газові нагрівачі на пелетах [4]. Це достатньо нове обладнання, яке з одного боку показало ефективність використання в тому числі при використанні відновлювального джерела – паливних пелет, а з другого боку для доведення таких рішень до широкого застосування потрібно виконати значну кількість робіт різного призначення. Ціль оптимізації програми досліджень – виявити найбільш раціональні (оптимальні) параметри тепло генеруючих установок з трубчастими газовими нагрівачами і на їх основі в подальшому етапі виявити оптимальні параметри реалізації конкретного проекту тепло генеруючої установки.

На етапі оптимізації основних параметрів тепло генеруючих установок можна виділити три фази:

1 – виділення типу тепло генеруючого обладнання з трьох можливих:

- а – повітряно-променистий нагрівач;
- б – повітряно-повітряний нагрівач;
- в – повітряно-водяний нагрівач.

2 – побудова математичної моделі, яка характеризує якість роботи трубчастого нагрівача на пелетах;

3 – безпосередньо рішення задачі оптимізації параметрів тепло генеруючої установки.

Наступна стаття присвячена викладенню наукових результатів вирішення фази 2 та фази 3 наведених вище.

Побудова математичної моделі виконується на основі експериментального дослідження, але тип математичної моделі, що будується, суттєво відрізняється від традиційних, кінцевих результатів математичного моделювання – побудова так званої функції вибору по бінарному відношенню вибору.

Відомий трубчастий газовий обігрівач [5]. Він складається із пальника, патрубку для постачання первинного повітря, патрубка для постачання палива та самого трубчастого нагрівача. У якості палива використовуються пелети. Пальник має свої характерні розміри: це площа пальника та ефективна площа для постачання первинного повітря. Трубчаста частина нагрівача уявляє собою трубу певного діаметру. У проміжок між пальником і трубчастою частиною потрапляє вторинне повітря. Повітряний потік, у даному випадку, створює ежектор на виході із трубчастого нагрівача.

Нижче наведені конструктивні параметри роботи трубчастого нагрівача:

- площа пальника,  $S$ ;
- корисна площа для проходу первинного повітря,  $S_{пер}$ ;
- витрати первинного повітря,  $L_1$ ;
- загальна витрата повітря,  $L_{заг}$ ;
- потужність пальника,  $W$ .

Також можна навести критерії, за якими здійснюється оцінка роботи обігрівача:

- унесення золи за певний час,  $(3)$ ;
- концентрація  $CO$  у відпрацьованих газах,  $C_{CO}$ ;
- концентрація  $NO_x$  у відпрацьованих газах,  $C_{NO_x}$ .

Для параметрів, які характеризують роботу трубчастих газових нагрівачів, існують наступні вимоги [1]: для CO це менш ніж 130 мг/м<sup>3</sup>, а для NOx - менше 250 мг/м<sup>3</sup>. Тому на схематичному зображенні трубчастого нагрівача присутні такі надписи, як CO та NOx. Також характерним вихідним параметром є унесення золи, тому що при посиленій подачі первинного повітря створюється ненавмисне унесення золи із пальника. Це призведе до засмічення трубчастої частини, що у свою чергу погіршує теплообмін, а також зменшує час працездатності трубчастої частини.

Таким чином, до вхідних параметрів, які характеризують роботу трубчастого газового нагрівача, можна віднести наступні: характерні розміри пальника, витрати пелет, кількість первинного та вторинного повітря. До вихідних параметрів відносяться: унесення золи за певний час роботи пальника, та концентрації CO та NOx у відпрацьованих газах.

**Аналіз публікацій**

Для дослідження трубчастих газових нагрівачів [6] необхідно побудувати математичну модель. Є досить велика кількість робіт по класичному моделюванню нагрівачів [2, 7].

Але існуючі роботи не можуть використовуватися саме для оптимізації програми досліджень трубчастого газового нагрівача.

**Мета**

Важливо виділити параметри, які підлягають процесу оптимізації. Для трубчастих газових нагрівачів це є характерні розміри пальника, витрати повітря, потужність. А параметри, за якими здійснюється оцінка оптимізації програми досліджень цих нагрівачів, це унесення золи за певний час та концентрації CO та NOx у відпрацьованих газах.

**Виклад основного матеріалу**

У процесі побудови математичної моделі, спочатку отримується таблиця 1 експериментальних результатів у вигляді:

*Таблиця 1*

**Таблиця експериментальних даних, отриманих внаслідок дослідження трубчастого газового нагрівача / The experimental data table derived from tubular gas heater research**

№	S	S пер	Lзаг	Lпер	W	З	max=130 C <sub>CO</sub>	max=250 C <sub>NOx</sub>
	м <sup>2</sup>	м <sup>2</sup>	м <sup>3</sup> /год	м <sup>3</sup> /год	кВт	г/хв	мг/м <sup>3</sup>	мг/м <sup>3</sup>
1	0,01	0,00643	633,6	46,8	18	0,21	4500	257
2	0,01	0,00643	651,6	54	32	0,47	694	205
...	...	...	...	...	...	...	...	...
N	0,0025	0,00021	152	2,2	5	5	1826	116

Експериментальні результати перетворюються до відносного та безрозмірного вигляду, як у таблиці 2:

*Таблиця 2*

**Експериментальні дані, перетворені у безрозмірний вид, та у відносний вигляд від 0 до 1 /**

**Experimental data converted into dimensionless and relative kind from 0 to 1**

№	S	S пер	Lзаг	Lпер	W	З	max=130 C <sub>CO</sub>	max=250 C <sub>NOx</sub>
	м <sup>2</sup>	м <sup>2</sup>	м <sup>3</sup> /год	м <sup>3</sup> /год	кВт	г/хв	мг/м <sup>3</sup>	мг/м <sup>3</sup>
1	1	0,643	0,8145	0,828	0,32	0,039	0,016	0,674
2	1	0,643	0,855	0,736	0,355	0,458	0,003	0,757
...	...	...	...	...	...	...	...	...
N	0,25	0,084	0,186	0,188	0,075	0,333	1	1

Далі, за експертною оцінкою результатів експерименту створюється таблиця 3, що

представляє табличне вираження бінарного відношення вибору:

Таблиця 3

**Порівняння експериментальних режимів (порівнюється режим стовпчика з режимом рядка, якщо він кращий, то 1, навпаки – 0)/  
Experimental modes comparison table (compare column mode with line mode and if it is better than 1, on the contrary – 0)**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
2	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

За результатами таблиці 3 матричного представлення бінарного відношення вибору необхідно знайти вид математичної моделі вибору.

Наприклад, при наявності матриці бінарного відношення вибору у вигляді таблиці 4:

Таблиця 4

**Програмний пошук параметрів математичної моделі вибору /  
Software parameters search of choice mathematical model**

№	Крок ітерації	Параметр A1	Параметр A2	Параметр A3	Параметр A4	Параметр A5	Параметр A6	Похибка
1	15	-710	-1	32	-1	-31	0.1	10
2	42	-798	-0.8	41	-2.1	-37	-0.18	14
...	...	...	...	...	...	...	...	...
N	45	-798	-0.8	41	-2.1	-37	-0.18	14

Функція вибору у вигляді лінійної функції вибору має вигляд:

$$z=A0+A1X1+A2X2+A3X3+A4X4+A5X5 \quad (1)$$

Подальше ускладнення математичних моделей відбувається за допомогою самоорганізації [3].

Загальна схема алгоритмів самоорганізації має викладений нижче вигляд.

Повний опис об'єкту має вигляд:

$$\varphi=f(x1,x2,x3, \dots,xn) \quad (2)$$

Замінюється декількома рядами часткових описів:

Перший ряд селекції:

$$y1=f(x1,x2) \quad (3)$$

$$y2=f(x1,x3) \quad (4)$$

.....

$$ys=f(xn-1,xn) \quad (5)$$

де:  $s=c_n^2$

Другий ряд селекції:

$$z1=f(y1,y2) \quad (6)$$

$$z2=f(y1,y3) \quad (7)$$

.....

$$zp=f(ys-1,ys) \quad (8)$$

і т.д.,

де:  $p=c_s^2$ .

Задача оптимізації вибору зводиться до задачі узагальнення математичного програмування у вигляді: знайти параметри  $x^{(1)}$ ,  $x^{(2)}$ ,  $x^{(3)}$ , які відповідають обмеженням  $x^{(1)} \leq$ ,  $x^{(2)} \leq$ ,

$x^{(3)} \leq i$  забезпечують пошук рішень  $x_0$ , що  $x_0 R_s x \forall x \in \Omega$ .

Пошук  $R_s$  – оптимального рішення знаходиться у процесі еволюційного пошуку:

$$X_{ij} = S(G(X_{ik} - 1)) \quad (9)$$

де:  $k=1,2, \dots, n$ ;

$j=1,2, \dots, N_b$ ;

$G(x)$  – функція генерації нових рішень:

$$G(X)=X \cup Gh(X) \quad (10)$$

де:  $G(x)$  – множина нових рішень, що утворені у процесі пошуку.

$S(x)$  – функція вибору, у даному випадку це функція переваги:

$$S(X)=\{x \in X \mid \forall y \in \Omega, x R_s y\} \quad (11)$$

Доведено, що еволюційний пошук рішень забезпечує збіжність ітераційного процесу найбільш переважного рішення з вірогідністю 1.

### Висновок

Розглянута проблема моделювання та дослідження трубчастих газових нагрівачів показує необхідність оптимізації програми досліджень цих нагрівачів. Разом із об'єднанням існуючих математичних моделей реально досягнути ефективних рішень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горелки газовые промышленные. Общие технические требования : ГОСТ 21204-97 / Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Изд. офиц. ; [введ. 1998-07-01 ; взамен ГОСТ 21204-83]. – Минск, 1998. – 35 с. : табл. – (Межгосударственный стандарт).
2. 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. – С. 166–170. – (Безопасность жизнедеятельности).
3. Ивахненко А. Г. Принятие решений на основе самоорганизации / А. Г. Ивахненко, Ю. П. Зайченко, В. Д. Димитров. – Москва : Советское радио, 1976. – 128 с.
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. – 4 с.
5. 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 с.
6. Система повітряно-променевого опалення : пат. 83475 Україна (UA), МПК F24D 10/00, F24D 15/00 / винахідники та власники : Дудкин К. В., Іродов В. Ф., Ткачова В. В., Чорноморець Г. Я. – № u 201304161 ; заявл. 03.04.2013 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17. – 4 с.
7. Ткачова В. В. Індуктивне моделювання трубчастого газового нагрівача та пальника на пелетах / В. В. Ткачова, Р. В. Барсук // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. 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).

## REFERENCES

1. *Gorelki gazovye promyshlennye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya: GOST 21204-97* [Industrial gas burners. General specifications: State standards 21204-97] Mezghos. sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii [Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification]. Izd. ofic., vved. 1998-07-01 [Official publication, dated on 1998-07-01]. Minsk, 1998, 35 p. (in Russian).
2. Dudkin K.V., Tkacheva V.V. and Bobyr Ju.V. *Matematicheskoe modelirovanie trubchatykh gazovykh nagrevateley dlya bezopasnogo nagreva vody v obeme so svobodnoy poverkhnostyu* [Mathematical modeling of tube gas heaters for safe water heating in the free-surface volume]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie : Sb. nauch. trudov* [Construction, materials science, mechanical engineering : Coll. scientific. works]. 2011, issue 62, pp. 166–170. (in Russian).
3. Ivakhnenko A.G., Zaychenko Yu.P. and Dimitrov V.D. *Prinyatie resheniy na osnove samoorganizatsii*. [Making decision based on self-organization]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1976, 128 p.
4. Barsuk R.V., Irodov V.F. and Chornoivan A.A. *Prystrii dlia promenevoho obihrivu ta nahrivannia povitria: pat. 92674 Ukraina (UA), MPK F24D 10/00, F24D 15/00, F24S 15/00* [Device for radiant heating and air heating: pat. 92674 Ukraina (UA), Patent National Classification F24D 10/00, F24D 15/00, F24S 15/00]. No. u201403524; 2014. (in Ukrainian).
5. 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 [Prydniprov'ska Academy of Civil Engineering and Architecture]. No. u201015435, 2011. (in Ukrainian).
6. 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).
7. Tkachova V.V. and Barsuk R.V. *Induktyvne modeliuвання трубчастого газового нагрівача та пальника на пелетах* [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).