

К.В. ДУДКІН

Коллективне науково-виробниче підприємство «Енергокомплекс»

С.С. ДУБРОВСЬКИЙ, В.Ф. ІРОДОВ

Приватний заклад вищої освіти «Дніпровський технологічний університет «ШАГ»»

ЕВОЛЮЦІЙНИЙ ПОШУК З БІНАРНИМ ВІДНОШЕННЯМ ВИБОРУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРУБЧАСТОГО ГАЗОВОГО НАГРІВАЧА З ПРИРОДНИМ РУХОМ ТЕПЛОНОСІЯ

Розглядається система автономного опалення виробничого підприємств. Для опалення використовують трубчастий газовий нагрівач, який розташовується безпосередньо у виробничому приміщенні. Як паливо використовують природний або зріджений газ. У результаті аналізу досліджень і публікацій показано, що традиційно для інфрачервоних трубчастих газових обігрівачів використовують примусовий рух газоповітряної суміші теплоносія за допомогою припливних або витяжних вентиляторів. Наявність вентиляторів у складі обладнання для опалення збільшує капітальні та експлуатаційні витрати на опалення. Нове технічне рішення – трубчасті газові нагрівачі з природним рухом теплоносія, які не використовують вентилятори. Мета роботи – викласти результати розробки методів математичного моделювання для пошуку оптимальних конструктивних рішень трубчастого газового нагрівача з природним рухом теплоносія. Передбачається, що результати оптимізації дадуть змогу використовувати трубчасті газові нагрівачі з природним рухом теплоносія без вентиляторів у складі обладнання для опалення, що зменшить витрати на обладнання та підвищить надійність обладнання. Представлено математичну модель трубчастого газового нагрівача з природним рухом теплоносія у вигляді нелінійних звичайних диференціальних рівнянь, яка використовує другий закон Кірхгофа на відміну від математичних моделей лінійних трубчастих нагрівачів. Сформульовано задачу оптимізації трубчастих газових нагрівачів за наявності обмежень у вигляді рівності та нерівності. Для розв'язання задач розрахунку та оптимізації трубчастих газових нагрівачів з природним рухом теплоносія застосовувався алгоритм еволюційного пошуку з бінарними відношеннями вибору. Наведене бінарне відношення вибору для розв'язання задач оптимізації трубчастих газових нагрівачів з природним рухом теплоносія. Бінарне відношення вибору містить функцію загальної ефективності трубчастого нагрівача у вигляді коефіцієнта корисної дії та дві функції обмеження. Перша функція обмеження – безрозмірна арифметична втрата тиску по всьому нагрівачу, яка повинна бути нульовою для нагрівача з природним рухом теплоносія; друга – безрозмірний вихід за дозволу температуру зовнішньої поверхні нагрівача. Наведено результати оптимізації та розрахунків режиму роботи нагрівача з природним рухом теплоносія, які свідчать про можливість досягнення значної ефективності.

Ключові слова: математична модель, еволюційний пошук, бінарні відношення вибору, трубчасті газові нагрівачі, природний рух теплоносія.

K. V. DUDKIN

Collective Research and Production Enterprise "Energocomplex"

S. S. DUBROVSKYI, V. F. IRODOV

Private higher educational institution "Dnipro Technological University "STEP"

EVOLUTIONARY SEARCH WITH BINARY CHOICE RELATIONS FOR OPTIMIZATION OF TUBE GAS HEATER WITH NATURAL MOVEMENT OF THE HEAT CARRIER

The system of autonomous heating of industrial enterprises is considered. For heating, a tubular gas heater is used, which is placed directly in the production room. Natural or liquefied gas is used as fuel. As a result of the analysis of studies and publications, it is shown that traditionally for infrared tubular gas heaters, forced movement of the gas-air mixture of the heat carrier is used with the help of supply or exhaust fans. The presence of fans as part of heating equipment increases capital and operating costs for heating. A new technical solution is tubular gas heaters with natural movement of the heat carrier, which do not use fans. The purpose of this work is to present the results of the development of mathematical modeling methods for finding optimal design solutions for a tubular gas heater with natural movement of the heat carrier: it is assumed that the results of the optimization will allow the use of tubular gas heaters with the natural movement of the coolant without fans as part of the heating equipment, which will reduce equipment costs and increase the reliability of the equipment. A mathematical model of a tubular gas heater with natural movement of the heat carrier in the form of nonlinear ordinary differential equations is presented, which uses Kirchhoff's second law, in contrast to

mathematical models of linear tubular heaters. The problem of optimizing tubular gas heaters in the presence of restrictions in the form of equality and inequality is formulated. To solve the problems of calculation and optimization of tubular gas heaters with natural movement of the heat carrier, an evolutionary search algorithm with binary choice relations was used. The binary selection ratio for solving optimization problems of tubular gas heaters with natural movement of the heat carrier is given. The binary selection relation includes a function of the overall efficiency of the tube heater in the form of a coefficient of effectiveness and two constraint functions. The first limitation function is the dimensionless arithmetic pressure loss throughout the heater, which must be zero for a heater with a natural movement of the heat carrier; the second limitation function is dimensionless output for the permitted temperature of the outer surface of the heater. The results of the optimization and calculations of the operating mode of the heater with the natural movement of the heat carrier are presented, which indicate the possibility of achieving significant efficiency.

Key words: mathematical model, evolutionary search, binary choice relations, tubular gas heaters, natural movement of the heat carrier.

Постановка проблеми

Для опалення виробничих приміщень використовують інфрачервоні трубчасті газові обігрівачі. Для забезпечення руху газоповітряної суміші всередині трубчастого нагрівача використовують припливні або витяжні вентилятори. Наявність вентиляторів у складі обладнання веде до збільшення витрат на опалення та зменшує надійність роботи всього обладнання. Особливо привабливим є використання таких технічних рішень для систем трубчастого газового опалення, у яких рух теплоносія забезпечується природним шляхом і не потребує вентиляторів. Відомі технічні рішення у вигляді трубчастих газових нагрівачів з природним рухом теплоносія, для яких експериментально підтверджено можливість роботи автоматики безпеки, що відповідає чинним нормам до трубчастих газових обігрівачів. Але необхідно знаходити такі конструктивні параметри роботи трубчастих нагрівачів, які б забезпечували їх найбільш привабливу (оптимальну) роботу як нагрівачів з природним рухом теплоносія. Для виконання поставленого завдання необхідно сформулювати задачу пошуку оптимальних рішень для найбільш привабливих параметрів роботи трубчастих газових нагрівачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомі технічні рішення із застосуванням інфрачервоного обігріву промислових і сільськогосподарських підприємств [1–5]. За кордоном значний розвиток отримали трубчасті системи інфрачервоного опалення [6; 7]. Вимоги до автоматики безпеки трубчастих інфрачервоних обігрівачів вітчизняного та закордонного виробництва, які можна застосовувати на Україні, наведені у [8]. Нові технічні рішення з трубчастими газовими нагрівачами в системах теплопостачання представлені в [9]. Елементи методичного та технічного забезпечення для побудови трубчастих газових нагрівачів з природним рухом теплоносія викладені в [10]. Але як ставити та виконувати завдання знаходження оптимальних рішень при проектуванні трубчастих газових нагрівачів з природним рухом теплоносія – таке завдання раніше не ставили й не виконували, що становить зміст цієї статті.

Мета дослідження

Мета дослідження – отримати алгоритмічне забезпечення для ухвалення оптимальних рішень у процесах конструювання та проектування систем автономного теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами.

Ціль роботи – розробити алгоритм еволюційного пошуку з бінарним відношенням вибору найбільш привабливих (оптимальних) рішень для трубчастих газових нагрівачів з природним рухом теплоносія.

Викладення основного матеріалу дослідження

Принципову схему трубчастого газового нагрівача наведено на Рис. 1. Можуть змінюватися такі параметри: діаметр нагрівача, загальна довжина нагрівача та довжина окремих

ділянок. Усі ці параметри впливають на роботу нагрівача й на ефективність його роботи. Ефективність нагрівача характеризується тепловими потоками, що передаються від нагрівача в опалювальний простір у вигляді променевого складника Q_{II} та складника, що передається конвекцією Q_K .

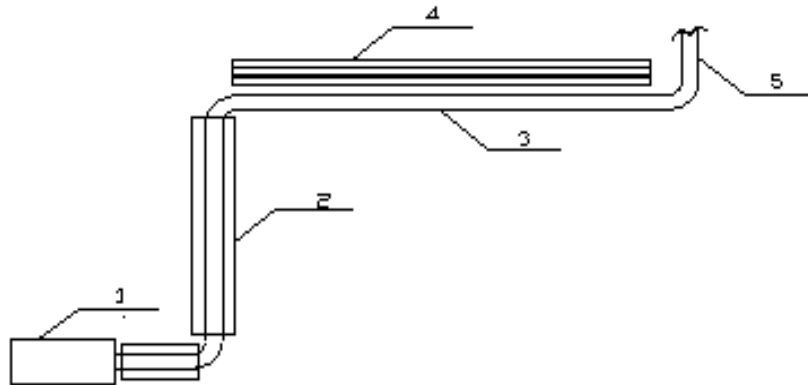


Рис. 1. Принципова схема трубчастого газового нагрівача з природним рухом теплоносія

1 – газовий пальник; 2 – горизонтально-вертикальна ділянка підйому нагрітої суміші з тепловою ізоляцією; 3 – основна ділянка нагрівача; 4 – відбивач випромінювання; 5 – ділянка видалення продуктів згоряння зовні

Спираючись на [11], математична модель теплового й гідравлічного режиму ділянки трубчастого газового нагрівача з теплообміном представлялась у вигляді

$$M = \rho wF = \text{const} \quad (1)$$

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

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

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

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

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

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

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

$$dQ_1 = dQ_{IK} + dQ_{III} \quad (9)$$

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

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

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

де ρ, ρ_a – щільність газоповітряної суміші в нагрівачі та повітря в навколишньому середовищі, $\text{кг}/\text{м}^3$;

w – середня лінійна швидкість руху газоповітряної суміші по випромінювальній трубі, $\text{м}/\text{с}$; F – площа поперечного перерізу труби, м^2 ;

p, T – абсолютні тиск та температура газоповітряної суміші в цьому перетині випромінювальної труби, $\text{Па}, \text{К}$;

R – газова постійна, $\text{Дж}/(\text{кг} \text{ К})$, dp – перепад тиску при плинні газоповітряної суміші у випромінювальній трубі на ділянці довжиною dx ;

Λ – коефіцієнт тертя;

D – внутрішній діаметр труби, м ;

dQ_1 – тепловий потік від газоповітряної суміші до стінки випромінювальної труби, переданий конвекцією та теплопровідністю, Вт ;

α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від потоку газоповітряної суміші до стінки труби, $\text{Вт}/\text{м}^2 \text{ К}$;

T_{wi} – температура внутрішньої поверхні стінки труби в цьому перетині;

dQ_2 – тепловий потік від внутрішньої поверхні стінки випромінювальної труби до зовнішньої поверхні, переданий теплопровідністю, Вт ;

λ, δ, T_{wo} – відповідно коефіцієнт теплопровідності матеріалу, $\text{Вт}/\text{м} \text{ К}$; товщина, м та температура зовнішньої поверхні стінки випромінювальної труби, К ;

dQ_3, dQ_4 – теплові потоки випромінюванням і конвекцією від поверхні випромінювальної труби в навколишнє середовище опалювального приміщення відповідно, Вт ;

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від поверхні випромінювальної труби в навколишнє середовище опалювального приміщення;

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 використовували для моделювання інфрачервоних трубчастих обігрівачів або трубчастих нагрівачів наявністю гідростатичного складника $dh(\rho_a - \rho)g$.

Розроблений загальний підхід для використання моделі (1)–(12) при розрахунку теплового та гідравлічного режиму нагрівачів. Система рівнянь теплообміну (1)–(12) замкнена, але нелінійна. Після перетворень система рівнянь математичної моделі (1)–(12) приходить до вигляду

$$dp = -\lambda / D(l) * \rho * w^2 / 2 * dl + (\rho_a - \rho) * g * d(h(l)) \quad (13)$$

$$d\rho = (dp - \rho * R * d(T(p, \rho))) / R * T(p, \rho) \quad (14)$$

$$dw = (-w * F(l) * dp - \rho * w * d(F(l))) / \rho \quad (15)$$

де p, ρ, w – шукані параметри трубчастого нагрівача, l – the parameter of the length of the heater over which integration is performed. $D(l), h(l), T(p, \rho), F(l)$ – відомі функції.

Для розв'язання задачі розрахунку теплового й гідравлічного режимів роботи трубчастого нагрівача з природним рухом теплоносія застосовувався алгоритм еволюційного пошуку найбільш привабливих рішень [12–14].

Відповідно до [12–14], розглядається пошук найбільш привабливих рішень щодо бінарного відношення вибору (R_S -оптимальних) рішень: на множині допустимих рішень Ω необхідно знайти таке рішення $x \in \Omega$, що для всіх $y \in \Omega$ виконується $x R_S y$, де R_S – відоме бінарне відношення вибору.

Алгоритм еволюційного пошуку R_S -оптимального рішення має вигляд:

$$X_{\ell k} = S(G(X_{\ell(k-1)})), \quad k=1,2,\dots$$

де $X_{\ell k}$ – множина найбільш привабливих рішень по відношенню вибору R_S k -го кроку ітерації для ℓ -ої гілки еволюційного процесу;

$X_{\ell(k-1)}$ – те саме для $(k-1)$ -го кроку ітерації; $G(X)$ – функція генерації, яка породжена відношенням генерації R_G ; $S(X)$ – функція вибору, що породжена відношенням вибору.

$$S(X) = \{x \in X / \forall y \in [X \setminus S(X)] x R y\},$$

$$G(X) = X \cup Gn(X),$$

$$Gn(X) = \{y \in \Omega / \exists x \in X, y R_G x, \mu(y, x) > 0\},$$

де R_G – нечітке відношення генерації з функцією належності $\mu(y, x) : \Omega \times \Omega \rightarrow [0, 1]$.

Для однозначності визначення припускаємо, що функція генерації містить постійне число рішень – N_g , а функція вибору – N_l рішень.

Шуканими параметрами при оптимізації нагрівачів є сукупність $x \in \{l_i, D, \alpha_{air}\}$, де l_i, D, α_{air} – довжини окремих ділянок трубчастого частини нагрівача, його діаметр та коефіцієнт надлишку повітря. Для ухвалення рішень при моделюванні та оптимізації трубчастого газового нагрівача, безумовно, найважливішим показником його роботи є коефіцієнт корисної дії η як відношення корисної теплової енергії, отриманої опалювальним середовищем, до енергії газового палива, що надійшла на газовий палик нагрівача. Для оптимізації нагрівачів слід також узяти до уваги суттєві обмеження на параметри рішення.

По-перше, це обмеження у вигляді рівності на загальну втрату тиску в нагрівачі, що відповідає виконанню другого закону Кірхгофа, який має інтегральний вигляд:

$$\int_{l_i} dp(l_i) = \Delta p = const \quad (16)$$

По-друге, це обмеження у вигляді нерівності, яке характеризує обмеженість температури на зовнішній поверхні трубчастого нагрівача:

$$\Delta T_e(l_i) = T_e(l_i) - T_{\max} \leq 0 \quad (17)$$

Для пошуку найбільш привабливого рішення для трубчастого газового нагрівача з природним рухом теплоносія бінарне відношення вибору може бути представлено в такому вигляді.

Функція безрозмірної ефективності у вигляді $E_1(x) = \eta$. Загальна штрафна функція у вигляді:

$$E_2(x) = E_{21}(x) + E_{22}(x),$$

де $E_{21}(x)$ – безрозмірна втрата тиску по всьому нагрівачу,

$$E_{21}(x) = \int_{inlet}^{outlet} dp_i(x) / abs(p_{max} - p_{inlet}),$$

$E_{22}(x)$ – безрозмірний вихід за дозволену температуру зовнішньої поверхні нагрівача

$$E_{22}(x) = \sum (\Delta T_e(x_i) / T_{max}),$$

де $\Delta T_e(x_i) = (T_e(x_i) - T_{max})$, якщо $T_e(x_i) \leq T_{max}$ або $\Delta T_e(x_i) = 0$, якщо $T_e(x_i) \geq T_{max}$.

Загальне відношення вибору R_{SS} між двома можливими рішеннями x та y має вигляд:

$$xR_{SS}y = [E_2(x) \leq 0 \wedge E_2(y) > 0] \vee$$

$$[E_2(x) > 0 \wedge E_2(y) > 0 \wedge E_2(x) \leq E_2(y)] \vee$$

$$[E_2(x) \leq 0 \wedge E_2(y) \leq 0 \wedge E_1(x) \geq E_1(y)]$$

Алгоритм еволюційного пошуку найбільш привабливих рішень для оптимізації параметрів трубчастого газового нагрівача з природним рухом теплоносія представлено нижче.

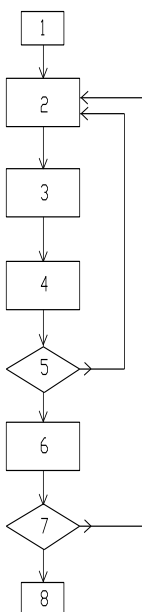


Рис. 2. Схема алгоритму еволюційного пошуку розв’язання задачі оптимізації трубчастого газового нагрівача з природним рухом теплоносія

1 – початок; 2 – генерація можливих рішень; 3 – визначення значень цільової функції та функцій обмеження після чисельного інтегрування рівнянь математичної моделі нагрівача для кожного набору шуканих параметрів можливого рішення; 4 – вибір найбільш привабливих рішень за бінарним відношенням вибору; 5 – усі гілки процесу розраховані; 6 – розрахунок нових значень параметрів пошуку; 7 – чи досягнута необхідна точність пошуку; 8 – кінець

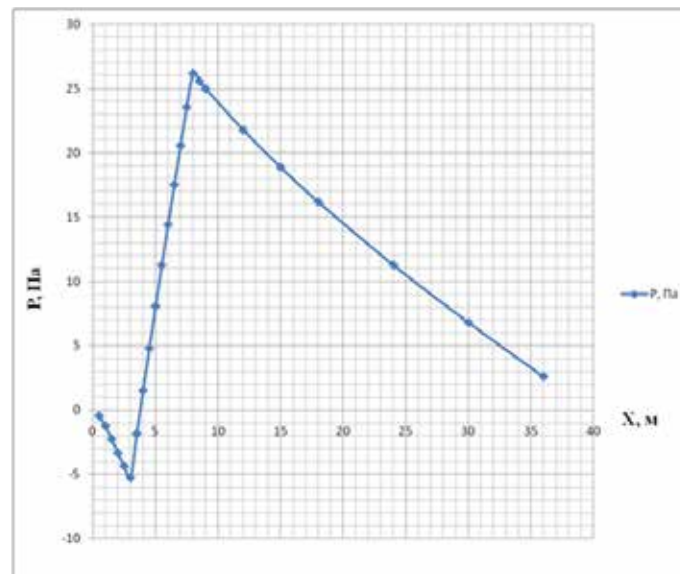


Рис. 3. Зміна тиску по довжині трубчастого нагрівача з природною циркуляцією теплоносія

Витрата природного газу – $7,3 \text{ м}^3/\text{год}$, витрата повітря – $200 \text{ м}^3/\text{год}$. Діаметр труби нагрівача 150 мм, ділянки: початкова горизонтальна – 3 м, ділянка вертикального підйому – 5 м, основна ділянка – 28 м

Наочно видно, що тиск у кінці нагрівача лише трохи вищий за тиск на початку нагрівача, тобто з достатньою точністю виконується другий закон Кірхгофа для природного руху теплоносія. Остаточна втрата повітря на виході нагрівача величиною 3 Па може бути за рахунок місцевого опору ділянки видалення продуктів згоряння зовні.

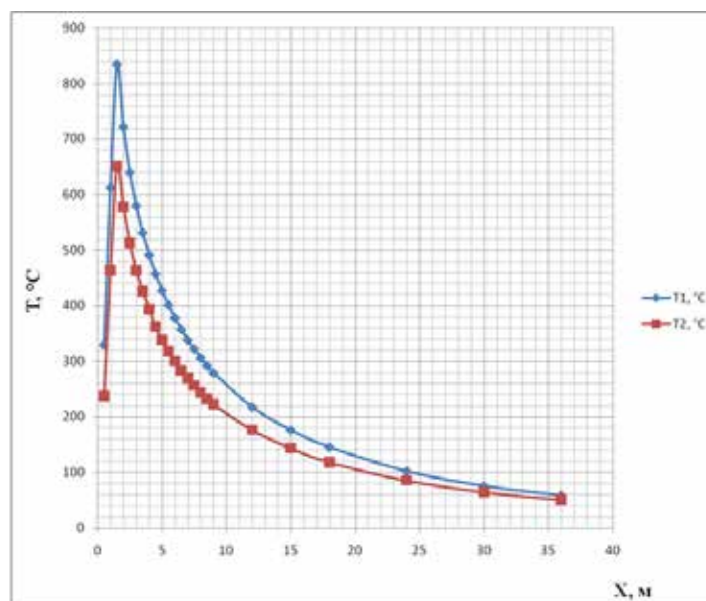


Рис. 4. Зміна температури газоповітряної суміші всередині трубчастого газового нагрівача (T1) та зовнішньої температури труби нагрівача (T2) по довжині нагрівача (x) з природною циркуляцією теплоносія

Витрата природного газу – $7,3 \text{ м}^3/\text{год}$, витрата повітря – $200 \text{ м}^3/\text{год}$. Діаметр труби нагрівача 150 мм, ділянки: початкова горизонтальна – 3 м, ділянка вертикального підйому – 5 м, основна ділянка – 28 м

Наочно видно, що зовнішня температура труби нагрівача не перевищує максимально допустиму температуру $T_{\text{max}} = 630$ град.

Для знайденого рішення коефіцієнт корисної дії нагрівача дорівнює $\eta = 0.94$, тобто трубчастий нагрівач має достатньо високу ефективність роботи без використання вентиляторів або іншого механічного примуса для циркуляції теплоносія.

Висновки

1. Розроблено алгоритм еволюційного пошуку з бінарним відношенням вибору найбільш привабливих (оптимальних) рішень для трубчастих газових нагрівачів з природним рухом теплоносія.

2. Результати розрахунків наочно показали, що можна отримати найбільш привабливе рішення для трубчастого газового нагрівача, що відповідає можливості його використання з природним рухом теплоносія без вентиляторів за досить високої ефективності його роботи (к.к.д.=0.94).

Список використаної літератури

1. Худенко А. А. Шляхи реалізації енергетичної стратегії України. *Нова тема*. 2006. № 1. С. 10–13. URL: <https://lukl.kyiv.ua/wp-content/uploads/images/mat/energetyka.doc>.
2. Болотських М. М. Інфрачервоний обігрів теплиць за допомогою електричних довгохвильових нагрівачів панелей. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2015. № 9 (140). С. 43–52. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecee_2012_4_9.
3. Строй А. Ф., Припотень Ю. К. Техніко-економічне обґрунтування та визначення галузі застосування променевого газового опалення. *Збірник наукових праць Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Серія : Галузеве машинобудування, будівництво*. 1999. № 4. С. 113–121. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/1690>.
4. Ковальчек М. Опалення об'єктів великих об'ємів газовими пальниками інфрачервоного випромінювання. *Ринок інсталяційний*. 1998. № 11. С. 14–16. URL: <https://pavlogradteplo.com.ua/infrachervoni-trubni-hazovi-obihrivachi/seriia-tsu/35-references/102-mashinostroenie>.
5. Желих В. М. Розробка теплофізичних основ теплозабезпечення виробничих комплексів на базі комбінованих систем опалення із застосуванням інфрачервоного нагріву: дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.06 Ін-т техн. теплофізики Нац. акад. наук України. Київ, 2013. 215 с.
6. Gas-fired infrared heating for poultry houses/U.S.A.: Roberts-Gordon LLC, 2012. 35 p.
7. Infrared Handbook / Buffalo: Roberts Gordon, Inc., 1994. 33 p.
8. Газопостачання. Інженерне обладнання будинків і споруд. ДБН В.2.5-20-2018 Київ : Держстандарт України, 2018. 286 с.
9. Іродов В. Ф., Хацкевич Ю. В., Чорноморець Г. Я. Розвиток технічних рішень теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. Вип. 5. С. 29–35. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/bitstream/123456789/223/1/Irodov.pdf>.
10. Дудкін К. В., Данішевський В. В., Ткачова В. В. Методичне та технічне забезпечення для побудови трубчастих газових нагрівачів з природним рухом теплоносія. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серія : Стародубовские чтения*. 2013. Вип. 67. С. 117–121. URL: <http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmssc>.
11. Іродов В. Ф., Ткачова В. В., Чорноморець Г. Я. Теплогенеруючі установки та їх математичне моделювання. Дніпропетровськ : Будинок друку, 2015. 80 с.
12. Irodov V. F., Khatskevych Yu.V. Convergence of the evolutionary algorithms for optimal solution with binary choice relations. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серія : Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве*. 2017. Вип. 98. С. 91–96. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmeect_2017_98_16.
13. Irodov V., Shaptala M., Dudkin K., Shaptala D., Prokofieva H. Development of evolutionary search algorithms with binary choice relations when making decisions for pellet tabular heaters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. No 3/8 (111). P. 50–59.

14. Irodov V., Dubrovskiy S., Dudkin K., Chirin D. Evolutionary Search for Some Generalized Mathematical Programming Problems with Binary Choice Relations. Elsevier BV, 2024. 12 p. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4750911>.

References

1. Khudenko, A.A. (2006). Shliakhy realizatsii enerhetychnoi stratehii Ukrainy [Ways of implementing the energy strategy of Ukraine]. *Nova tema*, 1, 10–13. Retrieved from: <https://lukl.kyiv.ua/wp-content/uploads/images/mat/energetyka.doc> [in Ukrainian].
2. Bolotskykh, M.M. (2015). Infrachervonyi obihriv teplyts za dopomohoiu elektrychnykh dovhokhvylovykh nahrivaiuchykh panelei [Infrared heating of greenhouses using electric long-wave heating panels]. *Enerhozberezhennia. Enerhetyka. Enerhoaudyt*, 9 (140), 43–52. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecee_2012_4_9 [in Ukrainian].
3. Stroi, A. F., & Prypoten, Yu.K. (1999). Tekhniko-ekonomichne obruntuvannia ta vyznachennia haluzi zastosuvannia promenevoho hazovoho opalennia [Technical and economic justification and definition of the field of application of radiant gas heating]. *Zbirnyk nauk. prats Poltav. nats. tekhn. unstitut im. Yuriiia Kondratiuka*, 4, 113–121. Retrieved from: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PolNTU/1690> [in Ukrainian].
4. Kovalchek, M. (1998). Opalennia obektiv velykykh obiemiv hazovymy palnykamy infrachervonoho vyprominiuvannia [Heating large objects with infrared gas burners]. *Rynok instaliatsiinyi*, 11, 14–16. Retrieved from: <https://pavlogradteplo.com.ua/infrachervoni-trubni-hazovi-obihrivachi/seriia-tsu/35-references/102-mashinostroenie> [in Ukrainian].
5. Zhelykh, V.M. (2013). *Rozrobka teplofizychnykh osnov teplozabezpechennia vyrobnychykh kompleksiv na bazi kombinovanykh system opalennia iz zastosuvanniam infrachervonoho nahrivu* [Development of thermophysical foundations of heat supply of production complexes based on combined heating systems using infrared heating]. *Doctor's thesis*. In-t tekhn. teplofizyky Nats. akad. nauk Ukrainy. Kyiv [in Ukrainian].
6. Roberts-Gordon, LLC. (2012). *Gas-fired infrared heating for poultry house* [Gas-fired infrared heating for poultry houses]. Buffalo: Roberts Gordon [in English].
7. Roberts-Gordon, LLC (1994). *Infrared Handbook* [Infrared Handbook] Buffalo: Roberts Gordon [in English].
8. *Hazopostachannia. Inzhenerne obladnannia budynkiv i sporud* [Gas supply. Engineering equipment of buildings and structures]. (2018). DBN V.2.5-20-2018: 2018. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
9. Irodov, V. F. Khatskevych, Yu.V., & Chornomorets, H.Ia. (2017). Rozvytok tekhnichnykh rishen teplopostachannia z trubchastymy hazovymy nahrivachamy [Development of technical solutions for heat supply with tubular gas heaters]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury : zb. nauk. pr.*, 5, 29–35. Retrieved from: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/bitstream/123456789/223/1/Irodov.pdf> [in Ukrainian].
10. Dudkin, K. V., Danishevskiy, V.V., & Tkachova, V.V. (2013). Metodychne ta tekhnichne zabezpechennia dlia pobudovy trubchastykh hazovykh nahrivachiv z pryrodnym rukhom teplonosiiia [Methodical and technical support for the construction of tubular gas heaters with natural movement of the coolant]. *Stroytelstvo. Materyalovedenye. Mashynostroenye. Seryia : Starodubovskye chtenyia*. 67, 117–121. Retrieved from: <http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmssc> [in Ukrainian].
11. Irodov, V. F., Tkachova, V.V., & Chornomorets, H.Ia. (2015) *Teploheneruiuchi ustanovky ta yikh matematychne modeliuвання : navch. posib. [Heat generating units and their mathematical modeling]*. Dnipropetrovsk : Budynok druku [in Ukrainian].
12. Irodov, V. F., & Khatskevych, Yu.V. (2017). *Convergence of the evolutionary algorithms for optimal solution with binary choice relations* [Convergence of the evolutionary algorithms for

- optimal solution with binary choice relations]. *Stroytelstvo. Materyalovedenye. Mashynostroenye. Seryia : Enerhetyka, ekolohyia, kompiuternie tekhnolohyy v stroytelstve*, 98, 91–96. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmeeet_2017_98_16 [in English].
13. Irodov, V., Shaptala, M., Dudkin, K., Shaptala, D., & Prokofieva, H. (2021) *Development of evolutionary search algorithms with binary choice relations when making decisions for pellet tabular heaters* [Development of evolutionary search algorithms with binary choice relations when making decisions for pellet tabular heaters]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 3 (8), 50–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235837> [in English].
 14. Irodov, V., Dubrovskiy, S., Dudkin, K., & Chirin, D. (2024) *Evolutionary Search for Some Generalized Mathematical Programming Problems with Binary Choice Relations* [Evolutionary Search for Some Generalized Mathematical Programming Problems with Binary Choice Relations]. *Elsevier BV*, <https://doi.org/10.2139/ssrn.4750911> [in English].

Дудкін Костянтин Вячеславович – к.т.н., заступник директора з наукової роботи Колективного науково-виробничого підприємства «Енергокомплекс». E-mail: kostiantyn.dudkin@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5361-2981.

Дубровський Сергій Станиславович – к.т.н., ректор Дніпровського технологічного університету «Шаг». E-mail: dubrovskiy_s@itstep.org, ORCID: 0000-0001-6957-6620.

Іродов В'ячеслав Федорович – д.т.н., професор кафедри інформаційних технологій Дніпровського технологічного університету «Шаг». E-mail: vfirodov@i.ua, ORCID: 0000-0001-8772-9862.

Dudkin Kostiantyn Viacheslavych – Candidate of Technical Sciences, Deputy Director for Scientific Work of the Collective Research and Production Enterprise “Energocomplex”. E-mail: kostiantyn.dudkin@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5361-2981.

Dubrovskiy Serhii Stanislavovych – Candidate of Technical Sciences, Rector of the Private higher educational institution “Dnipro Technological University “STEP”. E-mail: dubrovskiy_s@itstep.org, ORCID: 0000-0001-6957-6620.

Irodov Vyacheslav Fedorovych – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Technologies of the Private higher educational institution “Dnipro Technological University “STEP”. E-mail: vfirodov@i.ua, ORCID: 0000-0001-8772-9862.