

УДК 697.92

Шепітчак Володимир Богданович

Асистент, ORCID: 0000-0001-5883-548X

Національний університет "Львівська політехніка", Львів

Желих Василь Михайлович

Доктор технічних наук, професор, ORCID: 0000-0002-5063-5077

Національний університет "Львівська політехніка", Львів

Редько Андрій Олександрович

Доктор технічних наук, професор, ORCID: 0000-0003-2331-7273

Харківський національний університет будівництва та архітектури, Харків

**ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФРАЧЕРВОНИХ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ ПРИ ЇХ
ЗАСТОСУВАННІ У ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕННЯХ**

Анотація. Одним із важливих питань енергетичної політики країн ЄС та України є економне використання енергоносіїв. Ефективним способом забезпечення температурного режиму у виробничому приміщенні є використання інфрачервоних нагрівачів. Для забезпечення параметрів мікроклімату у виробничому приміщенні важливо розглядати комплексно систему опалення та вентиляції. Дані дослідження стосувалися визначення впливу швидкості руху повітряних потоків, потужності інфрачервоного нагрівача, ступеня чорноти огорожуючих конструкцій на температурний режим в робочій зоні виробничого приміщення. Отримані графічні та емпіричні залежності температури повітря в робочій зоні від інтенсивності опромінення, ступеня чорноти поверхні опромінення при різних швидкостях руху повітря.

Результати експериментальних досліджень показали, що при збільшенні швидкості руху повітря розподіл температур в поперечному перетині набуває рівномірного характеру.

Ключові слова: *опалення; тепло забезпечення; енергоощадні системи; променева енергія; площа опромінення; інтенсивність опромінення; інфрачервоні обігрівачі; поворотні випромінювачі; інфрачервона система опалення*

Вступ

Серед існуючих систем теплозабезпечення виробничих приміщень поширеними є системи повітряного опалення та системи конвективного опалення. Для забезпечення необхідного повітрообміну та підтримання сталої температури повітря у виробничому приміщенні, при застосуванні системи повітряного опалення, нагрів зовнішнього припливного повітря супроводжується витратами великої частки енергоресурсів.

Тому завданням сучасних систем теплозабезпечення виробничих приміщень є підтримання необхідних температурних параметрів в робочій зоні, що дозволить значно скоротити енерговитрати протягом економічно обґрунтованого періоду виробничого процесу.

Таким чином, для таких приміщень доцільно застосовувати інфрачервоні системи опалення. При

застосуванні цих систем здійснюється локальний нагрів робочої зони [1, 2, 3, 4].

За рахунок застосування таких систем можна досягнути зниження температури повітря в приміщенні на декілька градусів, що є важливим резервом теплової енергії. Пряме променеве опалення робочої зони й можливість забезпечення локального нагріву, на відміну від конвективного опалення, дають значний економічний ефект.

Експериментальне дослідження

Для проведення аналітичних досліджень температурного режиму робочої поверхні виробничих приміщень була розроблена спрощена модель теплових потоків (рис. 1). Вона відображає напрямки теплових потоків та їх взаємодію з джерелами теплоти. Оперуючи тепловими параметрами, можливо розробити тепловий баланс у зоні перебування з подальшим визначенням температурного режиму.

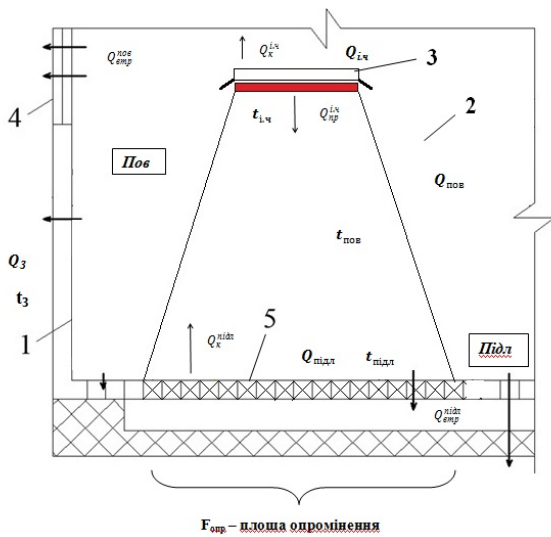


Рисунок 1 - Схема теплових потоків у зоні перебування:
 1 – зовнішня стіна; 2 – зона перебування;
 3 – інфрачервоний нагрівач; 4 – вікно; 5 – підлога.

де $Q_{\text{п}}, [\text{Вт}]$ – тепловий потік (теплопровідність) через підлогу;

$Q_{\text{к}}^{\text{пов}}, [\text{Вт}]$ – тепловий потік (конвективний) від підлоги до повітря;

$Q_{\text{пр}}, [\text{Вт}]$ – тепловий потік (променевиий) від інфрачервоного джерела до підлоги;

$Q_{\text{к}}^{\text{і.ч}}, [\text{Вт}]$ – тепловий потік (конвективний) від інфрачервоного нагрівача до повітря;

$Q_{\text{к}}^{\text{підл}}, [\text{Вт}]$ – тепловий потік (конвективний) від повітря до підлоги;

$Q_{\text{кпер}}, [\text{Вт}]$ – тепловий потік (теплопередача) через підлогу до довкілля.

Тепловий баланс набуде такого вигляду:

$$Q_{\text{пр}} + Q_{\text{к}}^{\text{і.ч}} + Q_{\text{к}}^{\text{підл}} - Q_{\text{к}}^{\text{пов}} - Q_{\text{п}} - Q_{\text{кпер}} = 0. \quad (1)$$

Теплопровідність через підлогу визначаємо наступним чином:

$$dQ_{\text{п}} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{\text{підл}} - t_{\text{з}}) \cdot dF_{\text{підл}}, \quad (2)$$

де $\lambda, [\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})]$ – коефіцієнт теплопровідності підлоги;

$\delta, [\text{м}]$ – товщина шару підлоги;

$t_{\text{підл}}, [^\circ\text{C}]$ – температура поверхні підлоги;

$t_{\text{з}}, [^\circ\text{C}]$ – температура зовнішнього повітря;

$F_{\text{підл}}, [\text{м}^2]$ – площа підлоги, що опромінюється;

Тепловіддачу від підлоги до повітря визначаємо, як

$$dQ_{\text{к}}^{\text{пов}} = \alpha_{\text{підл}} \cdot (t_{\text{підл}} - t_{\text{пов}}) \cdot dF_{\text{підл}}, \quad (3)$$

де $\alpha_{\text{підл}}, [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$ – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні підлоги;

$t_{\text{пов}}, [^\circ\text{C}]$ – температура повітря;

Опромінення підлоги інфрачервоним нагрівачем знаходимо наступним чином:

$$dQ_{\text{пр}}^{\text{і.ч}} = c_{\text{пр}} \cdot (t_{\text{і.ч}}^4 - t_{\text{підл}}^4) \cdot dF_{\text{підл}}, \quad (4)$$

де $c_{\text{пр}}, [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)]$ – приведений коефіцієнт випромінювання;

$$c_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{пр1-2}} \cdot c_0 \cdot \varphi_{1-2} \cdot 10^{-8}, \quad (5)$$

де $\varepsilon_{\text{пр1-2}} = (\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} - 1)$ – коефіцієнти випромінювань робочих поверхонь;

c_0 – стала Стефана-Больцмана;

φ_{1-2} – кутовий коефіцієнт опромінення поверхонь, $\varphi_{1-2} = \frac{a}{h \cdot \pi}$;

h , – відстань від випромінювача до води,

a , – половина ширини зони опромінення.

$t_{\text{і.ч}}, [^\circ\text{C}]$ – температура поверхні інфрачервоного джерела.

Величина ефективних коефіцієнтів теплообміну визначається, як сума коефіцієнтів конвективного і радіаційного теплообміну:

$$a = a_{\text{к}} + a_{\text{р}} = a_{\text{к}} + c_{\text{пр}} \cdot 10^{-8} \cdot (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2). \quad (6)$$

Теплообмін від променевого нагрівача до повітря рівний:

$$dQ_{\text{к}}^{\text{і.ч}} = \alpha_{\text{і.ч}} \cdot (t_{\text{і.ч}} - t_{\text{пов}}) \cdot dF_{\text{і.ч}}, \quad (7)$$

де $\alpha_{\text{і.ч}}, [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$ – коефіцієнт тепловіддачі від екрану інфрачервоного випромінювача до повітря;

$F_{\text{і.ч}}, [\text{м}^2]$ – площа поверхні екрану інфрачервоного випромінювача.

Тепловіддачу від повітря до підлоги обчислюємо:

$$dQ_{\text{к}}^{\text{підл}} = \alpha_{\text{підл}} \cdot (t_{\text{пов}} - t_{\text{підл}}) \cdot dF_{\text{підл}}, \quad (8)$$

Теплопередачу через підлогу знаходимо за наступною формулою:

$$dQ_{\text{кпер}} = k \cdot (t_{\text{пов}} - t_{\text{з}}) \cdot dF_{\text{підл}}, \quad (9)$$

де $k, [\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})]$ – коефіцієнт теплопередачі через підлогу; який визначається:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (10)$$

Для моделювання теплових взаємодій площі опромінення запропонована теорія графів. Цю зону представлено, як систему теплових ємностей, між

елементами яких відбувається теплообмін, що взаємодіє із джерелами теплоти (рис. 2) [5, 6, 7].

У досліджуваній зоні виділені такі теплові ємності: повітря (*Пов.*) та підлога (*Підл.*) виробничого приміщення. Для технологічної зони джерелами теплоти є: інфрачервоний нагрівач ($Q_{i.ч.}$); доквілля (Q_3), що зображені як вершини (V_1) графа (G_1). Теплові потоки Теплові потоки у приміщенні q_i^{np} , що відповідають теплообміну між *i*-ми джерелами теплоти і тепловими ємностями на графі зображено у вигляді ребер (E_1), які пов'язують вершини.

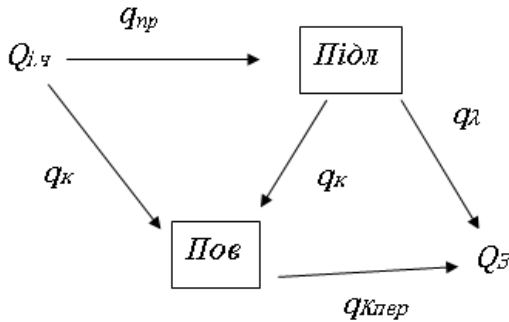


Рисунок 2 - Графік теплових потоків у зоні опромінення

Отже, множина вершин графа становить:

$$V_1(G_1) = \{Пов.; Підл.; Q_{i.ч.}; Q_3\}, \quad (11)$$

а множина ребер:

$$E_1(G_1) = \{(Q_{i.ч.}, Підл.), (Q_{i.ч.}, Пов.), (Q_3, Підл.), (Q_3, Пов.), (Підл., Пов.)\}. \quad (12)$$

Для теплових ємностей, що входять у граф як вершини, кількість ребер дорівнює:

$$\begin{aligned} \text{deg}(Підл.) &= 3, \\ \text{deg}(Пов.) &= 3. \end{aligned}$$

Матриця інцидентій M_1 для графа G_1 , в якій рядки відповідають вершинам (тепловим ємностям), а стовпці – ребрам (тепловим потокам), має такий вигляд:

	q_n	$q_k^{пов.}$	q_{np}	$q_k^{i.ч.}$	$q_k^{підл.}$	$q_{kпер}$
Підл.	1	1	1	0	0	0
Пов.	0	0	0	1	1	1

Отже, матриця інцидентій є бінарною матрицею, елементи якої дорівнюють 0 або 1. З алгоритмічної точки зору матриця інцидентій є, напевне, найгіршим способом зображення графа. По-перше, цей спосіб вимагає $m \cdot n$ комірок пам'яті (m -стовпці; n -рядки), причому більшість цих комірок взагалі зайняті нулями; по-друге, незручним є доступ до інформації [8].

Відповідно розширена матриця із відображенням джерел теплоти матиме такий вигляд:

	Підл.	Пов.	Q
Підл.	0	$Q_{Підл.-Пов.}$	$Q_n + Q_k^{пов.} + Q_{np}^{i.ч.}$
Пов.	$Q_{Пов.-Підл.}$	0	$Q_k^{i.ч.} + Q_k^{підл.} + Q_{kпер}$

у якій Q_{i-y} – елементи матриці, що відповідає тепловій ємності *i* на ємність *y*. Q – елемент стовпчика джерела тепла, що відповідає тепловій дії цих джерел на ємність *y* рядку якої вони розміщені.

Отже, система рівнянь для теплової ємності підлога (*Підл.*) набуде вигляду:

$$\begin{cases} Q_{п} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{підл.} - t_3) \cdot F_{підл.}, \\ Q_k^{пов.} = \alpha_{нідл.} \cdot (t_{нідл.} - t_{нов.}) \cdot F_{нідл.}, \\ Q_{np}^{i.ч.} = c_{np} \cdot (t_{i.ч.}^4 - t_{підл.}^4) \cdot F_{нідл.} \end{cases} \quad (14)$$

Система балансових рівнянь для теплової ємності повітря (*Пов.*) набуде вигляду:

$$\begin{cases} Q_k^{i.ч.} = \alpha_{i.ч.} \cdot (t_{i.ч.} - t_{нов.}) \cdot F_{i.ч.}, \\ Q_k^{нідл.} = \alpha_{нідл.} \cdot (t_{нов.} - t_{нідл.}) \cdot F_{нідл.}, \\ Q_{kпер} = k \cdot (t_{нов.} - t_3) \cdot F_{нідл.} \end{cases} \quad (15)$$

Припускаємо, що для теплової ємності (*Підл.*) температура повітря є нижчою від температури підлоги. Таким чином, рівняння збереження енергії для підлоги має наступний вигляд:

$$Q_{нідл.} = c_{np} \cdot (t_{i.ч.}^4 - t_{підл.}^4) \cdot F_{нідл.} - \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{підл.} - t_3) \cdot F_{нідл.} - \alpha_{нідл.} \cdot (t_{підл.} - t_{нов.}) \cdot F_{нідл.} \quad (16)$$

У випадку встановлення рівноваги між тепловими ємностями повітря (*Пов.*) та підлога (*Підл.*) існує тепла рівновага:

$$dQ_{нідл.} = dQ_{нов.} \quad (17)$$

Температура підлоги (поверхні) $t_{нідл.}$ приймається як середня за площею опромінення $F_{нідл.}$. Та за величиною більша від температури підлоги.

Рівняння збереження енергії для повітря має вигляд:

$$Q_{нов.} = \alpha_{i.ч.} \cdot (t_{i.ч.} - t_{нов.}) \cdot F_{i.ч.} + \alpha_{нідл.} \cdot (t_{нов.} - t_{нідл.}) \cdot F_{нідл.} - k \cdot (t_{нов.} - t_3) \cdot F_{нідл.} \quad (18)$$

Із наведених рівнянь визначена температура підлоги $t_{нідл.}$ (поверхні) у зоні опромінення $F_{нідл.}$:

$$c_{np} \cdot t_{нідл.}^4 + \frac{\lambda}{\delta} \cdot t_{нідл.} - k \cdot (t_{нов.} - t_3) + c_{np} \cdot t_{i.ч.} + \frac{\lambda}{\delta} \cdot t_3 - \alpha_{i.ч.} \cdot (t_{i.ч.} - t_{нов.}) = \frac{F_{i.ч.}}{F_{нідл.}} \quad (19)$$

Для отримання залежності між основними параметрами, що формують тепловий стан зони опромінення – температурою поверхні променевого нагрівача $t_{i.ч.}$, °С, температурою зовнішнього повітря t_3 , °С, температурою повітря $t_{нов.}$, °С, та площею підлоги $F_{нідл.}$, м² – були використані пакети прикладних програм MATCAD 15.01.

Висновки

На підставі розробленої фізичної моделі температурного режиму підтверджується доцільність застосування систем інфрачервоного опалення.

Із використанням теорії графів розроблена спрощена схема теплових потоків у зоні перебування, виділивши теплові ємності, між елементами яких відбувається теплообмін. Основними тепловими ємностями були прийняті повітря та підлога у робочій зоні.

Література

1. Анго М.А. Инфракрасные излучения. – Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 81 с.
2. Бураковский Т., Гизинский Е., Саля А. Инфракрасные излучатели / Пер. с пол. – Л.: Энергия, 1978. – 408 с.
3. Ицксон В.С., Денисов Ю.Л. Инфракрасные газовые излучатели. – М.: Недра, 1969. – 277 с.
4. Konrad Wakowski "Siesi I instalacje gazowe. – Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2002.
5. Маляренко В. А. Техническая теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений / Маляренко В. А., Редько А. Ф., Чайка Ю. И. – Харьков: Рубикон, 2001. – 280 с.
6. Математическое моделирование / под ред. Эндрюс Дж., Мак-Лоун Р.; [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1979. – 278 с.
7. Математическое моделирование в инженерных расчетах сложных систем : [сб. науч. тр.]. – Днепропетровск: ДДУ, 1997. – 235 с.
8. Лыков А. В. Теплообмен: справочник / Лыков А. В. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.

Стаття надійшла в редколегію 05.04.2017

Шепитчак Владимир Богданович

Ассистент, ORCID: 0000-0001-5883-548X

Национальный университет "Львовская политехника", Львов

Жельх Василий Михайлович

Доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-5063-5077

Национальный университет "Львовская политехника", Львов

Редько Андрей Александрович

Доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-2331-7273

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ ПРИ ИХ ПРИМЕНЕНИИ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Аннотация. Одним из важных вопросов энергетической политики стран ЕС и Украины есть экономное использование энергоносителей. Эффективным способом обеспечения температурного режима в производственном помещении является использование инфракрасных нагревателей. Для обеспечения параметров микроклимата в производственном помещении важно рассматривать комплексно систему отопления и вентиляции. Данные исследования касаются определенного влияния скорости движения воздушных потоков, мощности инфракрасного нагревателя, степени черноты ограждающих конструкций на температурный режим в рабочей зоне производственного помещения. Полученные графические и эмпирические зависимости температуры воздуха в рабочей зоне от интенсивности облучения, степени черноты поверхности облучения при различных скоростях движения воздуха.

Результаты экспериментальных исследований показали, что при увеличении скорости движения воздуха распределение температур в поперечном сечении приобретает равномерный характер.

Ключевые слова: отопление; тепло, энергосберегающие системы; лучевая энергия; площадь облучения; интенсивность облучения; инфракрасные обогреватели; поворотные излучатели; инфракрасная система отопления

Shepitchak Volodymyr

assistant in department of Labor Protection, ORCID: 0000-0001-5883-548X

National University Lviv Polytechnic, Lviv

Vasyl Zhelykh

Doctor of technical science, Professor, ORCID: 0000-0002-5063-5077

National University Lviv Polytechnic, Lviv

Andrii Redko

Doctor of technical science, Professor, ORCID: 0000-0003-2331-7273

Kharkov National University of Construction and Architecture, Kharkiv

THE STUDY OF THE INFRARED HEATING SYSTEM IN THE PREMISES

Abstract. *One of the important question of energy policy of the EU and Ukraine is economical use of energy. An effective way to supply with temperature control in the premises is the use of infrared heaters. For providing with microclimate in industrial premises is important to use the complex heating and ventilation. These studies refer to determination of the influence of the velocity of the air flow, the power infrared heater, the degree of blackness on temperature in the working area of the premises. The graphic and empirical temperature dependences of the radiation intensity in the working area, the degree of blackness of the surface exposure at different velocities of the air flow have been done.*

The results of experimental studies have shown that increasing the velocity of air temperature distribution in the cross section becomes uniform.

Keywords: *heating, heating; energy-saving systems; radiant energy; space radiation; radiation intensity; infrared heaters; rotary heater; infrared heating system*