

УДК 621.365:539.06

Щур І.З.

Львівська державна академія ветеринарної медицини ім. С.З.Гжицького

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНФРАЧЕРВОНОГО ОПРОМІНЮВАЧА З ПЕРЕВИПРОМІНЮВАННЯМ ЕНЕРГІЇ

© Щур І.З., 2000

Побудована математична модель теплофізичних процесів, що існують в інфрачервоному (ІЧ) опромінювачі нетрадиційної конструкції з перевипромінюванням енергії. Дослідження, проведені на моделі, дали можливість вибрати оптимальні параметри опромінювача, зокрема, відносний радіус системи випромінювачів $r^* = 6$, за яких забезпечуються високі енергетичні показники приладу.

A mathematical model of the thermophysical processes which operate in the irradiator of a non-traditional construction with a principle of re-radiation of energy was designed. The research, conducted with the model, made it possible to select the optimal parameters of the irradiator, in particular the relative radius of the system of radiators $r^* = 6$, which secure high energy exponents of the device.

Для нагрівання і сушіння виробів і матеріалів, а також обігрівання живих організмів здебільшого найбільш ефективно використовувати променисту енергію. Електротермічні прилади, які застосовують для терморадіаційної дії – окремі ІЧ-опромінювачі – будують за традиційною схемою: електромагнітне випромінювання генерується випромінювачем, а перерозподіляється в потрібному напрямку відбивачем [1]. Проте застосування відбивача, часто найскладнішої деталі опромінювача, не завжди виправдано через погану збереженість під час експлуатації дзеркальної поверхні. Особливо прискорюється її старіння в умовах агресивного і забрудненого середовища, характерного для багатьох технологічних процесів. Це проявляється в інтенсивному окисленні відбиваючої поверхні і пригоранні до неї зважених у повітрі частин. Внаслідок цього зменшується коефіцієнт відбивання і здійснюється перехід від дзеркального відбивання до дзеркально-дифузного. Такі зміни в оптичній системі опромінювача, крім зменшення ККД випромінювання і зміни характеру світлорозподілу, призводять також до теплового перевантаження випромінювача через погіршення умов тепловіддачі, що також сприяє зменшенню терміну служби опромінювального приладу. Тому доцільно розглянути можливість перерозподілу променистого потоку в просторі без використання відбиваючих пристроїв.

Розглянемо напівобмежену поверхню, на яку падає потік випромінювання густиною E і нагріває її до абсолютної температури T . Припустимо, що тепловіддача цієї поверхні теплопровідністю і конвекцією відсутня, наприклад, поверхня знаходиться у вакуумі. Густина потоку ефективного випромінювання поверхні становитиме

$$E_{\text{эф}} = E + (1 - \alpha)E_{\text{пад}} \quad , \quad (1)$$

де $E = \varepsilon\sigma T^4$ – густина потоку її власного випромінювання; ε і α – відповідно інтегральні коефіцієнти випромінювання і поглинання поверхні при температурі T ; σ – стала Стефана-Больцмана.

Виходячи з балансу енергії, для поверхні, яку розглядаємо, справедливе співвідношення

$$E = \alpha E_{\text{пад}} \quad . \quad (2)$$

Але для сірих тіл в умовах термодинамічної рівноваги, відповідно до закону Кірхгофа, $\varepsilon = \alpha$, а значить із (1) і (2) випливає

$$E_{\text{эф}} = E_{\text{пад}} \quad ; \quad (3)$$

$$T = \left(\frac{E_{\text{пад}}}{\sigma} \right)^{0,25} \quad . \quad (4)$$

Вираз (3) показує, що ця поверхня є ідеальним перевипромінювачем, тому що весь потік, який на неї падає, випромінюється назад у зовнішнє середовище. Проте, на відміну від відбивання, перевипромінювання енергії здійснюється в загальному випадку з іншим спектральним складом, який визначається температурою перевипромінюючої поверхні. Отже, перевипромінювання є нерівноважним процесом перетворення випромінювання за спектром і в просторі.

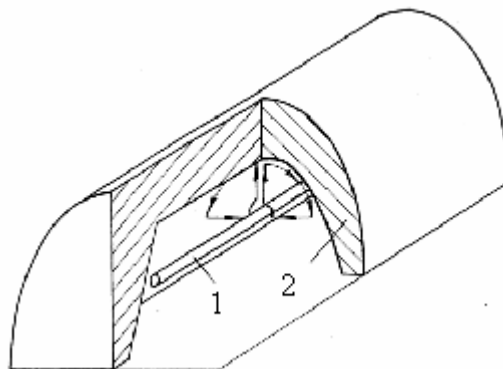


Рис. 1. Лінійний ІЧ-опромінювач з перевипромінюванням енергії.

Рівняння (4) свідчить, що ustalена температура поверхні ідеального перевипромінювання не залежить від ступеня чорноти цієї поверхні, а визначається винятково густиною падаючого потоку випромінювання. Це означає, що зміна оптичних властивостей поверхні під час експлуатації не вплине на стабільність параметрів системи. З вищесказаного випливає, що, створивши на деякій напівобмеженій поверхні умови переважаючого променистого теплообміну, можна використовувати її для ефективного перерозподілу потоку випромінювання в просторі. Створити такі умови в окремому ІЧ-опромінювальному приладі, що є напіввідкритою системою, обладнаною вікном для виходу випромінювання, достатньо просто для випадків направленої вниз випромінювання під час використання гравітаційного поля [2]. Таке положення являє характерне для ІЧ-обігрівання людей і тварин, а також для деяких технологічних процесів.

Конструкція лінійного ІЧ-опромінювача, в якому використовується принцип перевипромінювання, показана на рис. 1 [3]. Первинним випромінювачем у приладі є

трубчастий нагрівальний елемент 1, частина потоку випромінювання якого через вихідне вікно безпосередньо попадає на об'єкт. Інша частина потоку падає на внутрішню поверхню теплоколектора 2, який має форму перевернутого корита, виконаного із вогнестійкого теплоізоляційного матеріалу, наприклад мінеральної вати, базальтового картону, піноскла тощо. Коефіцієнти поглинання ІЧ-випромінювання для теплоізоляційних матеріалів переважно близькі до одиниці, тому потік, що на них падає, майже повністю поглинається. Крім променистої енергії, теплоколектор також збирає тепло, що втрачається первинним випромінювачем вільною конвекцією. За дотримання умови положення первинного випромінювача в порожнині теплоколектора вище від країв вихідного вікна в обмеженому об'ємі порожнини встановлюється замкнута циркуляція повітря, як показано на рис.1 стрілками. Сумарний променистий і конвективний потоки теплової енергії призводять до підвищення температури внутрішньої поверхні теплоколектора, яка відділена від зовнішнього середовища значною товщиною теплоізоляційного матеріалу зверху і гарячим повітрям знизу. При достатньо високих теплоізоляційних властивостях теплоколектора втрати тепла його внутрішньою поверхнею за допомогою теплопровідності стають співрозмірні з конвективним припливом тепла до неї. Тому в стаціонарному режимі температура цієї поверхні піднімається до значення, яке забезпечує перевипромінювання потоку, що падає на неї від первинного випромінювача. Втрати енергії такого ІЧ-опромінювача відбуваються винятково теплопровідністю двома шляхами, які характеризуються високим термічним опором: через теплоколектор вгору і шар стійко термічно стратифікованого повітря вниз. Тому променистий ККД такого приладу повинен бути високим.

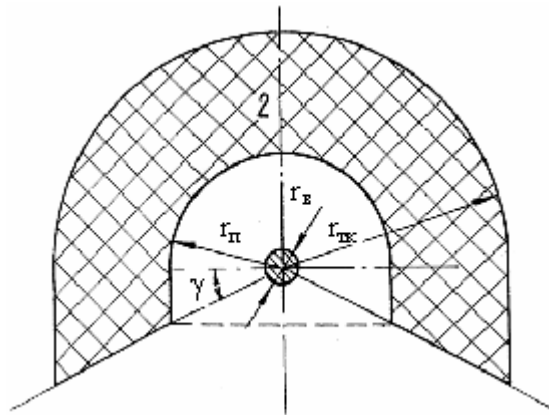


Рис. 2. Розрахункова схема ІЧ-опромінювача з перевипромінюванням.

Для перевірки викладеного, а також вибору раціональних параметрів конструкції ІЧ-опромінювача розглянемо і дослідимо математичну модель процесів стаціонарної теплопередачі в приладі відповідно до показаної на рис. 2 розрахункової схеми. На ній ІЧ-опромінювач представлений системою випромінювачів, що складається із первинного трубчастого ІЧ-випромінювача 1 радіусом r_b і вторинного перевипромінювача – теплоколектора 2. Останній має форму напівциліндра із зовнішнім радіусом $r_{тк}$ і коаксіальною напівциліндричною порожниною радіусом $r_{п}$, по осі якої встановлено первинний випромінювач. Кут хвату первинного випромінювача перевипромінювальною

поверхнею становить $\alpha_{\text{охв}}$. При цьому зріз країв теплоколектора буде визначатися кутом $\gamma = 0,5(\alpha_{\text{охв}} - \pi)$.

З метою спрощення приймемо допущення, що дозволяють перейти до одновимірної задачі теплопередачі: система випромінювачів є нескінченно довгою; всі поверхні, які беруть участь у теплообміні – ізотермічні, а теплові потоки розподілені по них рівномірно; втрати тепла із порожнини теплоколектора вниз через теплопровідність і конвекцію відсутні; коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплоколектора визначається середнім значенням $\bar{\lambda}_{\text{тк}}$ і не залежить від температури; всі поверхні, що беруть участь в променистому теплообміні, – сірі і відповідають закону Ламберта.

Основною частиною математичної моделі теплового об'єкта, який розглядається, є розв'язування спряженої задачі стаціонарного кондуктивного, конвективного і променистого теплообміну. Баланс густини теплових потоків цих складових на головній поверхні їх спряження – внутрішній поверхні теплоколектора $A_{\text{пер}}$, яка є перевипромінювачем, має вигляд

$$q_{\text{тп.п}} + q_{\text{к.п}} + q_{\text{в.п}} = 0, \quad (5)$$

Складові рівняння (5) визначають так.

Густина теплового потоку, що віддається поверхнею $A_{\text{пер}}$ за допомогою теплопровідності через теплоколектор у зовнішнє середовище, приведена до цієї поверхні, дорівнює [4]

$$q_{\text{тп.п}} = k_{\text{тк}}(T_{\text{п}} - T_{\text{о}}), \quad (6)$$

де

$$k_{\text{тк}} = \left(\frac{r_{\text{п}}}{\lambda_{\text{тк}}} \ln \frac{r_{\text{тк}}}{r_{\text{п}}} + \frac{r_{\text{п}}}{k_{\text{зов}} r_{\text{тк}}} \right)^{-1}. \quad (7)$$

У виразах (6) і (7) позначено: $k_{\text{тк}}$ – коефіцієнт теплопередачі від поверхні $A_{\text{пер}}$ у зовнішнє середовище через теплоколектор під час віднесення теплового потоку до одиниці цієї поверхні; $T_{\text{п}}$ і $T_{\text{о}}$ – температури відповідно поверхні $A_{\text{пер}}$ і зовнішнього середовища; $k_{\text{зов}}$ – сумарний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією і випромінюванням від зовнішньої поверхні теплоколектора у зовнішнє середовище.

Густина теплового потоку, приведена до поверхні $A_{\text{пер}}$ і отримана нею внаслідок конвективного теплообміну між співвісно розміщеними первинним і вторинним випромінювачами, дорівнює [5]

$$q_{\text{к.п}} = \bar{k}_{1,2}(T_{\text{п}} - T_{\text{в}}) \frac{2\pi X}{r_{\text{п}}(\pi + 2\text{tg}\gamma)}, \quad (8)$$

де $\bar{k}_{1,2} = \bar{N}u_{1,2}\lambda_{\text{т.в}}/X$ – середнє значення коефіцієнта теплообміну конвекцією між первинним і вторинним випромінювачами; $T_{\text{в}}$ – температура первинного випромінювача; $X = r_{\text{п}} - r_{\text{в}}$ – характерний розмір; $\bar{N}u_{1,2}$ – середнє значення числа Нусельта для системи випромінювачів; $\lambda_{\text{т.в}}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря в порожнині (при температурі $T_{\text{п}}$).

Середнє значення числа Нусельта, яке визначає інтенсивність конвективного теплообміну в системі випромінювачів, визначається виразом [5]

$$\bar{Nu}_{1,2} = 0,317(\text{Gr} \cdot \text{Pr})_{1,2}^{0,25} \left\{ X^3 \left[(2r_B)^{-3/5} + (2r_{\Pi})^{-3/5} \right]^5 \right\}^{-0,25},$$

де $(\text{Gr} \cdot \text{Pr})_{1,2}$ – добуток чисел Грасгофа і Прандтля для системи випромінювачів.

Променистий теплообмін у системі, утвореній поверхнею первинного випромінювача A_B , перевипромінюючою поверхнею теплоколектора $A_{\text{пер}}$ і умовною поверхнею A_o , яка замикає систему з боку вихідного отвору і має температуру T_o та коефіцієнт випромінювання $\varepsilon_o = 1$, визначається системою лінійних рівнянь вигляду [4]

$$E_{\text{эф},i} = E_i + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^3 E_{\text{эф},j} \bar{\varphi}_{i,j}, \quad (9)$$

де $E_{\text{эф},i}$, E_i , ε_i – відповідно густина ефективного і власного випромінювання, а також коефіцієнт випромінювання поверхні A_i ; $\bar{\varphi}_{i,j}$ – середній кутовий коефіцієнт випромінювання поверхні A_i на A_j .

Значення середніх кутових коефіцієнтів випромінювання, які використовуються у рівняннях променистого теплообміну (9), визначаються так:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_{B,\Pi} &= 0,5 + \frac{\gamma}{\pi}; & \bar{\varphi}_{B,o} &= 1 - \bar{\varphi}_{B,\Pi}; & \bar{\varphi}_{\Pi,B} &= \frac{\pi \alpha_1 \bar{\varphi}_{B,\Pi}}{r^*}, \\ \bar{\varphi}_{\Pi,o} &= \alpha_1 \left(1 - \frac{\pi \bar{\varphi}_{B,o}}{r^*} \right); & \bar{\varphi}_{\Pi,\Pi} &= 1 - \bar{\varphi}_{\Pi,B} - \bar{\varphi}_{\Pi,o}, \end{aligned}$$

де $\alpha_1 = \frac{2}{\pi + 2 \text{tg} \gamma}$; $r^* = r_{\Pi} / r_B$ – відносний радіус системи випромінювачів.

Густина результуючого випромінювання на поверхні $A_{\text{пер}}$ буде

$$q_{B,\Pi} = (E_{\text{эф},\Pi} - E_{\text{эф},B}) \bar{\varphi}_{\Pi,B} + (E_{\text{эф},\Pi} - E_{\text{эф},o}) \bar{\varphi}_{\Pi,o}. \quad (10)$$

Розв'язуючи систему (9) і підставляючи результат у рівняння (10), одержуємо

$$q_{B,\Pi} = E_{\Pi} B - (1 - \rho_{\Pi} B) (E_B \bar{\varphi}_{\Pi,B} + E_o C), \quad (11)$$

де ρ_i – коефіцієнт відбивання поверхні A_i ; прийняті позначення відповідно дорівнюють

$$B = \frac{1 - D}{1 - \rho_{\Pi} D}; \quad C = \bar{\varphi}_{\Pi,o} + \rho_B \bar{\varphi}_{B,o} \bar{\varphi}_{\Pi,B}; \quad D = \bar{\varphi}_{\Pi,\Pi} + \rho_B \bar{\varphi}_{B,\Pi} \bar{\varphi}_{\Pi,B}.$$

Підставляючи вирази (6), (8) і (11) густини теплових потоків на поверхні $A_{\text{пер}}$ в рівняння (5), отримуємо

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\Pi} B \sigma T_{\Pi}^4 + \left[k_{\text{ТК}} + \frac{\pi \bar{k}_{1,2}}{\alpha_1} \left(1 - \frac{1}{r^*} \right) \right] T_{\Pi} - (1 - \rho_{\Pi} B) (E_B \bar{\varphi}_{\Pi,B} + E_o C) - \\ - k_{\text{ТК}} T_o - \frac{\pi \bar{k}_{1,2}}{\alpha_1} \left(1 - \frac{1}{r^*} \right) T_B = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Із нелінійного рівняння (12) можна визначити температуру перевипромінювальної поверхні теплоколектора як функцію енергетичних, оптичних і геометричних параметрів

конструкції ІЧ-опромінювача. Використовуючи отримані значення T_{Π} , можна вирахувати значення основних параметрів приладу, які становлять практичний інтерес

- питомих лінійних навантажень первинного випромінювача

$$p = 2\pi r_B (q_{K.B} + q_{B.B}), \quad (13)$$

де $q_{K.B}$, $q_{B.B}$ – густина теплових потоків, що віддаються первинним випромінювачем відповідно конвекцією і випромінюванням та дорівнюють

$$q_{K.B} = \bar{k}_{1,2} (T_B - T_{\Pi}) \frac{X}{r_B} = \bar{k}_{1,2} (T_B - T_{\Pi}) (r^* - 1);$$

$$q_{B.B} = (E_{\text{эф.в}} - E_{\text{эф.п}}) \bar{\Phi}_{B,\Pi} + (E_{\text{эф.в}} - E_{\text{эф.о}}) \bar{\Phi}_{B,о} = E_B - \varepsilon_B (E_{\text{эф.п}} \bar{\Phi}_{B,\Pi} + E_o \bar{\Phi}_{B,о});$$

$$E_{\text{эф.п}} = \frac{E_{\Pi} + \rho_{\Pi} (E_B \bar{\Phi}_{\Pi,B} + E_o C)}{1 - \rho_{\Pi} D};$$

- променистий ККД ІЧ-опромінювача

$$\eta_B = 1 - \frac{q_{\text{тп.п}} r_{\Pi} (\pi + 2 \operatorname{tg} \gamma)}{p} = 1 - \frac{2q_{\text{тп.п}} r_{\Pi}}{p \alpha_1}; \quad (14)$$

- температуру зовнішньої поверхні теплоколектора

$$T_{\text{ТК}} = T_{\Pi} - q_{\text{тп.п}} \frac{r_{\Pi}}{\lambda_{\text{ТК}}} \ln \frac{r_{\text{ТК}}}{r_{\Pi}}. \quad (15)$$

За допомогою математичної моделі, представленої рівняннями (12)-(15), чисельно досліджувався на комп'ютері вплив геометричних і оптичних параметрів конструкції на основні характеристики ІЧ-опромінювача потужністю 200...800 Вт. У дослідному опромінювальному приладі як первинний випромінювач використаний ТЕН з оболонкою із хромонікелевого сплаву з такими параметрами: $r_B = 3 \dots 5$ мм; $T_B = 973 \dots 1173$ К; $\varepsilon_B = 0,90$. Параметри теплоколектора, виготовленого з базальтового картону, такі: $r_{\text{ТК}} = 80$ мм, $\gamma = 25^\circ$ – вибрані з умов доцільності габаритних розмірів; $r_{\Pi} = 10 \dots 70$ мм, $\varepsilon_{\Pi} = 0,1, 0,5, 0,9$ – змінювались у моделі з метою вивчення впливу геометричних і оптичних параметрів перевипромінюючої поверхні; $k_{\text{зов}} = 12,2$ Вт/(м²·К), $\bar{\lambda}_{\text{ТК}} = 0,085$ Вт/(м·К) – вважались незмінними (відповідають середнім температурам). Середнє значення коефіцієнта теплопередачі $\bar{k}_{1,2}$ визначалось із загальної математичної моделі процесу (12) методом послідовних наближень. Як засвідчив обчислювальний експеримент, чотирьохпрограмно передбачених ітерацій достатньо для одержання точного розв'язку рівняння (12).

Проведені факторні машинні експерименти показали, що вплив параметрів первинного випромінювача r_B і T_B є несуттєвим, у той час як параметри перевипромінювача r_{Π} і ε_{Π} мають важливе значення: r_{Π} – визначальний параметр конструкції, ε_{Π} – цікавий з точки зору зміни характеристик опромінювача під час експлуатації при старінні чи забрудненні перевипромінюючої поверхні.

Результати розрахунків для середніх значень r_B і T_B зображені на рис. 3,а,б. Вони підтверджують теоретичні припущення про переважаючий променистий характер теплообміну на перевипромінювальній поверхні і, що впливає з цього, практичну незалежність всіх параметрів ІЧ-опромінювача від коефіцієнта її випромінювання. Кількісне співвідношення різних складових теплообміну поверхні $A_{\text{пер}}$ у вигляді ступеня

неідеальності перевипромінювання, представленого коефіцієнтом k_H , показано на рис. 3, б кривою, що обчислена згідно з виразом

$$k_H = \frac{Q_{\text{тп.п}} + Q_{\text{к.п}}}{E_{\text{пад.п}}} \cdot 100\%,$$

де $E_{\text{пад.п}} = E_{\text{эф.в}} \bar{\Phi}_{\text{п.в}} + E_{\text{эф.о}} \bar{\Phi}_{\text{п.о}} = (E_{\text{в}} + \rho_{\text{в}} \bar{\Phi}_{\text{в.п}} E_{\text{эф.п}}) \bar{\Phi}_{\text{п.в}} + E_{\text{о}} C$ – густина випромінювання, що падає на поверхню $A_{\text{пер}}$.

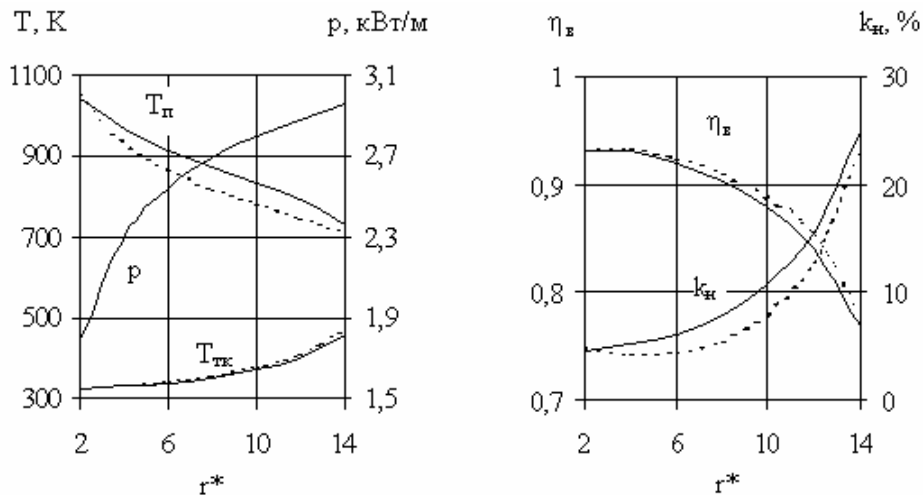


Рис. 3. Розрахункові залежності основних параметрів ІЧ-опромінювача з перевипромінюванням енергії від відносного радіуса системи випромінювачів r^* при крайніх значеннях коефіцієнта випромінювання перевипромінювальної поверхні:

----- - $\varepsilon_{\pi} = 0,9$; - $\varepsilon_{\pi} = 0,1$.

Мінімальне значення k_H , яке не перевищує 5%, відповідає діапазону $r^* = 3 \dots 6$. Додаткові дослідження показали, що при інших вихідних параметрах моделі, які знаходяться в практично доцільних межах, діапазон відносного радіуса системи випромінювачів, що відповідає найбільшому наближенню до ідеального перевипромінювання, вміщує інтервал $r^* = 5 \dots 6$. Цьому інтервалові відповідають також достатньо високі значення параметрів $\eta_{\text{в}}$ і p , які перебувають у протиріччі і характеризують відповідно енергетичні і вартісні показники конструкції. Крім цього, як показали фотометричні дослідження конструкції опромінювача [6], $r^* \geq 6$ є також фотометричною вимогою. Все це дає змогу рекомендувати для практичного використання відносний радіус системи випромінювачів, який дорівнює 6.

У зв'язку з тим, що у вказаному діапазоні r^* $k_H < 5\%$, рівняння балансу густини теплових потоків на поверхні перевипромінювання практично зводиться до рівності $q_{\text{в.п}} = 0$. Розв'язуючи це рівняння і враховуючи, що $E_{\text{в}} \bar{\Phi}_{\text{п.в}} \gg E_{\text{о}} C$, отримуємо

$$T_{\text{п}} = \left(\frac{\varepsilon_{\text{в}}}{1 - D} \bar{\Phi}_{\text{п.в}} \right)^{0.25} T_{\text{в}}. \quad (16)$$

Рівняння (16) з достатньою точністю замінює основне рівняння (12) математичної моделі при рекомендованому значенні r^* , що суттєво спрощує розрахунки.

На рис. 4 показані результати розрахунку значень променистого ККД ІЧ-опромінювача з перевипромінюванням енергії (крива 1) та самого первинного випромінювача (крива 2), який перебуває у відкритому навколишньому середовищі, що є

близьким до умов роботи ІЧ-опромінювачів традиційної конструкції (з відбивачами). Розрахунки засвідчили, що, завдяки тепловій взаємодії первинного випромінювача з теплоколектором, промениста віддача системи випромінювачів вища, ніж самого первинного випромінювача, що перебуває у звичайних теплових умовах. Отже, така конструкція посилює випромінювальні властивості первинного джерела, що не характерно для ІЧ-опромінювальних приладів, побудованих за традиційною схемою. Розрахунки також показали, що відносний приріст променистого ККД $\delta\eta_{\text{в}}$ ІЧ-опромінювача з перевипромінюванням зростає під час зниження потужності споживання. Це забезпечує високу віддачу випромінюванням під час часового керування потужністю зміною напруги живлення, що часто використовується, а також дозволяє зменшити робочу температуру первинного джерела нижче від номінального значення, що значно продовжить термін його служби.

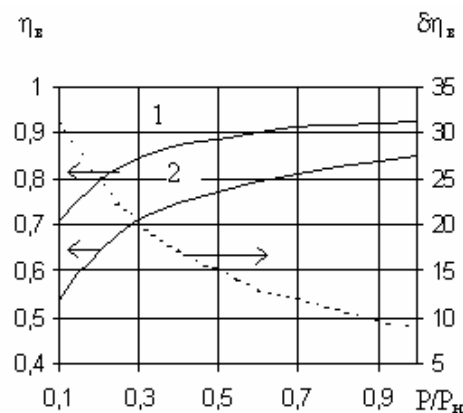


Рис. 4. Залежності променистого ККД ІЧ-опромінювача з перевипромінюванням 1 та самого первинного випромінювача 2 від відносної робочої потужності.

Виходячи з отриманих параметрів, розроблено цілу низку експериментальних зразків ІЧ-опромінювачів з перевипромінюванням енергії, в яких відпрацьовувалися конструкційні особливості та матеріали для теплоколектора. Фотометричні дослідження сумарного потоку випромінювання підтвердили отримані теоретичні результати щодо високих енергетичних показників приладу. Зокрема віддача випромінюванням в досліджених зразків знаходилася в межах 0,86...0,92. Тривала виробнича експлуатація дослідної партії опромінювачів в агресивних умовах тваринницьких приміщень з метою локального обігрівання молодняка сільськогосподарських тварин підтвердила експлуатаційні переваги запропонованої конструкції ІЧ-опромінювача.

Висновки:

1. Використавши принцип перевипромінювання для перерозподілу в просторі променистого потоку окремого ІЧ-випромінювача, можна створити ефективний опромінювальний прилад, який відрізняється простотою конструкції, її довговічністю, низькими технологічними вимогами до точності виготовлення і стабільністю характеристик упродовж терміна експлуатації в будь-яких умовах.

2. ІЧ-опромінювальним приладам з перевипромінюванням притаманні високі енергетичні показники. Це забезпечується завдяки специфічним умовам теплообміну в системі випромінювачів, ККД якої є більш високим, ніж одного первинного джерела, яке знаходиться в звичайних умовах.

3. Розроблений метод розрахунку енергетичних, фотометричних і геометричних параметрів ІЧ-опромінювача з перевипромінюванням енергії дає змогу проектувати високоефективні конструкції, виходячи з конкретних технічних завдань. Адекватність побудованих математичних моделей підтверджується доброю узгодженістю теоретичних результатів з експериментальними.

1. Бураковский Т., Гизинский Е., Саля А. Инфракрасные излучатели / Пер. с польск. Л., 1978. 2. А.с. 1455394 А1 СССР. Инфракрасный обогреватель / С.В. Стояновский, М.В. Демчук, В.Н. Карпов, И.З. Щур и др. Заяв.08.09.86, Оpubл.30.01.89, Бюл.№ 4. 3. Карпов В.Н., Саакян А.З., Щур И.З. Безотражательный инфракрасный облучатель для животных // Техника в сельском хозяйстве. 1990, №1, С.51-52. 4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М., 1981. 5. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Справочник. М., 1979. 6. Щур И.З. Математическое моделирование и оптимизация фотометрических характеристик ИК облучателя с переизлучением энергии // Энергосбережение в оптических электротехнологиях АПК: Сб. науч. тр. С.-Пб. гос. аграр. ун-та., 1994, С.64-77.