

УДК 621.365.4:539.06

І.З. Щур

Львівська державна академія ветеринарної медицини ім. С.З.Гжицького,  
кафедра менеджменту та інформатики

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛООВОГО ЕКРАНА В ІНФРАЧЕРВОНОМУ ОПРОМІНЮВАЧІ З ПЕРЕВИПРОМІНЮВАННЯМ ЕНЕРГІЇ

© Щур І.З., 2001

**З метою підвищення ефективності просторового розподілу сили випромінювання інфрачервоного опромінювача з перевипромінюванням енергії в конструкції використано тепловий екран. Побудована математична модель фотометричних процесів, що спостерігаються в даному приладі. В результаті комп'ютерного дослідження моделі визначено оптимальні геометричні параметри оптичної системи опромінювача з тепловим екраном.**

**With the aim of raising the level of efficiency of the space distribution of radiation force of an infra-red irradiation device with re-radiation of energy, the heat screen was used in the construction. The mathematical model of photometry process that take place in this device was elaborated. As a result of a computer research of the model, the optimal geometric parameters of the optical system of the irradiator with the heat screen were obtained.**

З метою підвищення віддачі випромінюванням, а також забезпечення довговічності та стабільності параметрів під час експлуатації нами запропонована принципово відмінна від аналогів конструкція інфрачервоного (ІЧ) опромінювача, в якому традиційний процес дзеркального відбивання замінено процесом перевипромінювання енергії [1]. Математичним моделюванням теплофізичних процесів, які проходять в опромінювачі такого типу, знайдено оптимальні конструктивні його параметри [2]. Просторовий розподіл сили випромінювання нового ІЧ-опромінювача має свої особливості. З метою визначення оптимальної геометрії оптичної системи побудована також математична модель фотометричних процесів, що мають місце в даному опромінювачі [3]. Проведені дослідження дали змогу визначити оптимальний профіль перевипромінюючої поверхні, при якому забезпечується максимальне значення розробленого в [4] критерію – коефіцієнта ефективності розподілу сили випромінювання  $k_{\text{эф.р}}$ . Однак ці дослідження показали також обмежені можливості фотометричного вдосконалення конструкції тільки вибором профілю перевипромінювача. Це зумовлено тим, що через дифузний характер перевипромінювання система випромінювачів не є спроможною підсилувати інтенсивність випромінювання в бокових напрямках порівняно з напрямком вздовж фотометричної осі.

Для підвищення ефективності світлорозподілу в поперечній площині ІЧ-опромінювача з перевипромінюванням енергії ми запропонували використовувати в конструкції тепловий екран з вогнестійкого матеріалу, який поглинає ІЧ-випромінювання, за формою відповідає первинному ІЧ-випромінювачу і є встановлений між ним і вихідним вікном пристрою [5]. Практично тепловий екран є смугою з окисленої сталі, яка, будучи встановлена в області оптичної системи опромінювача під ІЧ-випромінювачем (рис. 1), екранує випромінювання останнього в напрямку фотометричної осі приладу. В результаті сила випромінювання в цьому напрямку зменшується, забезпечуючи тим самим порівняне підсилення інтенсивності

випромінювання в бокових напрямках. Умова виконання теплового екрана з матеріалу, що поглинає ІЧ-випромінювання, дозволяє виключити можливість старіння екрана під час експлуатації і зміни через це фотометричних характеристик опромінювача.

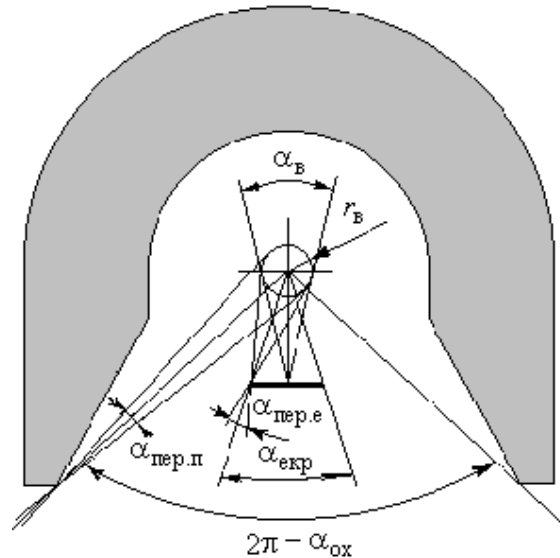


Рис. 1. Основні геометричні параметри оптичної системи з тепловим екраном

Для визначення раціональних геометричних параметрів оптичної системи ІЧ-опромінювача з тепловим екраном побудуємо і дослідимо математичну модель індикатриси сили його випромінювання, для чого скористаємося результатами проведених теоретичних і експериментальних фотометричних досліджень [3]. Їх аналіз показує, що розподіл сили випромінювання перевипромінювача в поперечній площині близький до косинусного закону (відхилення від останнього зумовлене неізотермічністю перевипромінюючої поверхні і екрануючою дією первинного ІЧ-випромінювача), тобто

$$I_{\Pi} = I_{0\Pi} \cos^n \vartheta, \quad (1)$$

де  $I_{0\Pi}$  – осьова сила випромінювання перевипромінювача;  $\vartheta$  – кут відхилення променя від фотометричної осі в головній меридіональній площині;  $n$  – показник ступеня відхилення від косинусного закону, який є функцією кута охоплення первинного випромінювача перевипромінювачем (за результатами фотометричних досліджень при  $\alpha_{ox} = 240, 260, 280, 300^\circ$  відповідно  $n = 1,37; 1,45; 1,53; 1,61$ ).

Надалі будемо припускати, що закон світлорозподілу (1) відповідає спільному випромінюванню перевипромінювача і теплового екрана. З метою оптимізації світлорозподілу в поперечній до осі лінійного приладу площині розглянемо одновимірну задачу, тобто вважатимемо ІЧ-опромінювач нескінченно довгим. Потік, що перевипромінюється, у цьому випадку буде пропорційним величині

$$\Phi_{\Pi} = 2 \int_0^{\pi/2} I_{0\Pi} \cos^n \vartheta d\vartheta. \quad (2)$$

З іншого боку, цей потік за умови ідеальності перевипромінювання, що є близьким до реальності [2], можна записати так:

$$\Phi_{\Pi} = (\alpha_{ox} + \alpha_{екр}) I_{0В}, \quad (3)$$

де  $\alpha_{\text{екр}}$  – плоский кут екранування первинного ПЧ-випромінювача, показаний на рис. 1;  
 $I_{0\text{в}}$  – осьова сила випромінювання первинного випромінювача.

Прирівнюючи (2) та (3), отримуємо

$$\frac{I_{0\text{в}}}{I_{0\text{п}}} = \frac{0}{\alpha_{\text{ох}} + \alpha_{\text{екр}}} = I_{\text{в}}^* ,$$

тобто відносний приріст сили випромінювання опромінювача в бокових напрямках порівняно з осьовою силою випромінювання, яка дорівнює  $I_{0\text{п}}$  у випадку повного екранування первинного випромінювача в напрямку фотометричної осі.

Таким чином, у першому наближенні індикатриса сили випромінювання ПЧ-опромінювача з тепловим екраном буде визначатися функцією  $\cos^n \vartheta$  з приростом величиною  $I_{\text{в}}^*$  за рахунок випромінювання первинного випромінювача в межах його бачення, тобто коли  $\alpha_{\text{екр}}/2 < \vartheta < (2\pi - \alpha_{\text{ох}})/2$ . Для більш точного математичного опису індикатриса сили випромінювання необхідно враховувати кути переходу на краю екрана  $\alpha_{\text{пер.е}}$  і перевипромінювача  $\alpha_{\text{пер.п}}$  (рис. 1), в межах яких первинний випромінювач є видимий частково. Їх значення можна знайти так:

$$\alpha_{\text{пер.е}} = 2 \arcsin \left( \sin \frac{\alpha_{\text{в}}}{2} \cos \frac{\alpha_{\text{екр}}}{2} \right); \quad \alpha_{\text{пер.п}} = 2 \arctg \frac{r_{\text{в}}}{l_{\text{к}}},$$

де  $\alpha_{\text{в}}$  – кут випромінювача, тобто кут, під яким первинний випромінювач видимий з центра екрана (рис. 1);  $r_{\text{в}}$  – радіус первинного випромінювача;  $l_{\text{к}}$  – відстань від краю вихідного отвору до центра випромінювача.

Аналіз величин кутів переходу показує, що в діапазоні допустимих параметрів оптичної системи можна практично вважати, що  $\alpha_{\text{пер.е}} = \alpha_{\text{в}}$  та  $\alpha_{\text{пер.п}} = 5...7^\circ$ . Із врахуванням кутів переходу математична модель індикатриса сили випромінювання ПЧ-опромінювача з первипроміненням енергії та тепловим екраном подана в табл. 1. Залежно від вказаних у таблиці умов індикатриса  $f_{\Sigma}(\vartheta)$  має принципові відмінності. Так, у випадку більших значень кутів охоплення та екранування, що задовольняють умову  $\alpha_{\text{екр}} + \alpha_{\text{пер.е}} > 2\pi - \alpha_{\text{пер.п}} - \alpha_{\text{ох}}$ , ні при яких значеннях екваторіального кута  $\vartheta$  первинний ПЧ-випромінювач не видимий повністю. Максимальне значення відносної сили випромінювання в цьому випадку буде відповідати куту  $\vartheta = (2\pi - \alpha_{\text{пер.п}} - \alpha_{\text{ох}})/2$  і дорівнювати  $I_{\text{інт}}^*$ , яке можна визначити шляхом інтерполяції значень функції  $f_{\Sigma}(\vartheta)$ , обчислених для випадку невиконання вказаної умови. Наведена в табл. 1 математична модель відповідає випадку, коли тепловий екран повністю екранує первинний випромінювач у напрямку фотометричної осі, тобто виконується умова  $\alpha_{\text{екр}} \geq \alpha_{\text{пер.е}}$ . У випадку, коли  $\alpha_{\text{екр}} < \alpha_{\text{пер.е}}$ , екранування первинного випромінювача в напрямку фотометричної осі відбувається тільки частково, тому осьова сила випромінювання ПЧ-опромінювача буде більшою від  $I_{0\text{п}}$  в  $R$  разів. Звідси всі значення індикатриса  $f_{\Sigma}(\vartheta)$ , визначені при повному екрануванні випромінювача і наведені в табл. 1, необхідно розділити на  $R$ , яке знаходять інтерполяцією значень  $f_{\Sigma}(\vartheta)$  при  $\vartheta=0$ .

**Математична модель індикатриси сили випромінювання ІЧ-опромінювача з перевипромінюванням енергії і тепловим екраном**

$\vartheta$	Значення $f_{\Sigma}(\vartheta)$ за умов	
	$\alpha_{\text{екр}} + \alpha_{\text{пер.е}} \leq 2\pi - \alpha_{\text{пер.п}} - \alpha_{\text{ох}}$	$\alpha_{\text{екр}} + \alpha_{\text{пер.е}} > 2\pi - \alpha_{\text{пер.п}} - \alpha_{\text{ох}}$
$\vartheta = 0$	1,0	1,0
$0 < \vartheta \leq (\alpha_{\text{екр}} - \alpha_{\text{пер.е}})/2$	$\cos^n \vartheta$	$\cos^n \vartheta$
$\vartheta = \alpha_{\text{екр}}/2$	$\cos^n \vartheta + I_{\text{в}}^*/2$	$\cos^n \vartheta + I_{\text{в}}^*/2$
$(\alpha_{\text{екр}} + \alpha_{\text{пер.е}})/2 \leq \vartheta < (2\pi - \alpha_{\text{пер.п}} - \alpha_{\text{ох}})/2$	$\cos^n \vartheta + I_{\text{в}}^*$	--
$\vartheta = (2\pi - \alpha_{\text{пер.п}} - \alpha_{\text{ох}})/2$	$\cos^n \vartheta + I_{\text{в}}^*$	$I_{\text{інт}}^*$
$\vartheta = (2\pi - \alpha_{\text{ох}})/2$	$\cos^n \vartheta + I_{\text{в}}^*/2$	$(\cos^n \vartheta + I_{\text{інт}}^*)/2$
$(2\pi + \alpha_{\text{пер.п}} - \alpha_{\text{ох}})/2 \leq \vartheta \leq \pi/2$	$\cos^n \vartheta$	$\cos^n \vartheta$

Відповідно до поданої математичної моделі індикатриси сили випромінювання розроблений алгоритм розрахунків та складена програма для комп'ютера. Спільно із програмою для визначення ефективності світлорозподілу вона дала змогу побудувати індикатриси сили випромінювання в поперечній площині опромінювача та розрахувати для них значення  $k_{\text{еф.р}}$  для лінійного ІЧ-опромінювача зі значеннями основних параметрів оптичної системи, що змінювалися в широких межах:  $\alpha_{\text{ох}}$ ,  $\alpha_{\text{екр}}$ ,  $\alpha_{\text{в}}$ . Результати розрахунків подані в табл. 2.

Таблиця 2

**Результати розрахунків коефіцієнтів ефективності розподілу сили випромінювання лінійного ІЧ-опромінювача з перевипромінюванням енергії і тепловим екраном при різних параметрах оптичної системи**

$\alpha_{\text{екр}}$	$\alpha_{\text{ох}}=240^\circ$			$\alpha_{\text{ох}}=260^\circ$			$\alpha_{\text{ох}}=280^\circ$			$\alpha_{\text{ох}}=300^\circ$		
	$\alpha_{\text{в}}=10^\circ$	$\alpha_{\text{в}}=20^\circ$	$\alpha_{\text{в}}=30^\circ$	$\alpha_{\text{в}}=10^\circ$	$\alpha_{\text{в}}=20^\circ$	$\alpha_{\text{в}}=30^\circ$	$\alpha_{\text{в}}=10^\circ$	$\alpha_{\text{в}}=20^\circ$	$\alpha_{\text{в}}=30^\circ$	$\alpha_{\text{в}}=10^\circ$	$\alpha_{\text{в}}=20^\circ$	$\alpha_{\text{в}}=30^\circ$
$10^\circ$	0,506	0,553	-	0,525	0,571	-	0,534	0,579	-	0,540	0,574	-
$20^\circ$	0,528	0,550	0,485	0,548	0,575	0,592	0,558	0,584	0,594	0,555	0,579	0,584
$30^\circ$	0,550	0,582	0,577	0,572	0,602	0,590	0,585	0,606	0,593	0,581	0,596	0,591
$40^\circ$	0,553	0,569	0,546	0,563	0,579	0,586	0,563	0,579	0,586	0,549	0,569	0,574
$50^\circ$	0,511	0,538	0,549	0,522	0,550	0,560	0,524	0,552	0,570	0,511	0,539	0,550

Аналіз результатів показує, що зміною параметрів оптичної системи лінійного ІЧ-опромінювача з перевипромінюванням енергії та тепловим екраном можна змінити  $k_{\text{еф.р}}$  в межах 0,47...0,61, причому при деяких комбінаціях параметрів  $k_{\text{еф.р}}$  має помітно виражений максимум. Це видно з тривимірного зображення функції  $k_{\text{еф.р}}(\alpha_{\text{ох}}, \alpha_{\text{екр}})$  при

$\alpha_B=20^\circ$ , показано на рис. 2. Оптимальними значеннями параметрів оптичної системи, які забезпечують максимальне значення  $k_{\text{еф.р}}=0,61$ , слід вважати такі:

$$\alpha_{\text{ох}} = 275^\circ, \alpha_{\text{екр}} = 30^\circ, \alpha_B = 25^\circ.$$

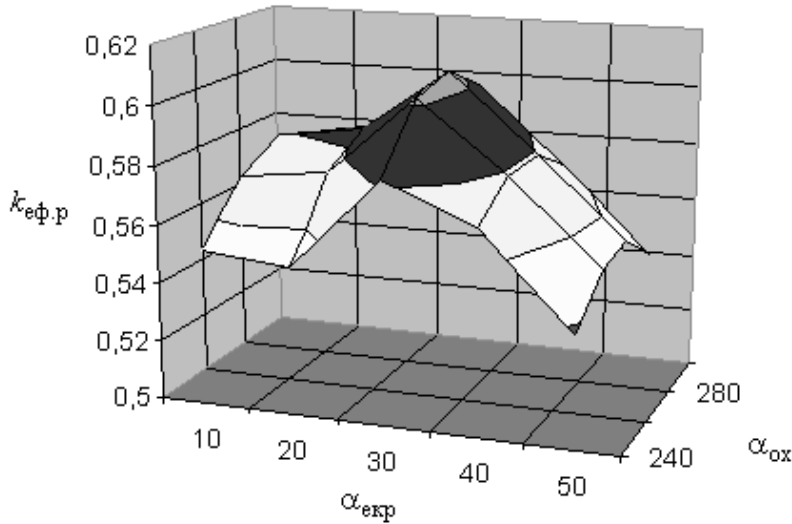


Рис. 2. Залежність ефективності розподілу сили випромінювання лінійного ПЧ-опромінювача з перевипромінюванням енергії від значень кутів охоплення та екранування при  $\alpha_B=20^\circ$

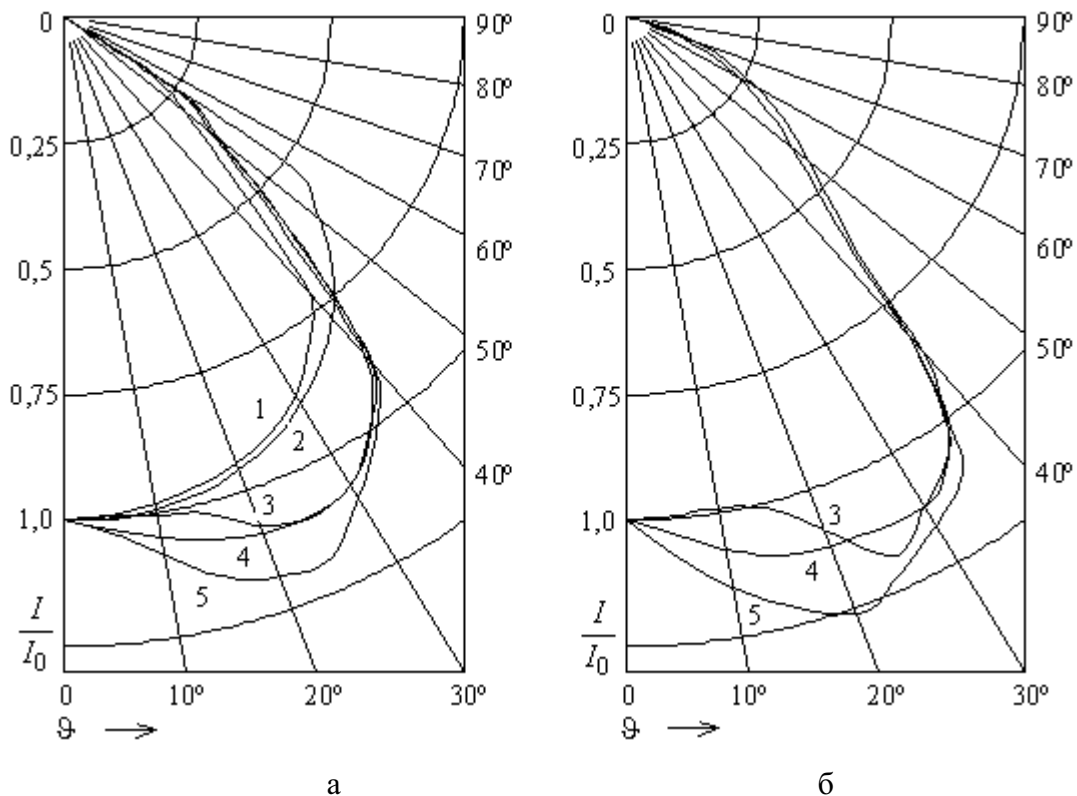


Рис. 3. Індикатриси сили випромінювання, отримані експериментально (а) та математичним моделюванням (б):

- без теплового екрана (1 – у поперечній площині; 2 – у поздовжній площині);
- з тепловими екранами (в поперечній площині,  $\alpha_{\text{ох}} = 280^\circ$ ):

3 –  $\alpha_{\text{екр}} = 30^\circ, \alpha_B = 20^\circ$ ; 4 –  $\alpha_{\text{екр}} = 30^\circ, \alpha_B = 30^\circ$ ; 5 –  $\alpha_{\text{екр}} = 20^\circ, \alpha_B = 20^\circ$

Результати математичного моделювання перевірялися на макеті ІЧ-опромінювача, виготовленому в натуральну величину. Експериментальні дослідження його проводилися за допомогою пристрою, який дозволяє фіксувати давач теплового потоку в точках сферичної поверхні заданого радіуса навколо опромінювача. В дослідженнях використовувалися два давачі інтегрального теплового потоку. Перший являв собою термобатарей типу РК-15 з 10 хромель–копелевих термопар, яка підмикалася через опір до гальванометра зі струмом повного відхилення 10 мкА. Отриманий таким чином прилад проградуїровано на абсолютно чорних тілах [6]. Другим давачем був радіометр РОП-І-с (№ 103), розроблений в Інституті технічної теплофізики НАНУ. Як вторинний прилад використовувався цифровий мілівольтметр. Розбіжності між показами давачів в межах вимірюваних величин не перевищували 1 %, причому перший з давачів відрізнявся значно меншою тепловою інерцією.

Отримані в результаті експериментальних досліджень індикатриси сили випромінювання, що відповідають різним параметрам оптичної системи макетного зразка ІЧ-опромінювача, показані на рис. 3, а. Порівняння їх з побудованими за даними математичної моделі (рис. 3, б) показує задовільну схожість. Вплив теплового екрана на світлорозподіл ІЧ-опромінювача добре видно при порівнянні індикатриси 1, отриманої для оптимальної оптичної системи за відсутності екрана, та індикатриси 4, яка відповідає близьким до оптимальних значень параметрам оптичної системи з тепловим екраном. Визначені за допомогою розробленої комп'ютерної програми ефективності світлорозподілу лінійного ІЧ-опромінювача, який характеризується в поперечній площині цими індикатрисами, дало такі результати:  $k_{\text{эф.р1}}=0,5976$ ;  $k_{\text{эф.р4}}=0,6247$ . Таке збільшення  $k_{\text{эф.р}}$ , як показують системні дослідження [7], забезпечує підвищення ефективності використання електроенергії при ІЧ-обігріві поросят на 12...15 %.

1. Карпов В.Н., Саакян А.З., Щур И.З. *Безотражательный инфракрасный облучатель для животных* // *Техника в сельском хозяйстве*. 1990. №1. С. 51–52. 2. Щур И.З. *Математичне моделювання та вибір оптимальних параметрів інфрачервоного опромінювача з перевипромінюванням енергії* // *Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні*. 2000. № 394. С. 35–43. 3. Щур И.З. *Математическое моделирование и оптимизация фотометрических характеристик ИК облучателя с переизлучением энергии* // *Энергосбережение в оптических электротехнологиях АПК: Сб. науч. тр. С.-Петербург. гос. аграр. ун-та*. 1994. С. 64–77. 4. Щур И.З. *Исследование влияния характера светораспределения ИК облучателя на эффективность обогрева порослят* // *Актуальные проблемы развития АПК (социальный, организационно-экономический, биологический и технический аспекты): Тез. докл. науч.-практ. конф. мол. ученых и спец. Белорусской СХА*. 1990. С.180–181. 5. А.с. 1455394 А1 СССР. *Инфракрасный обогреватель* / С.В.Стояновский, М.В.Демчук, В.Н.Карпов, И.З.Щур и др. Заявл. 08.09.86, Опубл. 30.01.89. Бюл. Изобрет. № 4. 6. *Повышение точности определения температуры ощущения* / М.В.Демчук, Н.П.Карпинский, И.З.Щур, С.Г.Филипович // *Состояние и перспективы развития средств измерения температуры: Тез. докл. 5-й Всесоюз. науч.-техн. конф. Львов, 1984. Т. 2. С.84–85*. 7. Щур И.З. *Оптимізація на ЕОМ параметрів та режимів інфрачервоного обігріву порослят з допомогою математичної моделі технологічного процесу: Навч. посібник для студентів, аспірантів та спеціалістів-тваринників*. Львів, 1997.