

Сравнительный анализ методов расчета лучистого обогрева молодняка в животноводческих помещениях

Алексей Васильевич Кузьмичев,
научный сотрудник, e-mail: alkumkuzm@mail.ru;
Дмитрий Анатольевич Тихомиров,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник, e-mail: tihda@mail.ru;

Алексей Викторович Хименко,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: avmkh87@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали, что эффективность инженерных систем на животноводческих предприятиях определяется возможностью создания требуемых условий при содержании молодняка во взаимодействии с внешними температурными параметрами. (*Цель исследования*) Провести оценку и выбрать рациональный метод расчета лучистого теплообмена в системе поверхностей с произвольной конфигурацией, отображающих состояние биологического объекта в условиях животноводческого помещения и распределение тепловых потоков в зонах расположения молодняка. (*Материалы и методы*) Рассмотрели условия комфортного теплового режима для молодняка животных и физическую модель теплопередачи. Определили области изменения температуры облучающей панели и влияние конфигурации и оптических характеристик оболочки системы при создании комфортных условий содержания поросят, применяя различные методы расчета теплообмена. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что расчетную модель теплообмена в системе изотермических диффузно поглощающих и излучающих поверхностей можно рассматривать в качестве расширения существующих расчетных методов. Отметили, что она учитывает дополнительные факторы, в том числе влияние «скрытых» поверхностей через многократное отражение в замкнутой термодинамической системе. Выявили соответствие результатов расчетов теплообмена различными методами, если оптические показатели оболочки такой системы близки к характеристикам абсолютно черного тела. (*Выводы*) Установили, что оптические характеристики оболочки системы значительно влияют на температурный режим поверхности облучающей панели, а предложенная расчетная модель определения температурного режима обогреваемой панели в системе изотермических диффузно поглощающих и излучающих поверхностей может быть применена в сельскохозяйственных помещениях, различных по своей конфигурации и геометрии.

Ключевые слова: животноводческие помещения, обогрев молодняка, содержание поросят, облучающая панель, расчетная модель, методы расчета лучистого теплообмена.

Для цитирования: Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Хименко А.В. Сравнительный анализ методов расчета лучистого обогрева молодняка в животноводческих помещениях // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 10-18. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-10-18.

Comparative Analysis of Methods for Calculating Radiant Heating of Young Animals in Livestock Premises

Alexey V. Kuz'michev,
researcher, e-mail: alkumkuzm@mail.ru;
Dmitry A. Tikhomirov,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher, e-mail: tihda@mail.ru

Alexey V. Khimenko,
Ph.D.(Eng), senior researcher,
e-mail: avmkh87@gmail.com

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The effectiveness of engineering systems at livestock enterprises is shown to be determined by the possibility of creating the required conditions where young animals are kept in interaction with external temperature parameters of their habitat. (*Research purpose*) The research aims to evaluate and choose a rational method for calculating radiant heat transfer in a system of surfaces with an arbitrary configuration that reflect the state of a biological object in a livestock room and the distribution of heat flows in the areas where young animals are located. (*Materials and methods*) The authors considered the conditions of a comfortable thermal regime for young animals and a physical model of animal heat transfer with the environment. The use of various methods

for calculating heat transfer helped to determine the areas of change in the radiation panel temperature and the influence of the configuration and the system shell optical characteristics when creating comfortable conditions for keeping piglets. (*Results and discussion*) It was established that the computational model of heat transfer in a system of isothermal diffusely absorbing and radiating surfaces can be considered as an extension of existing computational methods. The model takes into account additional impact factors, including the influence of "hidden" surfaces through multiple reflections in a closed thermodynamic system. There is consistency between the results of heat transfer calculations by various methods, under the assumption that the system shell optical parameters are close to the characteristics of absolutely black body. (*Conclusions*) It was revealed that the system shell optical characteristics have a significant impact on the temperature regime of the irradiation panel surface, and the proposed computational model for determining the heated panel temperature regime in a system of isothermal diffusely absorbing and radiating surfaces can be applied to a wide range of agricultural premises of various configurations and geometries.

Keywords: livestock buildings, heating of young animals, keeping piglets, radiation panel, IR panel, computational model, methods for calculating radiant heat transfer.

For citation: Kuz'michev A.V., Tikhomirov D.A., Khimenko A.V. Sravnitel'nyy analiz metodov rascheta luchistogo obogreva molodnyaka v zhivotnovodcheskikh pomeshcheniyakh [Comparative analysis of methods for calculating radiant heating of young animals in livestock premises]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol.16. N1. 10-18 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-10-18.

Для полноценной реализации генетического потенциала животных и роста их продуктивности необходимо создать оптимальный тепловой режим при их содержании. В частности, поросята раннего возраста чувствительны к температурным изменениям окружающей среды. Для поддержания здорового теплообмена для молодняка важно обеспечить комфортные условия, в том числе с помощью лучистой энергии от искусственно созданного источника. Выбор математических моделей и методов расчета, наиболее адекватно отображающих связи в биотехнической системе, позволяет определить конструктивные параметры и обосновать температурный режим поверхности облучающей панели в зоне содержания молодняка для различных условий окружающей среды.

Цель исследования – провести оценку и выбрать рациональный метод расчета лучистого теплообмена в системе поверхностей с произвольной конфигурацией, отображающих состояние биологического объекта в условиях животноводческого помещения и распределение тепловых потоков в зонах расположения молодняка.

Материалы и методы. Для создания благоприятного теплового режима в зонах размещения животных раннего возраста применяют различные технические средства инфракрасного (ИК) обогрева. Однако известные методики расчета рационального выбора ИК-обогревателей и режимов их работы обладают различной достоверностью и точностью. Поэтому актуален анализ теоретических положений расчета лучистого обогрева для молодняка животных (поросята, телята и др.) при помощи ИК-панелей. Предложили обобщенную методику расчета локального обогрева на примере поросят раннего возраста (до 1 мес), учитывающую конструктивные и теплотехнические параметры животноводческого помещения.

Предлагаемый подход позволяет расширить применение рассмотренной методики для различного типа ИК-излучателей и видов животных.

Поросята раннего возраста наиболее чувствительны к температурным изменениям окружающей среды [1, 2]. На тепловой баланс животных существенное влияние оказывает лучистая энергия при их теплообмене с ограждающими конструкциями. Важно создать искусственную среду с определенными термодинамическими параметрами для обеспечения комфортных условий содержания животных [3, 4]. Выбор математических моделей, наиболее адекватно отображающих связи и их взаимодействие в биотехнической системе «животное – окружающая среда», позволяет обосновать параметры инфракрасных обогревателей и режим их работы, обеспечивающие оптимальные тепловые условия в зоне содержания молодняка [5, 6].

Интенсивность отдачи тепла животным зависит от температуры ограждающих конструкций и поверхностей, их расположения и размеров. При комфортных условиях сохраняется тепловое равновесие и отсутствует напряжение организма в процессе терморегуляции [7, 8].

Общепринятое математическое представление этого условия для производственных и жилых помещений имеет вид [4, 5]:

$$Q_{\text{ж}}^{\text{л-к}} = F_{\text{л}} \sum C \varphi_1 b_1 (t_{\text{ж}} - t_1) + F_{\text{к}} \alpha_{\text{к}} (t_{\text{ж}} - t_{\text{в}}) + F_{\text{конд}} k_{\text{п}} (t_{\text{ж}} - t_{\text{п}}), \quad (1)$$

где $Q_{\text{ж}}^{\text{л-к}}$ – лучистая, конвективная и кондуктивная теплоотдача животного в окружающую среду, Вт;

$F_{\text{л}}$ – поверхность животного, участвующая в лучистом теплообмене, м²;

C – приведенный коэффициент излучения;

φ_1 – угловой коэффициент облученности со стороны элементарной поверхности животного в направ-

лении i -ой поверхности;

b_i – поправочный коэффициент;

F_k – поверхность животного, участвующая в конвективном теплообмене, m^2 ;

α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи, $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

$F_{конд}$ – поверхность животного, участвующая в кондуктивном теплообмене, m^2 ;

k_p – коэффициент теплопередачи с поверхности животного в пол, $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

t_i – температура i -поверхности, $^\circ C$;

$t_{ж}, t_{в}, t_{п}$ – температура кожи животного, окружающего воздуха, пола соответственно, $^\circ C$;

U – зона основного теплообмена животного, $Вт$ [3, 4].

При расчете радиационной составляющей теплообмена в производственных и жилых помещениях величину приведенного коэффициента излучения в выражении (1) принимают $C = 4,65 \text{ Вт}/(m^2 K^4)$ [9].

Среднее значение теплоотдачи с элементарной площадки поверхности животного равно:

$$q = Q_{ж}^{л-к} F_{ж}, \quad (2)$$

где $F_{ж}$ – поверхность животного, m^2

Из соотношений (1) и (2) следует заключение:

$$q_{л} \subset (Q_{яв.min}/F_{ж} \dots Q_{яв.max}/F_{ж}), \quad (3)$$

где $q_{л}$ – лучистая теплоотдача с элементарной поверхности животного, $Вт/m^2$,

$Q_{яв.min} \dots Q_{яв.max}$ – граница явных тепловыделений $Q_{яв}$ животного конкретного вида и возраста в условиях теплового комфорта в зоне основного обмена U , $Вт$.

При расположении животного около нагретых или охлажденных поверхностей определяющей величиной будет интенсивность лучистого теплообмена на наиболее чувствительной к излучению поверхности тела.

Уравнение лучистого теплообмена для элементарной площадки с поверхности животного в системе излучающих поверхностей имеет вид:

$$q_{л} = \Sigma C \varphi_i b_{ж-i} (t_{ж} - t_i) + C(1 - \Sigma \varphi_i) b_{ж-п} (t_{ж} - t_p), \quad (4)$$

где φ_i – угловой коэффициент облученности со стороны элементарной поверхности животного в сторону i -ой поверхности;

$b_{ж-i} = 0,81 + 0,01 \tau_{срi}$ – поправочный температурный коэффициент, $\tau_{срi} = 0,5(t_{ж} + t_i)$;

$b_{ж-п} = 0,81 + 0,01 \tau_{срп}$ – поправочный температурный коэффициент, $^\circ C$; $\tau_{срп} = 0,5(t_{ж} + t_p)$, $^\circ C$;

t_p – средняя температура ограждений помещения, $^\circ C$.

Значения явных тепловыделений $Q_{яв}$ и теплопродукции конкретного животного, температура поверхности $t_{ж}$ должны соответствовать зоне основного обмена U [7, 8].

Величину удельного потока теплоты $q_{л}$, передава-

емой элементарной поверхностью животного ограждения помещения определяют по формуле Христиансена [9-12]:

$$q_{л} = \Sigma C_{прi} \left[\left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_i}{100} \right)^4 \right] \varphi_i + C_{пр} (1 - \Sigma \varphi_i) \left[\left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{в.п}}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

где $C_{прi} = C_0(1/\varepsilon_{ж} + 1/\varepsilon_i - 1)$ и $C_{пр} = C_0(1/\varepsilon_{ж} + 1/\varepsilon_{в.п} - 1)$ – приведенные коэффициенты излучения, $Вт/(m^2 K^4)$;

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $Вт/(m^2 K^4)$;

$\varepsilon_{ж}, \varepsilon_i, \varepsilon_{в.п}$ – степень черноты поверхности животного, i -ой поверхности и оболочки системы;

$T_{ж}$ – температура поверхности животного, K ;

T_i – температура i -поверхности, K ;

$T_{в.п}$ – температура оболочки системы, K .

Рассмотрим обобщенную схему модели теплообмена животного с радиационной панелью (рис. 1). Запишем уравнение лучистого теплообмена для этого варианта на основе соотношения (4):

$$q_{л} = C \varphi_{п} b_{ж-п} (t_{ж} - t_{п}) + C(1 - \varphi_{п}) b_{ж-в.п} (t_{ж} - t_{в.п}); \quad (6)$$

$$t_{п} = t_{ж} + \frac{1 - \varphi_{п}}{\varphi_{п}} \frac{b_{ж-п}}{b_{ж-в.п}} (t_{ж} - t_{в.п}) - \frac{q_{л}}{C \varphi_{п} b_{ж-п}}, \quad (6a)$$

где $b_{ж-п}$ и $b_{ж-в.п}$ – температурные коэффициенты;

$\varphi_{п}$ – угловой коэффициент облученности со стороны элементарной поверхности животного в сторону облучающей поверхности.

Запишем уравнение лучистого теплообмена для рассматриваемого варианта на основе соотношения (5):

$$q_{л} = C_0 \left(\frac{1}{\varepsilon_{ж}} + \frac{1}{\varepsilon_{п}} - 1 \right) \left[\left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{п}}{100} \right)^4 \right] \varphi_{п} + C_0 \left(\frac{1}{\varepsilon_{ж}} + \frac{1}{\varepsilon_{в.п}} - 1 \right) (1 - \varphi_{п}) \left[\left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{в.п}}{100} \right)^4 \right]. \quad (7)$$

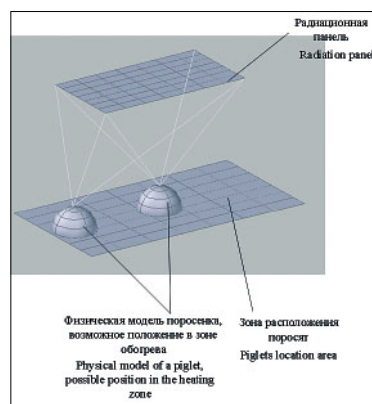


Рис. 1. Модель теплообмена животного с радиационной панелью

Fig. 1. Model of heat exchange of an animal with a radiation panel

Модель лучистого теплообмена, основанная на соотношениях (4)-(7), ограничивается описанием лучистых потоков для «видимых» поверхностей и не учитывает диффузную составляющую лучистого потока от скрытых поверхностей, характерную для диффузно поглощающих и излучающих тел.

Расширение модели лучистого теплообмена для условия диффузно поглощающих и излучающих тел в адиабатной замкнутой системе позволяет получить более полное описание протекающих термодинамических процессов (рис. 2, 3).

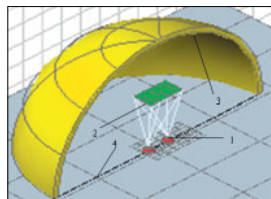


Рис. 2. Физическая модель теплообмена в системе изотермических диффузно поглощающих и излучающих поверхностей: 1 – элементарная поверхность животного; 2 – излучающая панель; 3 – поверхность ограждающих конструкций; 4 – поверхность пола

Fig. 2. Physical model of heat transfer in a system of isothermal diffusely absorbing and radiating surfaces: 1 – elementary surface of the animal; 2 – radiating panel; 3 – the surface of the enclosing structures; 4 – floor surface

Рассмотрим замкнутую термодинамическую систему, состоящую из N поверхностей конечных размеров.

Термодинамическая модель теплообмена строится с учетом следующих ограничений:

- каждая поверхность – изотермическая;
- каждая поверхность системы – серая;
- излучение, отражаемое от поверхностей, диффузно распределяется в пространстве;
- излучение, испускаемое каждой поверхностью, диффузно распределяется в полупространстве;
- поверхностная плотность потока эффективного излучения одинакова во всех точках каждой из поверхностей системы, при этом угловые коэффициенты не зависят от величины и поверхностного распределения потоков излучения.

При известных температурах поверхностей системы для произвольной i -поверхности плотность потока результирующего излучения определяется по выражению [13, 14]:

$$\frac{Q_i}{F_i} = \sum_{j=1}^N A_{ij} \sigma T_j^4, \quad 1 \leq i \leq N, \quad (8)$$

где $A_{ij} = (\varepsilon_i / (1 - \varepsilon_i)) (\delta_{ij} - \psi_{ij})$,

δ_{ij} – символ Кронекера, $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$; $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$.

Q_i – поток результирующего излучения с поверхности F_i .

Коэффициенты ψ_{ij} определяют на основе вычисления обратной матрицы χ :

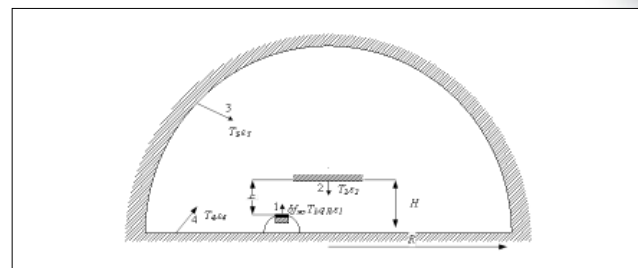


Рис. 3. Термодинамическая модель лучистого теплообмена между поверхностями: 1 – элементарная поверхность $\delta_{f_{ж}}$, m^2 ; $T_1(t_1)$ – температура поверхности, К; q_1 – результирующее излучение с элементарной поверхности, $Вт/m^2$; $\varepsilon_1 - \varepsilon_4$ – степень ее черноты; 2 – облучающая панель; $T_2(t_p)$ – температура поверхности, К; ε_2 – степень ее черноты; 3 – поверхность ограждающих конструкций (потолок, стены); $T_3(t_3)$ – температура ограждения, К; ε_3 – степень ее черноты; 4 – поверхность пола; $T_4(t_4)$ – температура, К; ε_4 – степень ее черноты; H – высота подвеса облучателя, м; h – высота облучателя над поверхностью $\delta_{f_{ж}}$, м; R – обобщенный размер помещения, м

Fig. 3. Thermodynamic model of radiant heat transfer between surfaces: 1 – elementary surface $\delta_{f_{ж}}$, m^2 ; $T_1(t_1)$ – surface temperature, К; q_1 – the resulting radiation from the elementary surface, W/m^2 ; $\varepsilon_1 - \varepsilon_4$ – the degree of its blackness; 2 – radiation panel; $T_2(t_p)$ – surface temperature, К; ε_2 – the degree of its blackness; 3 – the surface of enclosing structures (ceiling, walls); $T_3(t_3)$ – fencing temperature, К; ε_3 – the degree of its blackness; 4 – floor surface; $T_4(t_4)$ – temperature, К; ε_4 – the degree of its blackness; H – the height of the irradiator suspension, m; h – the height of the irradiator above the surface $\delta_{f_{ж}}$, m; R – generalized room size, m

$$\psi = \chi^{-1} = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \cdots & \psi_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{N1} & \cdots & \psi_{NN} \end{bmatrix},$$

$$\text{где } \chi_{ij} = \frac{\delta_{ij} - (1 - \varepsilon_i) \phi_{F_i - F_j}}{\varepsilon_i} \text{ и } \chi = \begin{bmatrix} \chi_{11} & \cdots & \chi_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \chi_{N1} & \cdots & \chi_{NN} \end{bmatrix}.$$

Для рассматриваемой модели определение угловых коэффициентов основывается на аксиомах существования, аддитивности, замкнутости и вытекающей из этих положений теоремы взаимности и конгруэнтности [16].

Если рассматривать замкнутую систему, состоящую из $N = 4$ поверхностей конечных размеров, то аналитические расчеты значительно упрощаются, а подобная модель служит обобщающей структурой для различных по геометрии и размерам животноводческих помещений (рис. 2, 3).

Введем следующие определения и ограничения:

- обобщенный размер помещения выразим параметром $R = (\Sigma F_{st} / 3\pi) 0,5$, где ΣF_{st} – суммарная площадь поверхности стен, потолка и пола;

- линейные размеры поверхностей 1 и 2 значительно меньше размеров оболочки 3 и 4, и экранирующее влияние на величину лучистых потоков между поверхностями оболочки не учитываются (рис. 3).

При этом угловые коэффициенты излучения между взаимодействующими поверхностями принимают следующие соотношения:

$$\varphi_{11} = 0,$$

$$\varphi_{12} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{X}{(1+X^2)^{-2}} \tan^{-1} \left(\frac{Y}{(1+X^2)^{-2}} \right) + \frac{Y}{(1+Y^2)^{-2}} \tan^{-1} \left(\frac{X}{(1+Y^2)^{-2}} \right) \right],$$

где $X = a/c$, $Y = b/c$; a и b – линейные размеры прямоугольной излучающей поверхности, м;

c – расстояние до элементарной поверхности животного $\delta_{fж}$ от торца излучающей поверхности, м.

Запишем:

$$\varphi_{13} = 1 - \varphi_{12}; \varphi_{14} = 0;$$

$$\varphi_{21} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{X}{(1+X^2)^{-2}} \tan^{-1} \left(\frac{Y}{(1+X^2)^{-2}} \right) + \frac{Y}{(1+Y^2)^{-2}} \tan^{-1} \left(\frac{X}{(1+Y^2)^{-2}} \right) \right] \frac{\delta f}{F}, \quad \varphi_{22} = 0;$$

$$\varphi_{23} = \int_0^{2\pi} \int_0^H \frac{h(R^2 - (H-h)^2)^{-2}}{\pi R^3} dh d\varphi; \quad \varphi_{24} = 1 - \varphi_{23};$$

$$\varphi_{31} = (1 - \varphi_{12}) \frac{\delta f}{F_{31}},$$

где $\delta_{fж}$ – элементарная площадка поверхности животного;

F_{31} – «видимая» поверхность F_3 с элементарной площадки $\delta_{fж}$;

H – высота подвеса облучателя, м;

h – высота облучателя над элементарной поверхностью животного $\delta_{fж}$, м;

$$\varphi_{32} = 0,5\varphi_{23}F_2/\pi RH; \quad \varphi_{33} = 1 - (F_4/F_3); \quad \varphi_{34} = F_4/F_3;$$

$$\varphi_{41} = 0; \quad \varphi_{42} = (1 - \varphi_{23})(F_2/\pi R^2); \quad \varphi_{43} = 1; \quad \varphi_{44} = 0.$$

Приведенные соотношения служат основой для определения требуемой температуры поверхности обогреваемой панели, излучающей тепловую энергию, а также для сравнительной оценки расчетных результатов рассмотренных методов.

В дальнейшем будем считать, что выражения (6)–(8) отражают различные три метода расчета.

Результаты и обсуждение. Общая постановка задачи расчета обогрева и охлаждения зон содержания молодняка определяется системой уравнений общего теплообмена в помещении и условиями комфортности. На радиационную температурную обстановку в помещении влияют основные группы поверхностей – нагревающих, охлаждающих и нейтральных. Для расчета лучистых потоков в помещении учитывают температуру внутренних поверхностей ограждений. В этом случае математическое описание для определения площади обогревающих поверхностей

и их температуры значительно упрощаются. Особенность составления соотношений для разных групп поверхностей состоит в определении значений коэффициентов облученности между взаимодействующими поверхностями, усредненных значений коэффициентов приведенного излучения, потока эффективного излучения и других параметров процесса.

Решение для полной системы, состоящей из нескольких уравнений, оказывается достаточно сложным, поэтому используют упрощенные расчетные схемы. Для этого устанавливают температуру наружных ограждений, обращенных в помещение, и внутренних. В этом случае искомой величиной станет температура или площадь обогревающей поверхности ИК-облучателя. Подобный подход к решению поставленной задачи позволяет заменить систему уравнений теплообмена в помещении одним равенством.

Поле излучения в системе произвольно заданной конфигурации и размеров поверхностей, разделенных диатермической средой, служит функцией полей температур и оптических констант на границе системы. Конфигурация локальной системы стандартна – это выделенная зона в общей системе с инфракрасным источником излучения (рис. 2) [15]. Сельскохозяйственные помещения имеют довольно широкий размерный ряд зданий и помещений – от небольших ферм до крупных животноводческих комплексов. В связи с этим целесообразно привести многообразие геометрических форм объектов к обобщенному параметру R , отражающему размеры помещения (рис. 3).

С учетом вышесказанного постановка задачи имеет следующую трактовку:

- определить температуру (или площадь) излучающей поверхности в замкнутой системе диффузно излучающих тел, при этом температура и результирующее излучение с элементарной поверхности животного $\delta_{fж}$ должна находиться в интервалах:

$$t_1 \in (t_{1\min} \cdot t_{1\max}) \text{ и } q_{\lambda} \in (q_{\lambda\min} \cdot q_{\lambda\max});$$

- выявить области вариации расчетных значений в зависимости от переменных параметров: температуры ограждений, пола, оптических характеристик поверхностей;

- оценить влияние оптических характеристик взаимодействующих тел;

- установить условия применения расчетных моделей.

В качестве исходных данных приняты конструктивные и технологические параметры термодинамической системы с учетом норм технологического проектирования свиноводческих маточников:

- размер излучающей панели по ширине и длине $0,5 \times 1 \text{ м}^2$, высота h над поверхностью $\delta_{fж}$ составляет 1 м;

- результирующее излучение с элементарной поверхности $\delta f q_{\lambda} = 18 \text{ Вт/м}^2$, температура поверхности $t_1 = 33^\circ\text{C}$;

- оптические характеристики излучающей системы поверхностей варьируются в интервалах $\varepsilon_i = 0,80-0,98$, $i = 1-4$, температура термически однородных поверхностей 3 и 4 находится в пределах $t_3 = 10-25^\circ\text{C}$, $t_4 = 5-25^\circ\text{C}$.

Расчетные зависимости температуры поверхности облучающей панели t_p от температуры ограждения t_3 , вычисленные по первому и второму методам, близки между собой, и для характерных значений температуры ограждения разница результатов не превышает 10% (рис. 4).

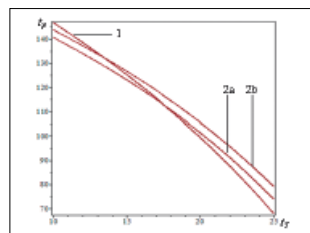


Рис. 4. Зависимости температуры поверхности панели от температуры оболочки (стены, потолок) в помещении, $^\circ\text{C}$: 1 – расчет по методу 1; 2a и 2b – расчет по методу 2 для $\varepsilon_3 = 0,96$ и $\varepsilon_3 = 0,80$ соответственно

Fig. 4. The dependence of the panel surface temperature on the shell (walls, ceiling) temperature in the room, $^\circ\text{C}$: 1 – calculation by method 1; 2a and 2b – calculation by method 2 for $\varepsilon_3 = 0,96$ and $\varepsilon_3 = 0,80$, respectively

При расчете по третьему методу поверхности 1 и 2 ограничивают область изменения t_p в интервале $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,80-0,96$ (рис. 5).

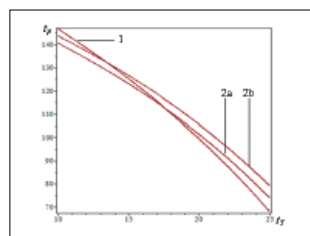


Рис. 5. Область значений температуры поверхности панели t_p в зависимости от температуры t_3 (потолок, стены) и t_4 (пол), $^\circ\text{C}$: 1 – при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,80$; 2 – при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,96$

Fig. 5. The range of panel surface temperature values depending on the temperature t_3 (ceiling, walls) and t_4 (floor), $^\circ\text{C}$: 1 – panel temperature at $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,80$; 2 – panel temperature at $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,96$

При обеспечении заданного в математических моделях результирующего излучения $q_{\text{л}}$ с элементарной поверхности животного $\delta f_{\text{ж}}$ и ее температурой t_1 значения температуры поверхности излучающей панели, рассчитанные по второму и третьему методу, существенно отличаются (разница результатов достигает 50-60%). Это обусловлено учетом влияния отраженных диффузных тепловых потоков и оптических

характеристик взаимодействующих поверхностей (рис. 6). При условии, когда оптические характеристики оболочки системы близки к характеристикам абсолютно черным ($\varepsilon \approx 1$), интерпретации в терминах рассматриваемых моделей находятся в близком соответствии (3-5%) (рис. 6).

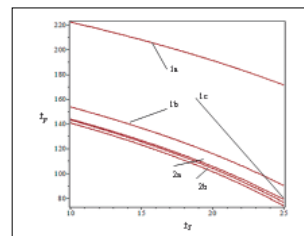


Рис. 6. Зависимости температуры поверхности облучающей панели t_p от температуры ограждения t_3 , $^\circ\text{C}$: 1a и 1b – по методу 3 для параметров, входящих в расчетную модель: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,80$, $t_4 = 10^\circ\text{C}$, $R = 15$ м и $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,96$ соответственно; графики 2a и 2b – по методу 2 для $\varepsilon_3 = 0,96$ и $\varepsilon_3 = 0,80$ соответственно; график 1c – по методу 3 при $t_4 = 20^\circ\text{C}$, $R = 15$ м и $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 \rightarrow 1$

Fig. 6. The dependence of the radiation panel surface temperature $t_p(^\circ\text{C})$ on the fencing temperature $t_3(^\circ\text{C})$: 1a and 1b – by method 3 for the parameters included in the calculation model: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0.80$, $t_4 = 10^\circ\text{C}$, $R = 15$ m and $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0.96$, respectively; graphs 2a and 2b – by method 2 for $\varepsilon_3 = 0.96$ and $\varepsilon_3 = 0.80$, respectively; graph 1c – by method 3 at $t_4 = 20^\circ\text{C}$, $R = 15$ m and $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 \rightarrow 1$

Расчетная зависимость температуры поверхности облучающей панели t_p от оптических характеристик оболочки системы по соотношению (7) выявила существенное влияние на тепловой режим в зоне обогрева животных (рис. 7). При создании теплового режима и уровня облучения в зоне обогрева необходимо учитывать тип помещений и их конструктивные особенности.

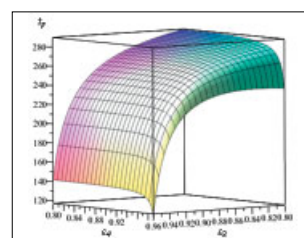


Рис. 7. Зависимость температуры поверхности облучающей панели t_p от оптических характеристик оболочки системы: ε_3 – степень черноты ограждений (потолок, стены); ε_4 – степень черноты пола

Fig. 7. Dependence of the radiation panel surface temperature $t_p(^\circ\text{C})$ on the system shell optical characteristics: ε_3 – the degree of fencing (ceiling, walls) blackness; ε_4 – the degree of the floor blackness

Проведенные расчеты показали, что при любых фиксированных значениях оптических характеристик

поверхностей системы и их температур (например, при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,8$, $t_3 = 15^\circ\text{C}$ и $t_4 = 10^\circ\text{C}$), входящих в расчетную модель (7), размеры и конфигурация помещения, отраженные в обобщенном параметре помещения R , существенно не влияют на температуру облучающей панели (рис. 8).

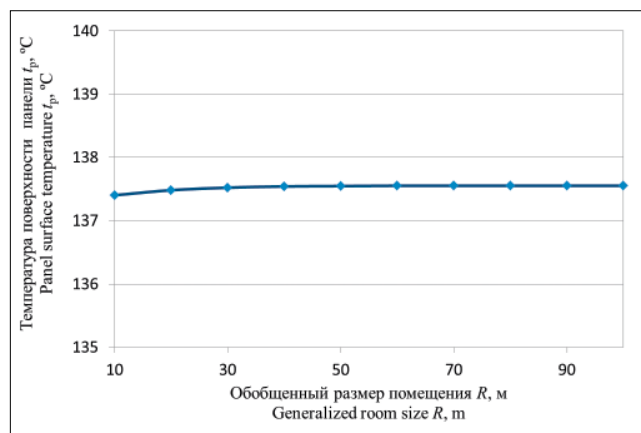


Рис. 8. Зависимость температуры поверхности облучающей панели t_p от параметра R

Fig. 8. Dependence of the radiation panel surface temperature t_p on R parameter

Расчет температуры поверхности проведен для конкретной облучающей панели в системе изотермических диффузно поглощающих и излучающих поверхностей с заданной геометрией и определенным значением удельного потока результирующего излучения с элемента поверхности в заданной пространственной точке. Рассмотренный пример является частным выражением, отражающим общие закономерности связей в замкнутой термодинамической системе.

В инженерной практике преобладает использование первых двух методов расчета для оценки теплового комфорта. Это обусловлено тем, что при изменении тепловых условий в определенном диапазоне организм животных может адаптировать метаболические реакции к тепловому состоянию среды. Расчеты, проводимые с использованием подобных моделей, определяют термодинамические параметры в до-

пустимых границах с достаточной точностью для их практической реализации при обосновании параметров технических средств ИК-облучателей.

Однако в первые часы и дни жизни механизм терморегуляции у молодняка животных находится в стадии становления, и тепловые параметры системы, влияющие на уровень тепловых потоков в зоне содержания животных, варьируются в достаточно узком диапазоне. Поэтому расчетная модель должна наиболее полно отражать функциональную связь между всеми элементами рассматриваемой термодинамической системы [16-18].

Реализация предложенного метода расчета при проектировании и разработке систем локального ИК-обогрева молодняка животных обеспечит его сохранность, увеличит привесы при снижении энергозатрат на производство продукции [19-21].

Выводы. Приведенные методы расчета основаны на общих фундаментальных принципах. Предлагаемая модель и метод расчета теплообмена в системе изотермических диффузно поглощающих и излучающих поверхностей (метод 3) представляет собой расширение первых двух методов. Этот метод учитывает опосредованное влияние «скрытых» поверхностей животноводческого помещения через многократное отражение тепловых потоков в замкнутой термодинамической системе.

Установлено, что оптические характеристики оболочки системы значительно влияют на температурный режим поверхности облучающей панели. В предельном случае, когда оптические характеристики оболочки системы близки к характеристикам абсолютно черным, интерпретации в терминах рассматриваемых моделей находятся в близком соответствии, и разница в полученных результатах не превышает 10%.

Рассмотренная модель и метод расчета актуальны при обосновании теплоэнергетических и конструктивных параметров облучающих ИК-панелей для обеспечения заданного микроклимата при содержании животных раннего возраста.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Caldara F.R., dos Santos L.S., Machado S.T., Moi M., Nasas I.D., Foppa L., Garcia R.G., dos Santos R.D.S. Piglets' Surface Temperature Change at Different Weights at Birth. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2014. Vol. 27. N3. 431-438.
2. Lane K.J., Stalder K.J., Harmon J.D., Karriker L.A., Johnson A.K. Comparison of multiple heat sources in the farrowing house: Effect on production and energy efficiency. *Journal of Animal Science*. 2019. Vol. 97. N2. 232-233.
3. Wheeler E.F., Vasdal G., Flo A., Boe K.E. Static space requirements for piglet creep area as influenced by radiant temperature. *Transactions of the ASABE*. 2008. Vol. 51. N1. 271-278.
4. Кузьмичев А.В., Лямцов А.К., Тихомиров Д.А. Теплоэнергетические показатели ИК облучателей для молодняка животных // *Светотехника*. 2015. N3. С. 57-58.
5. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Kuzmichev A.V., Rastishin S.A., Shepvalova O.V. Energy-efficient thermoelectric unit for microclimate control on cattlebreeding premises. *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. N6. 293-305.
6. Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Хименко А.В. Установка с термостатируемой панелью для поросят // *Элек-*



- тротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. N3(44). С. 21-28.
7. Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А. Тепловой режим в зонах размещения поросят // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 17-22.
 8. Кузьмичев А.В. Описание процессов теплообмена в системе «животное-среда» // *Вестник ВИЭСХ*. 2017. N3(28). С. 33-38.
 9. Богословский В.И. Тепловой режим зданий. М.: Стройиздат. 1979. 248 с.
 10. Shatskov A.O. Determining temperature of adiabatic surfaces in rooms with radiant heating. *Thermal engineering*. 2021. Vol. 68. N9. 717-722.
 11. Spodyniuk N., Zhelykh V., Dzeryn O. Combined heating systems of premises for breeding of young pigs and poultry. *FME Transactions*. 2018. Vol. 46. N4. 651-657.
 12. Tikhomirov D.A., Rastimeshin S.A., Trunov S.S., Ukhanova V.Yu., Kuzmichev A.V. Mathematical Modelling and Energy Accounting of Heaters for Growing Stock. *Environmental Science*. 2020. Vol. 10. N4. 13-20.
 13. Howell J.R., Mengüç M.P., Daun K., Siegel R. Thermal Radiation Heat Transfer. Taylor and Francis. 2021. 1040.
 14. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Наука, 1970. 660 с.
 15. Rabanillo-Herrero M., Padilla-Marcos M.A., Feijo-Munoz J., Meiss A. Effects of the radiant heating system location on both the airflow and ventilation efficiency in a room. *Indoor and built environment*. 2019. Vol. 28. N3. 372-383.
 16. Andersen H.M.-L., Pedersen L.J. Effect of radiant heat at the birth site in farrowing crates on hypothermia and behaviour in neonatal piglets. *Cambridge University Press*. 2016. Vol. 10. N1. 128-134.
 17. Benjamin C.S., Brett C.R., Steven J.H. Modeling and assessing heat transfer of piglet microclimates. *AgriEngineering*. 2021. N3. 768-782.
 18. Botto L., Lendelová J. Surface temperature of warm-water pads for heating piglets in farrowing pens. *Slovak Journal of Animal Science*. 2016 (3). 49. 116-121.
 19. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Tikhomirov D.A., Tikhomirov A.V. The state, promising directions and strategies for the development of the energy base of agriculture. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. N51(3). 24–35.
 20. Васильев А.Н., Дорохов А.С., Ершова И.Г. и др. Методология исследования энергосберегающих технологических систем обработки сельхозпродукции как объектов управления // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 12. N4(63). С. 86-104.
 21. Дорохов А.С. Компьютерное зрение как инструмент системы управления технологическими процессами // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России. Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 145-летию со дня рождения основоположника земледельческой механики В.П. Горячкина. М.: ВИМ. 2013. С. 355-357.

REFERENCES

1. Caldara F.R., dos Santos L.S., Machado S.T., Moi M., Nasas I.D., Foppa L., Garcia R.G., dos Santos R.D.S. Piglets' Surface Temperature Change at Different Weights at Birth. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2014. Vol. 27. N3. 431-438 (In English).
2. Lane K.J., Stalder K.J., Harmon J.D., Karriker L.A., Johnson A.K. Comparison of multiple heat sources in the farrowing house: Effect on production and energy efficiency. *Journal of Animal Science*. 2019. Vol. 97. N2. 232-233 (In English).
3. Wheeler E.F., Vasdal G., Flo A., Boe K.E. Static space requirements for piglet creep area as influenced by radiant temperature. *Transactions of the ASABE*. 2008. Vol. 51. N1. 271-278 (In English).
4. Kuz'michev A.V., Lyamtsov A.K., Tikhomirov D.A. Teplo-energeticheskie pokazateli IK obluchateley dlya molodnyaka zhivotnykh [Heat and energy indicators of IR irradiators for young animals]. *Svetotekhnika*. 2015. N3. 57-58 (In Russian).
5. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Kuzmichev A.V., Rastimeshin S.A., Shepvalova O.V. Energy-efficient thermoelectric unit for microclimate control on cattlebreeding premises. *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. N6. 293-305 (In English).
6. Kuz'michev A.V., Tikhomirov D.A., Khimenko A.V. Ustanovka s termostatiруемой panel'yu dlya porosyat [Installation with a thermostatically controlled panel for piglets]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2021. Vol. 68. N3(44). 21-28 (In Russian).
7. Kuz'michev A.V., Tikhomirov D.A. Teplovoy rezhim v zonakh razmeshcheniya porosyat [Thermal regime in piglet placement areas]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N3(36). 17-22 (In Russian).
8. Kuz'michev A.V. Opisanie protsessov teploobmena v sisteme «zhivotnoe-sreda» [Description of heat exchange processes in the «animal-environment» system]. *Vestnik VIESKH*. 2017. N3(28). 33-38 (In Russian).
9. Bogoslovskiy V.N. Teplovoy rezhim zdaniy [Thermal regime of buildings]. Moscow: Stroyizdat. 1979. 248 (In Russian).
10. Shatskov A.O. Determining temperature of adiabatic surfaces in rooms with radiant heating. *Thermal engineering*. 2021. Vol. 68. N9. 717-722 (In English).
11. Spodyniuk N., Zhelykh V., Dzeryn O. Combined heating systems of premises for breeding of young pigs and poultry. *FME Transactions*. 2018. Vol. 46. N4. 651-657 (In English).
12. Tikhomirov D.A., Rastimeshin S.A., Trunov S.S., Ukhanova V.Yu., Kuzmichev A.V. Mathematical Modelling and Energy Accounting of Heaters for Growing Stock. *HELIX*. 2020. Vol. 10. N4. 13-20 (In English).
13. John R. Howell M. Pinar Mengüç, Kyle Daun, Robert Siegel. Thermal Radiation Heat Transfer. Taylor and Francis.

2021. 1040 (In English).
14. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of heat transfer theory]. Moscow: Nauka. 1970. 660 (In Russian)
 15. Rabanillo-Herrero M., Padilla-Marcos M.A., Feijo-Munoz J., Meiss A. Effects of the radiant heating system location on both the airflow and ventilation efficiency in a room. *Indoor and built environment*. 2019. Vol. 28. N3. 372-383 (In English).
 16. Andersen H.M.-L., Pedersen L.J. Effect of radiant heat at the birth site in farrowing crates on hypothermia and behaviour in neonatal piglets. *Cambridge University Press*. 2016. Vol. 10. N1. 128-134 (In English).
 17. Benjamin C.S., Brett C.R., Steven J.H. Modeling and assessing heat transfer of piglet microclimates. *AgriEngineering*. 2021. Vol. 3. 768-782 (In English).
 18. Botto L., Lendelová J. Surface temperature of warm-water pads for heating piglets in farrowing pens. *Slovak Journal of Animal Science*. 2016. Vol. 49. 116-121 (In English).
 19. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Tikhomirov D.A., Tikhomirov A.V. The state, promising directions and strategies for the development of the energy base of agriculture. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. Vol. 51. N3. 24-35. (In English).
 20. Vasil'ev A.N., Dorokhov A.S., Ershova I.G.. et al. Metodologiya issledovaniya energosberegayushchikh tekhnologicheskikh sistem obrabotki sel'khozproduktov kak obektov upravleniya [Methodology of research of energy-saving technological systems of processing of agricultural products as objects of management]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019. Vol. 12. N4(63). 86-104 (In Russian).
 21. Dorokhov A.S. Komp'yuternoe zrenie kak instrument sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami. Sistema tekhnologiy i mashin dlya innovatsionnogo razvitiya APK Rossii. *Sbornik nauchnykh dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 145-letiyu so dnya rozhdeniya osnovopolozhnika zemledel'cheskoy mekhaniki V.P. Goryachkina*. Moscow: VIM. 2013. 355-357 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Кузьмичев А.В. – подготовка начального варианта статьи, формулирование цели и задачи исследования, разработка теоретических предпосылок;
 Тихомиров Д.А. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования;
 Хименко А.В. – доработка текста, формирование общих выводов и литературный анализ.
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Kuz'michev A.V. – preparation of the manuscript draft, formulation of the study purpose and objectives, development of theoretical premises;
 Tikhomirov D.A. – scientific guidance, formulation of the research main directions;
 Khimenko A.V. – manuscript revision, general conclusions and literature review.
 The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
 The paper was accepted for publication on

03.11.2021
 04.02.2022