

**Расчет локальных электрообогревателей для молодняка  
(Растимешин С.А., Тихомиров Д.А., Трунов С.С.)**

Для молодняка животных должны быть созданы условия теплового комфорта [28], [29]. Известно, что обоснование энергетических параметров локальных обогревательных устройств следует вести на основании уравнения теплового баланса живого организма.

В то же время обобщенная методика расчета теплообмена молодняка животных, применяя которую можно было бы провести оптимизацию средств локального обогрева в полном виде не создана.

Аналитическая оценка величины температуры помещения вне локальных обогреваемых зон. При математическом моделировании теплообмена расчетного животного с окружающей средой рационально вместо температуры воздуха  $t_a$  и радиационной температуры внутренних поверхностей ограждающих конструкций  $\tau_R$  использовать комплексный параметр - температуру помещения  $t_p$  [30]. Это позволяет осуществить контроль температуры фактически ощущаемой животным  $t_{s.p}$  [31], [32]. Величину  $t_p$  определим, как:

$$t_p = At_a + B\tau_R; \quad (33)$$

где  $A$  и  $B$  - тепловые коэффициенты, характеризующие степень теплового воздействия на животное ограждений и окружающего воздуха. При этом в соответствии с [33],

$$A = 1 - B; \quad (34)$$

Величину  $B$  принимают для свинарников 0,42, коровников 0,3.

Более точно величины  $A$  и  $B$  можно получить из тепловой характеристики животного как

$$A = \alpha_c / (\alpha_r + \alpha_c); \quad (35)$$

$$B = \alpha_r / (\alpha_r + \alpha_c); \quad (36)$$

где  $\alpha_c$  и  $\alpha_r$  - коэффициенты конвективной и лучистой теплоотдачи.

Определим  $t_p$ , для животноводческого помещения с конкретными  $t_a$  и  $\tau_R$ . Рассмотрим два случая.

1. Животное стоит в идеализированной климатической камере с  $t_a^c = \tau_R^c = t_p = t_{s,p}$ .

При этом

$$\begin{aligned} Q_s^c &= Q_r^c + Q_c^c; \\ Q_r^c &= \alpha_r^c (\tau_{sur}^c - t_p) \varphi_R F_\Sigma; \\ Q_c^c &= \alpha_c^c (\tau_{sur}^c - t_p) F_\Sigma; \end{aligned} \quad (37)$$

где  $Q_s^c$ ,  $Q_r^c$  и  $Q_c^c$  - теплопотери животного: суммарные, лучистые, конвективные, Вт;  $\alpha_r^c$  и  $\alpha_c^c$  - коэффициенты теплоотдачи излучением и конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>°C;  $\tau_{sur}^c$  - температура поверхности животного, °C;  $\varphi_R$  - коэффициент облученности;  $F_\Sigma$  - площадь, м<sup>2</sup>.

2. Животное стоит в помещении с  $t_a$  и  $\tau_R$ , при этом  $t_a \neq \tau_R$ .

Тогда

$$\begin{aligned} Q_s^p &= Q_r^p + Q_c^p; \\ Q_r^p &= \alpha_r^p (\tau_{sur}^p - \tau_R) \varphi_R F_\Sigma; \\ Q_c^p &= \alpha_c^p (\tau_{sur}^p - t_a) F_\Sigma; \end{aligned} \quad (38)$$

где  $Q_s^p$ ,  $Q_r^p$ ,  $Q_c^p$ ,  $\alpha_r^p$ ,  $\alpha_c^p$ ,  $\tau_{sur}^p$  - те же зависимости, но для реального помещения.

Состояние животного одинаково и соответствует одному и тому же значению  $t_{s,p}$  (т.е.  $Q_s^c = Q_s^p$ ;  $\tau_{sur}^c = \tau_{sur}^p = \tau_{sur}$ ) и, следовательно, температурная обстановка равноценна. Тогда получим

$$t_p = \alpha_c^p t_a / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) + \alpha_r^p \tau_R / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) + [1 - (\alpha_r^p + \alpha_c^p) / (\alpha_r^c + \alpha_c^c)] \tau_{sur}; \quad (37)$$

Принято допущение  $\varphi_R = 1$ .

При этом оправдано допущение

$$\alpha_c^c = \alpha_c^p = \alpha_c; \quad (40)$$

$$\alpha_r^c = \alpha_r^p = \alpha_r; \quad (41)$$

Тогда

$$t_p = \alpha_c t_a / (\alpha_r + \alpha_c) + \alpha_r \tau_R / (\alpha_r + \alpha_c); \quad (42)$$

Результаты расчетов, выполненных, например, для овчарни, показаны в Таблица 3.

Таблица 3

**Расчетные величины тепловых коэффициентов А и В для овчарни**

Т <sub>р</sub> , °С	0	5	10	15	20	25
<b>А</b>	0,53	0,51	0,49	0,47	0,44	0,41
<b>В</b>	0,47	0,49	0,51	0,53	0,56	0,59

Оценка температуры в зонах размещения молодняка при локальном обогреве:

Если животное стоит:

Обычно применяют уравнения типа (33) в виде

$$t_{s,p} = At_a + B\tau_R + CE; \quad (38)$$

где  $C$  - коэффициент обогрева, °См<sup>2</sup>/Вт;  $E$  - тепловой поток от ИК излучателя, Вт/м<sup>2</sup>.

При этом принято пользоваться соотношением

$$C = k k_1; \quad (39)$$

где  $k \approx 1$  - опытный коэффициент;  $k_1$  - градуировочный коэффициент.

Применение коэффициента  $C=0,04$  м<sup>2</sup>°С/Вт обосновано недостаточно (а для некоторых видов животных - таких, например, как ягнята, цыплята, крольчата и др., такие исследования к настоящему времени практически отсутствуют).

В связи с этим  $C$  требует уточнения. С этой целью представляет интерес аналитическое определение  $k_1$  как функции нескольких переменных и сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными.

В опытах, описанных в [34], для измерения величины  $E$  был использован плоский термоэлемент конструкции ФГУП ВНИИТВЧ,

представляющий собой медь-константановую термопару диаметром 0,5 мм, припаянную снизу на зачерненную медную фольгу (квадрат 50×50 мм толщиной 0,5 мм). При измерении  $E$  термоэлемент был расположен в воздухе под инфракрасной лампой мощностью 250 Вт на уровне, соответствующем положению облучаемой поверхности тела животного. Измерения были проведены при комнатной температуре в условиях естественной конвекции воздуха.

Для определения  $k_1$  рассмотрим тепловой баланс указанной пластины (термоэлемента) при равномерном инфракрасном нагреве. Составляющие теплового баланса пластины показаны на рисунке 20.

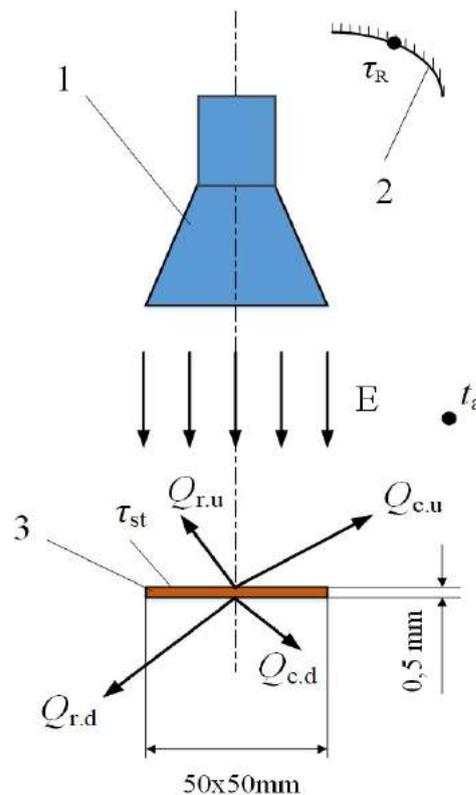


Рисунок 20. – Расчетная схема теплового баланса нагреваемого объекта  
1- источник ИК излучения; 2- внутренняя поверхность ограждающих конструкций помещения (фрагмент); 3- нагреваемая пластина

Примем, что термоэлемент, имеющий вид плоской металлической пластины площадью  $F=0,025 \text{ м}^2$  с пренебрежимо малой толщиной, имеет в установившемся режиме температуру  $\tau_{st}$ , °С, одинаковую по всему его объему. Теплоотдачей с торцов пластины пренебрегаем. Пластина

облучается с одной (верхней) стороны, а отвод теплоты в окружающую среду происходит с двух сторон (то есть теплоотдающая поверхность вдвое больше тепловоспринимающей). С учетом этого уравнение теплового баланса пластины уравнение имеет вид

$$aEF = Q_{r.u} + Q_{c.u} + Q_{r.d} + Q_{c.d}; \quad (40)$$

где  $a=1$  - коэффициент восприятия инфракрасного излучения зачерненной пластиной;  $Q_{r.u}$ ,  $Q_{c.u}$ ,  $Q_{r.d}$ ,  $Q_{c.d}$  - лучистая и конвективная теплоотдачи с верхней и нижней поверхности рассматриваемой пластины соответственно, Вт [5].

$$\begin{aligned} Q_{r.d} = Q_{r.u} &= \varepsilon_{pl} C_o [0,81 + 0,005(\tau_{st} + \tau_R)] \times (\tau_{st} - \tau_R) F; \\ Q_{c.u} &= 2,17(\tau_{st} - t_a + 60V_a^2/l_{pl})^{1/3} (\tau_{st} - t_a) F; \\ Q_{c.d} &= 1,16(\tau_{st} - t_a + 60V_a^2/l_{pl})^{1/3} (\tau_{st} - t_a) F; \end{aligned} \quad (46)$$

где  $\varepsilon_{pl} \approx 1$  - приведенный коэффициент излучения поверхности облучаемого тела и внутренних поверхностей ограждающих конструкций в помещении;  $l_{pl} = 0,05$  м - характерный размер поверхности пластины.

Обозначим

$$\Delta\tau_1 = ak_1 E; \quad (41)$$

где  $\Delta\tau_1$  - приращение температуры пластины от действия инфракрасного излучения, °С.

Для упрощения расчетов примем

$$\tau_R = t_a; \quad (42)$$

Тогда

$$\tau_{st} - \tau_R = \tau_{st} - t_a = \Delta\tau_1; \quad (49)$$

Решая совместно (45) ... (37) с учетом (49), имеем выражение

$$k_1 = [2\varepsilon_{pl} C_o (0,81 + 0,005\Delta\tau_1) + 3,33(\Delta\tau_1 + 60V_a^2/l_{pl})^{1/3}]^{-1}; \quad (43)$$

На рисунке 21 показана полученная в результате расчетов по (50) зависимость  $k_1 = f(\Delta\tau_1; V_a)$ .

Для реально возможных значений  $\Delta\tau_1$  и  $V_b$  в условиях животноводческих и птицеводческих помещений с молодняком получена область между кривыми, соответствующими  $V_a=0$  и  $V_a=0,2$  м/с. Здесь же приведена прямая, соответствующая  $k_1=0,04$  м<sup>2</sup>С/Вт (усредненные экспериментальные данные).

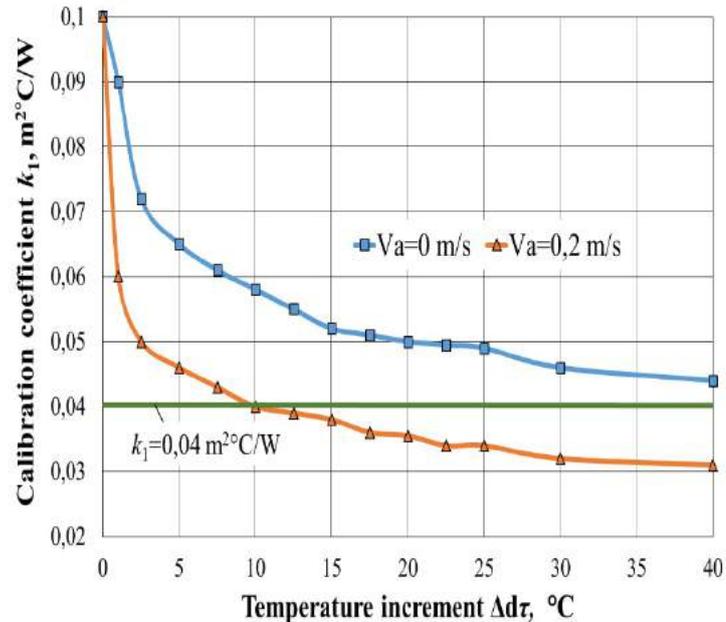


Рисунок 21. – Зависимость величины градуировочного коэффициента  $k_1$  от  $\Delta\tau$ :

Как видно из рисунка 21, аппроксимация опытных данных  $k_1$  прямой  $k_1=0,04$  м<sup>2</sup>С/Вт достаточно хорошо согласуется с расчетными данными при  $V_a=0,2$  м/с и  $15^\circ\text{C} > \Delta\tau_1 > 8^\circ\text{C}$ . При меньших значениях  $V_a$  и  $\Delta\tau_1$  использование в расчетах значения  $k_1=0,04$  м<sup>2</sup>С/Вт может привести к ощутимым погрешностям.

Значения составляющих (43) определим в соответствии с (20).

В соответствии с (37) рассмотрим 2 случая:

1. ТАС=τRC=TP=TS.P.

Тогда

$$\begin{aligned}
 Q_s^c &= Q_r^c + Q_c^c; \\
 Q_r^c &= \alpha_r^c (\tau_{sur}^c - t_p) (F_{sh} + F_{cr}) \varphi_R; \\
 Q_c^c &= \alpha_c^c (\tau_{sur}^c - t_p) (F_{sh} + F_{cr});
 \end{aligned}
 \tag{44}$$

2.  $t_a$  и  $\tau_R$ , причем  $t_a \neq \tau_R$ .

$$\begin{aligned}
 Q_s^p &= Q_r^p + Q_c^p + Q_{r.sh}^p + Q_{c.sh}^p - \Delta Q_{RAD}; \\
 Q_r^p &= \alpha_r^p (\tau_{sur}^p - \tau_R) F_{cr} \varphi_R; \\
 Q_c^p &= \alpha_c^p (\tau_{sur}^p - t_a) F_{cr}; \\
 Q_{r.sh}^p &= \alpha_{r.sh}^p (\tau_{sur.sh}^p - \tau_R) F_{sh} \varphi_R; \\
 Q_{c.sh}^p &= \alpha_{c.sh}^p (\tau_{sur.sh}^p - t_a) F_{sh}; \\
 \Delta Q_{RAD} &= F_{ps} a_{sur} E;
 \end{aligned} \tag{45}$$

где  $Q_s^p$  - явные тепловыделения, Вт;  $Q_r^p$  и  $Q_c^p$  - лучистая и конвективная теплоотдача с  $F_{cr}$ , Вт;  $Q_{r.sh}^p$  и  $Q_{c.sh}^p$  - то же с необлучаемой поверхности  $F_{sh}$ , Вт;  $\alpha_r^p$  и  $\alpha_c^p$  - коэффициенты лучистой и конвективной теплоотдачи с облучаемой поверхности  $F_{cr}$ , Вт/м<sup>2</sup>°C;  $\alpha_{r.sh}^p$  и  $\alpha_{c.sh}^p$  - то же с необлучаемой поверхности  $F_{sh}$ , Вт/м<sup>2</sup>°C;  $\tau_{sur}^p$  - температура поверхности животного для  $F_{cr}$ , °C;  $\tau_{sur.sh}^p$  - то же для  $F_{sh}$ , °C;  $F_{ps}$  - площадь животного, воспринимаемая ИК излучение от в данном случае локального обогревателя;  $a_{sur}$  - коэффициент поглощения излучения.

Если тепловые условия одинаковы, то

$$Q_s^c = Q_s^p; \tag{46}$$

Решая (51) ... (53) относительно  $t_p = t_{s,p}$ , при  $\varphi_R = 1$  получим

$$\begin{aligned}
 t_{s,p} &= (\alpha_c^p F_{cr} + \alpha_{c.sh}^p F_{sh}) t_a / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh}) + (\alpha_r^p F_{cr} + \alpha_{r.sh}^p F_{sh}) \tau_R / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) \\
 &+ (F_{cr} + F_{sh}) + a_{sur} F_{ps} E / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh}) + [\tau_{sur}^c - (\alpha_r^p + \alpha_c^p) F_{cr} \tau_{sur}^p / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) \\
 &+ (F_{cr} + F_{sh}) - (\alpha_{r.sh}^p + \alpha_{c.sh}^p) F_{sh} \tau_{sur.sh}^p / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh})];
 \end{aligned} \tag{47}$$

Допустим по аналогии с (40) и (41)

$$\alpha_r^p = \alpha_{r.sh}^p = \alpha_r^c = \alpha_r; \tag{48}$$

$$\alpha_c^p = \alpha_{c.sh}^p = \alpha_c^c = \alpha_c; \tag{49}$$

а животное обогреваем в пространстве ( $F_\Sigma = F_{cr} + F_{sh} = F_{ps}$ ), то

$$\tau_{sur.sh}^p = \tau_{sur}^p = \tau_{sur}^c; \tag{57}$$

то

$$t_{s,p} = \alpha_c t_a / (\alpha_r + \alpha_c) + \alpha_r \tau_R / (\alpha_r + \alpha_c) + a_{sur} E / (\alpha_r + \alpha_c); \tag{50}$$

$$C = a_{sur}(\alpha_r + \alpha_c)^{-1}; \quad (51)$$

Обозначим для упрощения

$$1/(\alpha_r + \alpha_c) = \xi; \quad (52)$$

Тогда формула (59) предстанет в виде

$$C = \xi a_{sur}; \quad (53)$$

Аппроксимируем тепловую характеристику животного прямыми, соответствующими его теплоотдаче (Рисунок 22).

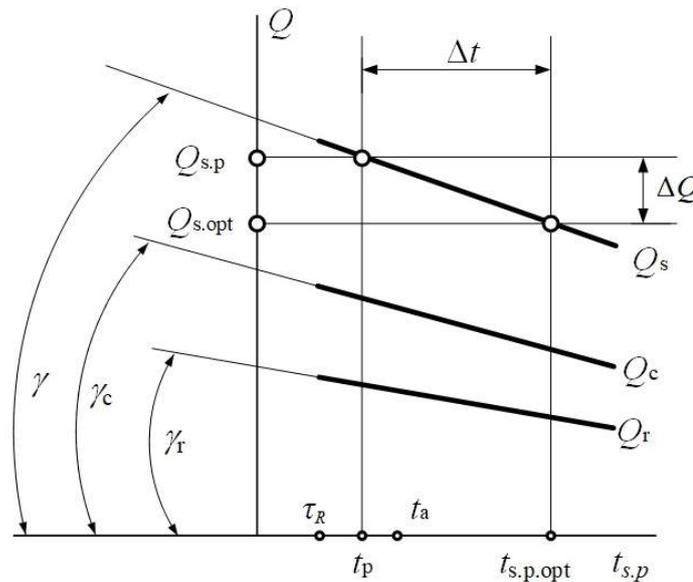


Рисунок 22. – Расчетная схема для определения коэффициента  $\xi$ .

В (52, 54) показано, что

$$tg\gamma_r = \alpha_r; \quad tg\gamma_c = \alpha_c; \quad (54)$$

Из рисунка 22 и уравнения (62) следует, что

$$tg\gamma = tg\gamma_r + tg\gamma_c = \alpha_r + \alpha_c; \quad (63)$$

Рассмотрим участок прямой  $Q_s$  (Рисунок 22). Животное находится в помещении с некоторой  $t_p$ , которую можно определить согласно (33) исходя из известных  $t_a$  и  $\tau_R$ . При этом животное выделяет определенное количество явной теплоты  $Q_{s,p}$ . Пусть в этих условиях требуется создать животному некоторые оптимальные тепловые условия с  $t_{s,p,opt}$ , которым соответствует  $Q_{s,opt}$ . Увеличению  $t_{s,p}$  на  $\Delta t$  (от  $t_p$  до  $t_{s,p,opt}$ ) соответствует

уменьшение  $Q_s$  на  $\Delta Q$  (от  $Q_{s,p}$  до  $Q_{s,opt}$ ):

$$\Delta t = \xi_l \Delta Q; \quad (55)$$

где  $\xi_l$  - коэффициент соответствия, °C/Вт.

Можно, согласно (64) и рис. 22, отметить, что

$$\xi_l = \Delta t / \Delta Q = ctg \gamma; \quad (56)$$

Тогда

$$\xi_l = 1 / (\alpha_r + \alpha_c); \quad (57)$$

При обогреве инфракрасным облучателем, когда  $F_\Sigma \neq F_{ps}$ , уравнения (43) и (58) примут вид

$$t_{s,p} = At_a + B\tau_R + CEF_{ps} / F_{om\delta}; \quad (58)$$

$$t_{s,p} = \alpha_c t_a / (\alpha_r + \alpha_c) + \alpha_r \tau_R / (\alpha_r + \alpha_c) + \xi a_{sur} EF_{cr} / F_\Sigma; \quad (59)$$

Требуемую величину  $E$  найдем из (67) или (68) как

$$E = (t_{s,p} - At_a - B\tau_R) / (\xi a_{sur} F_{cr} / F_\Sigma); \quad (60)$$

Расчет для лежащего животного

1. Животное стоит в климатической камере с  $t_a^c = \tau_R^c = t_p = t_{s,p}$ . Его тепловой баланс можно описать системой уравнений (51).

2. Животное лежит в помещении с  $\tau_f$ ,  $t_a$  и  $\tau_R$ , причем  $\tau_f \neq t_a \neq \tau_R$ . Обогрев идет сверху ИК облучателем, при этом имеем некоторое значение  $E$ . От ИК облучателя животное получает теплоту  $\Delta Q_{RAD}$ . Температура в месте контакта с грунтом  $\tau_{af}$  (Рисунок 23).

$$Q_s^p = Q_r^p + Q_c^p + Q_t^p - \Delta Q_{RAD};$$

$$Q_r^p = \alpha_r^p (\tau_p^p - \tau_R) F_{cr} \Phi_R;$$

$$Q_c^p = \alpha_c^p (\tau_{sur}^p - t_a) F_{cr};$$

$$Q_t^p = (\tau_{af} - \tau_f) F_{sh} / R_f;$$

$$\Delta Q_{RAD} = F_{ps} a_{sur} E; \quad (61)$$

где  $R_f$  - сопротивление теплопередаче пола, м<sup>2</sup>°C/Вт.

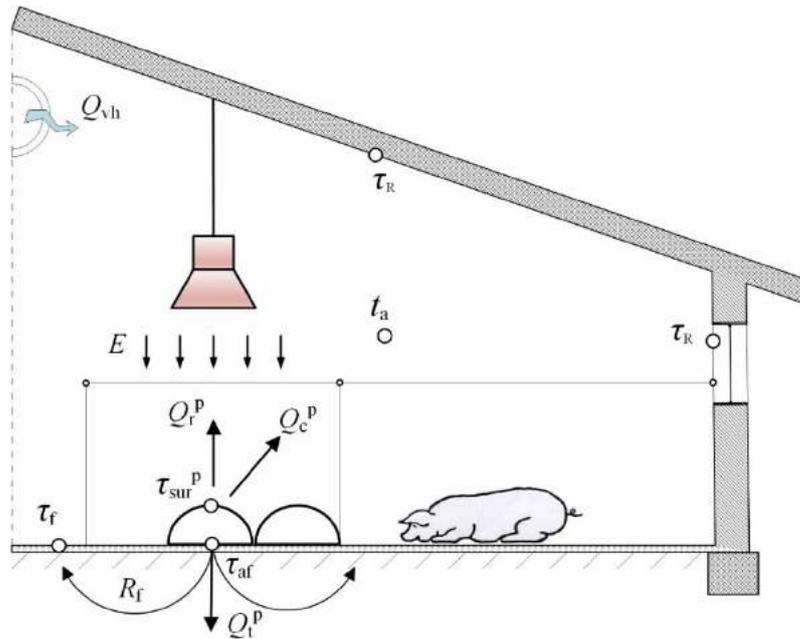


Рисунок 23. – Тепловой баланс для определения  $t_{o.n}$  лежащего животного в помещении (на примере свиарника-маточника)

Решая совместно (51), (53), (70) относительно  $t_p=t_{s,p}$ , при  $\varphi_R=1$  получим

$$\begin{aligned}
 t_{s,p} = & \alpha_c^p F_{cr} t_a / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh}) + \alpha_r^p F_{cr} \tau_R / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh}) + \\
 & + a_{sur} F_{ps} E / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh}) + F_{sh} \tau_f / R_f (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh}) + \\
 & + [\tau_{sur}^c - (\alpha_r^p + \alpha_c^p) F_{cr} \tau_{sur}^p / (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh}) - F_{sh} \tau_{af} / R_f (\alpha_r^c + \alpha_c^c) (F_{cr} + F_{sh})]; \quad (62)
 \end{aligned}$$

Для лежащего животного (когда  $F_{sh} \neq 0$ ) можно, приняв изложенные допущения представить (58) как

$$\begin{aligned}
 t_{s,p} = & A F_{cr} t_a / (F_{cr} + F_{sh}) + B F_{cr} \tau_R / (F_{cr} + F_{sh}) + C F_{cr} E / (F_{cr} + F_{sh}) + \\
 & + D F_{sh} \tau_f / (F_{cr} + F_{sh}); \quad (63)
 \end{aligned}$$

Здесь  $A$  и  $B$  можно определить согласно (35), (36). Величину  $C$  найдем из (29), а  $D = (R_f)^{-1} \xi$ .

Таким образом, уравнения (39), (54), (71) и (72) получены на основании решения систем уравнений, описывающих тепловой баланс животного при теплообмене его с окружающей средой при внешнем тепловом воздействии, и поэтому являются достаточно строгим выражением температуры  $t_{s,p}$ , ощущаемой животным.

Обоснованы зависимости основных тепловых характеристик животных

как функций температуры помещения.

Определен один из основных показателей теплового состояния животных – температура его поверхности теплообмена. Этот показатель необходим для использования при разработке методики выбора требуемых параметров локальных обогревателей. При его изменении путем внешнего воздействия ИК-излучением можно влиять на тепловое состояние животного.