

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПОРОСЯТ-СОСУНОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ОБОГРЕВЕ

М.А. Прищепов,

зав. каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

Ю.Н. Селюк,

ст. преподаватель каф. практической подготовки студентов БГАТУ

Е.М. Прищепова,

доцент каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

И.Г. Рутковский,

ст. преподаватель каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, канд. техн. наук

В статье предложена двумерная в полном пространстве теплофизическая модель теплообмена поросенка при комбинированном обогреве, на основании которой разработаны математическая модель и алгоритм ее исследования, позволяющие рассчитывать характерные параметры процесса обогрева.

Ключевые слова: теплообмен поросят-сосунов, комбинированный обогрев, математическая модель.

The paper proposes a two-dimensional thermophysical model of piglet heat exchange at combined heating in the floor space, on the basis of which a mathematical model and an algorithm for its study are developed, allowing to calculate characteristic parameters of the heating process.

Key words: suckling piglet heat exchange, combined heating, mathematical model.

Введение

Согласно научно обоснованным нормам, ежегодное потребление мясных продуктов должно составлять не менее 52 кг на душу взрослого населения. Как свидетельствует практика развитых стран, эту задачу в значительной мере позволяет решить свиноводство, благодаря биологическим особенностям свиней (многоплодие, скороспелость, всеядность и высокий выход съедобной части туши), что позволяет быстро наращивать производство качественного мяса. Поэтому в мировом производстве мяса свинина занимает первое место, удельный вес ее составляет более 43 % (курятина – 29,5 %, говядина – 23,5 %, другие виды – 4 %). По прогнозу FAO, рост потребления свинины до 2030 года составит около 6 %, несмотря на имеющуюся вспышку африканской чумы [1].

Этому в значительной мере способствует многоплодие и скороспелость свиней. В европейских странах на одну свиноматку получают до 30 поросят в год. Требования к условиям содержания поросят, в отличие от взрослых особей, имеют свои специфические особенности.

Поросята рождаются самыми незрелыми по сравнению с другими сельскохозяйственными животными. У них практически отсутствует подкожный жировой слой и волосяной покров, вследствие чего они практически не способны обеспечивать надлежащую терморегуляцию и сохранять образующуюся при обменных процессах теплоту. К тому же, теплоотдача у молодняка на единицу живой массы значи-

тельно больше, чем у взрослых животных, так как они имеют большую поверхность тела на единицу массы. После рождения в течение 2...3, иногда 4...7 дней, поросята, как правило, теряют 5...7 % живой массы за счет дегидратации организма [2]. Температура их тела удерживается на должном уровне благодаря терморегуляции, представляющей собой результат сложных процессов регулирования, управляющих как теплопродукцией (воздействие на процессы образования теплоты в организме), так и теплоотдачей в окружающую среду. Незрелость терморегуляционных процессов поросят раннего возраста, особенно в первые десять дней жизни, является одной из основных причин снижения их естественной резистентности (способности организма противостоять неблагоприятному воздействию факторов внешней среды). Поэтому на данный период приходится около 80 % отхода молодняка, третья часть которого связана с простудными заболеваниями. При этом резистентность организма не является постоянной величиной, а зависит от экологических условий, ослабевая при сильном переохлаждении и недостаточном питании.

Следовательно, для обеспечения высокой сохранности поросят-сосунов необходимо в помещениях их содержания обеспечивать нормируемую вентиляцию и температуру воздуха. Для обеспечения достаточного питания поросят-сосунов необходимо также поддерживать комфортную температуру для подсосных свиноматок, которая по данным [3, 4] составляет 13 °С, в то время как для супоросных свиноматок эта температура составляет 22 °С. Такая разни-

ца в температурах для супоросных и подсосных свиноматок объясняется тем, что подсосные свиноматки выделяют дополнительное количество теплоты при продуцировании молока. Если подсосную свиноматку содержать в период кормления поросят-сосунов при более высокой температуре, то она снизит потребление корма и, соответственно, продуцирование молока, что в конечном итоге приведет к недокорму поросят-сосунов, снижению их резистентности и роста. С другой стороны, снижение температуры ниже зоны комфорта приведет к повышению расхода корма для свиноматок, обусловленному необходимостью выработки тепла для их согревания.

Таким образом, при обеспечении температуры воздуха в свиарнике-маточнике возникает техническое противоречие. Температуру воздуха в помещении для свиноматок необходимо поддерживать в пределах 11...13 °С – нижний критический предел [5], 22 °С – верхний предел [6], а для поросят-сосунов – 35...20 °С в зависимости от возраста [7-9]. В этой связи, очевидно, что для обеспечения комфортного температурного режима для подсосных свиноматок и поросят-сосунов, необходимо использовать две системы обогрева – общую и локальную. При этом система локального обогрева должна быть комбинированной, т.е. обеспечивать снижение потерь теплоты от свободных участков тела животного и от контактирующих с напольным обогревателем.

Цель работы – разработать математическую модель теплообмена поросят-сосунов при комбинированном обогреве, а также алгоритм ее исследования.

Основная часть

Известно, что с точки зрения теплотехники биологические системы подчиняются тем же общим законам, что и неживые [10]. Принципиальное отличие животного организма от однородного твердого тела состоит в том, что внутренняя теплопередача в живом теле обеспечивается, главным образом, циркулирующими жидкостями, что осложняет сравнительные аналогии. Однако моделирование теплообмена животного, когда его тепловыделения находятся на некотором оптимальном уровне, т.е. обеспечены комфортные или близкие к ним условия температуры окружающего воздуха и организм животного не испытывает каких-либо существенных напряжений функций терморегуляции, то можно считать, что передача теплоты от внутренних органов («ядра») к поверхности тела («оболочки») и последующая отдача ее в окружающую среду происходят только по законам теплопередачи.

Необходимо отметить, что не все участки поверхности животного имеют одинаковую температуру [11]. При исследованиях явной теплоотдачи организма человека установлено, что для упрощения выкладок целесообразно ввести понятие усредненной по площади температуры наружной поверхности тела [12]. На основании этого введем температуру поверхности кожного покрова поросенка Θ_k , отражающую средневзвешенную температуру поверхности теплообмена. За показатель внутренней температуры тела («ядра») Θ_j физиологи обычно принимают ректаль-

ную температуру, которая наилучшим образом отражает среднюю температуру организма [13, 14].

В реальности поверхность теплообмена поросенка с комбинированным обогревателем имеет весьма сложную геометрическую форму, что значительно осложняет решение задачи. Для упрощения решения осуществляют замену формы животного эквивалентным по площади цилиндром с усеченной боковой поверхностью, контактирующей с напольным обогревателем.

Тогда цилиндр («ядро») радиусом r_T и длиной l_T со средним термическим коэффициентом сопротивления теплоизолирующего слоя ρ_T («оболочкой») толщиной $\delta_{об}$ усеченной боковой поверхностью контактирует с напольным обогревателем, который можно представить в виде многослойной панели (плиты), состоящей из отдельных корпусно-изоляционных слоев, с равномерно распределенным по поверхности источником теплоты мощностью $P_{пан}$.

На расстоянии H от плиты расположен точечный ИК-излучатель, который условно можно представить в виде диска диаметром $d_{изл}$, расположенного своей наибольшей плоскостью параллельно напольному обогревателю. Для направленного действия лучистого потока имеется отражатель, степень черноты которого стремится к нулю.

Теплоотдача поверхности цилиндра (поросенка) осуществляется за счет конвекции Q_k , излучения $Q_{пл}$ (свободной поверхностью) и теплопроводности Q_T (поверхности, контактирующей с панелью) (рис. 1).

В общем случае при теплообмене организма поросенка с окружающей средой имеет место также теплоотдача испарением. Однако при создании условий для физиологически необходимой теплоотдачи в явном виде (Q_k , $Q_{пл}$, Q_T) роль потоотделения будет незначительной, а теплоту, расходуемую на испарение влаги, можно будет считать величиной постоянной [15]. Теплотери испарением не меняются и при создании одних и тех же температурных условий различными способами обогрева, например, при переходе с конвективного способа обогрева на конвективно-лучистый [16]. Кроме этого, при таком теплообмене суммарная теплоотдача испарением составляет менее 4 % теплопродукции организма [17-19], поэтому в инженерных расчетах ею можно пренебречь.

Теплоотдача со свободной поверхности напольной панели и ИК-излучателя мощностью $P_{изл}$ осуществляется путем конвекции и излучения. При этом лучистая составляющая теплового потока ИК-излучателя направлена на свободную поверхность цилиндра (поросенка) $Q_{икл \rightarrow жив}$ и напольной панели $Q_{икл \rightarrow п}$, а конвективный тепловой поток, нагревая внутреннюю поверхность отражателя, проходит через отражатель $Q_{отр}$ и рассеивается с наружной поверхности в окружающую среду путем конвекции и излучения.

Как отмечалось выше, для поддержания необходимой температуры тела поросенка должно быть равновесие между образовавшейся теплотой в организме и поступившей извне, с одной стороны, и рассеиваемой теплотой в окружающую среду – с другой стороны. При этом через поверхностные слои тела поросенка («оболочку») проходит один и тот же тепловой поток

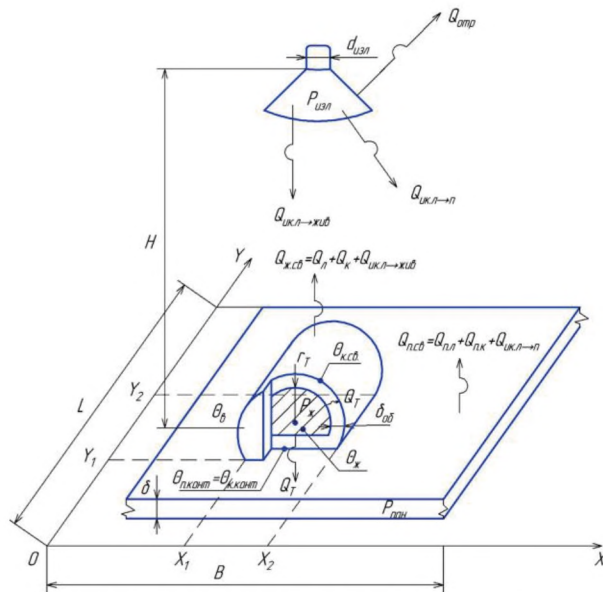


Рисунок 1. Теплофизическая модель теплообмена поросенка при комбинированном обогреве

$$Q_{ж} = Q^T = Q_{л} + Q_{к} + Q_{т}, \quad (1)$$

где Q^T – теплота, поступающая теплопроводностью от «ядра» поросенка к поверхности его кожного покрова, участвующего в теплообмене, Вт.

В общем виде Q^T можно описать уравнением передачи теплоты через стенку:

$$Q^T = \frac{1}{R_{пов}} \cdot (\Theta_{ж} - \Theta_{к}) \cdot F_{ж}, \quad (2)$$

где $R_{пов}$ – термическое сопротивление теплопередаче «оболочки» тела поросенка, зависящее от толщины кожи и подкожного жирового слоя, ($m^2 \cdot ^\circ C / W$);

$\Theta_{ж}$ – температура «ядра» тела животного, $^\circ C$;

$\Theta_{к}$ – температура на теплоотдающей поверхности кожного покрова животного, $^\circ C$.

Тогда, согласно принятой теплофизической модели (рис. 1), у поросенка в конвективном и лучистом теплообмене будет участвовать лишь свободная часть поверхности тела $F_{ж,св}$, которая составляет 0,8 общей площади [20], а в кондуктивном теплообмене с напольным обогревателем – оставшаяся часть, т. е. $F_{ж,конт} = 0,2 \cdot F_{ж}$. Общая площадь поверхности тела поросенка зависит от его массы $P_{п}$ и находится по следующей формуле [20]:

$$F_{ж} = 0,092 \cdot P_{п}^{2/3}. \quad (3)$$

Массу поросенка можно вычислить исходя из его возраста в подсосный период по формуле, полученной по данным источника [21]:

$$P_{п} = 0,9 + 0,175 \cdot \tau, \quad (4)$$

где τ – возраст поросенка от начала рождения, дн.

Длину тела животного $L_{п}$ по оси Y напольного обогревателя можно также вычислить исходя из его возраста по формуле, полученной по данным источника [21]:

$$L_{п} = 22,3 + 0,69 \cdot \tau, \quad (5)$$

при этом согласно рисунку 1, $L_{п} = Y_2 - Y_1$.

Ширину зоны контакта тела поросенка с напольным обогревателем $B_{п}$ по оси X можно вычислить из площади зоны контакта

$$B_{п} = (0,2 \cdot F_{ж}) / L_{п}, \quad (6)$$

при этом согласно рисунку 1, $B_{п} = X_2 - X_1$.

В процессе теплоотдачи со свободной поверхности тела животного наиболее важное место занимает $Q_{л}$, значение которой можно определить по формуле:

$$Q_{л} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{\Theta_{к,св} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\Theta_{в} + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{ж,св}, \quad (7)$$

где ε – степень черноты поверхности кожного покрова тела поросенка (согласно [22], примем $\varepsilon=0,95$);

$C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K^4)$ – излучение абсолютно черного тела;

$\Theta_{к,св}$ – температура кожного покрова свободной поверхности тела, $^\circ C$;

$\Theta_{в}$ – температура окружающего воздуха, $^\circ C$.

Конвективный теплообмен свободной поверхности тела животного имеет место в силу разницы температур $\Theta_{к,св}$ и $\Theta_{в}$, при этом $Q_{к}$ определяется по формуле:

$$Q_{к} = \alpha_{к} \cdot (\Theta_{к,св} - \Theta_{в}) \cdot F_{ж,св}, \quad (8)$$

где $\alpha_{к}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности кожного покрова, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

Определение $\alpha_{к}$ животного является непростой задачей, зависящей от многих факторов, поэтому при инженерных расчетах $\alpha_{к}$ для животных широко используется зависимость, применяемая при определении конвективных теплопотерь одетым человеком [23]

$$\alpha_{к} = \beta \cdot \beta_1 \cdot \sqrt[4]{\Theta_{од} - \Theta_{в}}, \quad (9)$$

где $\Theta_{од}$ – температура поверхности одежды, $^\circ C$;

β, β_1 – коэффициенты, зависящие от материала теплоотдающей поверхности, ее формы и расположения в пространстве.

При определении $\alpha_{к}$ для поросенка К.Ю. Муринас [24] установил значение $\beta \cdot \beta_1 = 2,5$. Тогда с учетом этого формула для определения $\alpha_{к}$ со свободной поверхности тела поросенка примет следующий вид:

$$\alpha_{к} = 2,5 \cdot \sqrt[4]{\Theta_{к,св} - \Theta_{в}}. \quad (10)$$

Составляющие $Q_{л}$ и $Q_{к}$ уравнения (1) определяют теплопотери организма животного со свободной поверхности тела, которая в представленной теплофизической модели подвергается ИК-облучению, при этом будем считать, что вся поверхность лежащего поросенка, участвующая в лучистом и конвективном теплообмене с окружающей средой, равномерно воспринимает лучистый тепловой поток ИК-излучателя.

В связи с этим и с учетом (2) условие теплового баланса свободной поверхности тела животного в установившемся режиме будет иметь вид:

$$Q_{ж,св} = (1/R_{пов}) \cdot (\Theta_{ж} - \Theta_{к,св}) \cdot F_{ж,св} = Q_{л} + Q_{к} + Q_{ик,л \rightarrow жив}, \quad (11)$$

где $Q_{ик,л \rightarrow жив}$ – лучистый тепловой поток ИК-излучателя, падающий на животное, Вт.

Для определения $Q_{ик,л \rightarrow жив}$ воспользуемся выражением для расчета результирующего потока излучения при теплообмене между двумя телами, произвольно расположенными в пространстве [25]

$$Q_{1,2} = \frac{C_0 \cdot \bar{\varphi}_{1,2} \cdot F_1 \cdot \left[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4 \right]}{1 + \bar{\varphi}_{1,2} \cdot ((1/\varepsilon_1) - 1) + \bar{\varphi}_{2,1} \cdot ((1/\varepsilon_2) - 1)}, \quad (12)$$

где $\bar{\varphi}_{1,2}, \bar{\varphi}_{2,1}$ – средние угловые коэффициенты излучения, характеризующие долю энергии, которая попа-

дает с тела, имеющего конечную площадь поверхности, соответственно, F_1 или F_2 , на другое тело с конечной площадью поверхности, соответственно F_2 или F_1 , по отношению к полному потоку собственного излучения;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – коэффициенты поглощения тел с площадью, соответственно, F_1 и F_2 ;

T_1, T_2 – абсолютная температура этих тел, соответственно, °К.

Значения угловых коэффициентов излучения в общем случае, согласно [25], определяются интегрированием элементарных угловых коэффициентов излучения.

Однако, учитывая вышеприведенные допущения о том, что вся поверхность поросенка, участвующая в лучистом теплообмене, равномерно воспринимает лучистый тепловой поток ИК-излучателя, с достаточной для инженерных расчетов степенью точности можно принять:

$$\begin{cases} \varphi_{1,2} = \frac{F_2}{\pi} \cdot h_{cp}^2; \\ \varphi_{2,1} = \frac{F_1}{\pi} \cdot h_{cp}^2, \end{cases} \quad (13)$$

где h_{cp} – среднее расстояние между взаимоблучающимися поверхностями, м.

Вполне очевидно, что при решении уравнения теплового баланса свободной поверхности тела животного следует исходить из необходимости определения температуры на свободной поверхности кожного покрова

$$\Theta_{к.св} = \Theta_{жк} - (R_{пов} / F_{жк.св}) \times \\ \times [Q_{л}(\Theta_{к.св}) + Q_{к}(\Theta_{к.св}) + Q_{ик.л \rightarrow жив.}(\Theta_{к.св})]. \quad (15)$$

Поскольку представленное уравнение, полученное путем преобразования уравнения (11), нелинейное, то для его решения можно воспользоваться методом приближений, например, методом простых итераций. При этом, задавая начальное значение температуры $\Theta_{к.св}$ и используя уравнение (15), находят ее расчетное значение, после чего сравнивают заданное значение с расчетным, и в случае их неравенства рассчитывают новое приближение, принимая предыдущее расчетное значение в качестве задаваемого, и так до тех пор, пока они не совпадут.

Что касается теплообмена поросенка в зоне, контактирующей с напольным обогревателем, то здесь, как отмечалось ранее, имеет место кондуктивная составляющая теплового баланса, величина которой зависит только от температуры поверхности кожного покрова в контактной зоне $\Theta_{п.конт}$, равной температуре напольного обогревателя в этой же зоне. При этом значение $Q_{т}$ определяется тепловым потоком, прошедшим от внутренних частей тела («ядра») через наружные слои («оболочку»), контактирующие с напольным обогревателем, при наличии разности температур между внутренней температурой тела животного $\Theta_{ж}$ и температурой контактной поверхности теплообмена $\Theta_{к.конт}$

$$Q_{т} = (1/R_{пов}) \cdot (\Theta_{ж} - \Theta_{к.конт}) \cdot F_{жк.конт}, \quad (16)$$

где $\Theta_{к.конт}$ – средняя температура кожного покрова в контактной зоне, °С.

Таким образом, при решении данного уравнения следует исходить из необходимости определения тем-

пературы на контактной поверхности кожного покрова $\Theta_{к.конт}$, соответствующей температуре напольного обогревателя в этой же зоне $\Theta_{п.конт}$.

Однако определение $\Theta_{п.конт}$ является достаточно сложной теплофизической задачей, решение которой зависит от многих факторов. Известны попытки решения подобной задачи методом электрического моделирования системы «птица – напольный обогреватель» [26] и методом гидравлических аналогий – для поросят [27]. Эти способы так же, как и способы определения кондуктивных теплопотерь поросенком [24, 28, 29], не имеют достаточно серьезного обоснования и могут быть использованы лишь для ориентировочных расчетов. В этих исследованиях неадекватно отражается сложный характер распределения температурного поля обогревателя в контактной зоне, так как расчеты выполнены с некоторыми весьма серьезными допущениями. В частности, принято, что коэффициент теплопроводности вдоль теплоотдающей поверхности напольной панели равен нулю, удельный тепловой поток на ее теплоотдающей поверхности постоянный.

Несколько иные допущения были сделаны в работе [30] при попытке решения задачи теплообмена поросенка с комбинированным обогревателем методом электротепловой аналогии на основании формального совпадения законов Фурье: $q = -\lambda \cdot grad \theta$; Стефана-Больцмана: $q = -\alpha_{л} \cdot grad \theta$; Ньютона: $q = -\alpha_{к} \cdot grad \theta$ с законом Ома: $I = -(1/\rho) \cdot grad \varphi$. При этом коэффициент теплопроводности вдоль теплоотдающей поверхности панели был принят равным бесконечности. В связи с этим панель по всей площади имела одинаковую температуру $\Theta_{п}$.

Сопоставление результатов расчета, полученных при исследовании указанной модели, с экспериментальными данными показало, что принятые допущения существенно влияют на моделируемый процесс, приводят к низкой адекватности его модели, и с точки зрения расчета теплового баланса организма поросенка, неприемлемы.

Таким образом, из анализа указанных выше работ [26-30] очевидно, что уравнения, описывающие теплообмен животного с напольным обогревателем, должны учитывать конечную величину коэффициента теплопроводности λ напольного обогревателя вдоль его теплоотдающей поверхности, а также температурный коэффициент α_0 резистивного нагревателя напольной панели.

В работе [9] при моделировании процесса теплообмена поросенка с напольной панелью при комбинированном обогреве эти допущения учтены, но моделирование проведено в одномерном пространстве, что снижает адекватность моделирования. Для повышения адекватности моделирования опишем процесс теплообмена поросенка с панелью в двумерном пространстве. Тогда в двумерном измерении стационарное температурное поле напольного обогревателя при питании его резистивного нагревателя от источника постоянного напряжения можно описать следующим дифференциальным уравнением второго порядка в частных производных:

$$\lambda \delta \frac{\partial^2 \Theta_{\text{п}}}{\partial X^2} + \lambda \delta \frac{\partial^2 \Theta_{\text{п}}}{\partial Y^2} + q_{\text{в.п}} + q_{\text{ж.конт}} + q_{\text{п.к}}^{\text{н}} + q_{\text{п.л}}^{\text{н}} = 0. \quad (17)$$

при $X_1 \leq X \leq X_2$ и $Y_1 \leq Y \leq Y_2$;

$$\lambda \delta \frac{\partial^2 \Theta_{\text{п}}}{\partial X^2} + \lambda \delta \frac{\partial^2 \Theta_{\text{п}}}{\partial Y^2} + q_{\text{в.п}} + q_{\text{икл} \rightarrow \text{п}} - q_{\text{п.к}}^{\text{в}} - q_{\text{п.к}}^{\text{н}} - q_{\text{п.л}}^{\text{в}} -$$

$$- q_{\text{п.л}}^{\text{н}} = 0. \quad (18)$$

при $0 \leq X \leq X_1$ и $X_2 \leq X \leq B$ и $0 \leq Y \leq Y_1$ и $Y_2 \leq Y \leq L$,

$$c \rho \delta \frac{\partial \Theta_{\text{п}}}{\partial \tau} = \lambda \delta \frac{\partial^2 \Theta_{\text{п}}}{\partial X^2} + \lambda \delta \frac{\partial^2 \Theta_{\text{п}}}{\partial Y^2} + q_{\text{в.п}} + q_{\text{ж.конт}} - q_{\text{п.к}}^{\text{н}} - q_{\text{п.л}}^{\text{н}}. \quad (19)$$

при $X_1 \leq X \leq X_2$ и $Y_1 \leq Y \leq Y_2$;

$$c \rho \delta \frac{\partial \Theta_{\text{п}}}{\partial \tau} = \lambda \delta \frac{\partial^2 \Theta_{\text{п}}}{\partial X^2} + \lambda \delta \frac{\partial^2 \Theta_{\text{п}}}{\partial Y^2} + q_{\text{в.п}} + q_{\text{икл} \rightarrow \text{п}} - q_{\text{п.к}}^{\text{в}} - q_{\text{п.к}}^{\text{н}} -$$

$$- q_{\text{п.л}}^{\text{в}} - q_{\text{п.л}}^{\text{н}}. \quad (20)$$

при $0 \leq X \leq X_1$ и $X_2 \leq X \leq B$ и $0 \leq Y \leq Y_1$ и $Y_2 \leq Y \leq L$.

где δ – толщина напольного обогревателя, м;
 $X_2 - X_1 = B_{\text{п}}$ – ширина контакта животного с напольным обогревателем вдоль координаты X , м;
 $Y_2 - Y_1 = L_{\text{п}}$ – длина контакта животного с напольным обогревателем вдоль координаты Y , м;
 $q_{\text{в.п}} = j_{\text{п}}^2 \cdot \rho_{\text{п}} \cdot (1 + \alpha_0 \cdot \Theta_{\text{п}})$ – удельный тепловой поток резистивного нагревателя напольного обогревателя, Вт/м²;

$j_{\text{п}} = U / [\rho_{\text{п}} \cdot (1 + \alpha_0 \int_0^L \Theta_{\text{п}} dX)]$ – поверхностная плотность тока резистивного нагревателя напольного обогревателя, А/м;

U – напряжение питания резистивного нагревателя, В;

$q_{\text{ж.конт}} = Q_{\text{т}} / F_{\text{ж.конт}}$ – удельные теплотери животного в контактной зоне, Вт/м²;

$q_{\text{п.к}}^{\text{н}}, q_{\text{п.л}}^{\text{н}}$ – удельные конвективный и лучистый тепловые потоки с нижней поверхности обогревателя, Вт/м²;

$q_{\text{икл} \rightarrow \text{п}}$ – удельный лучистый тепловой поток ИК-излучателя, приходящийся на единицу поверхности обогревателя, свободной от животных, Вт/м²;

$q_{\text{п.к}}^{\text{в}}, q_{\text{п.л}}^{\text{в}}$ – удельные конвективный и лучистый тепловые потоки с верхней теплоотдающей поверхности обогревателя, Вт/м².

Величина $q_{\text{икл} \rightarrow \text{п}}$ определяется по формуле (12), при этом нужно предварительно рассчитать соответствующие угловые коэффициенты излучения по выражениям (13), (14) и разделить полученный результат на площадь обогревателя, свободную от животных.

Значения $q_{\text{п.к}}$ и $q_{\text{п.л}}$ определяются, соответственно, по формулам, используемым для расчета конвективной (8) и лучистой (7) составляющих теплопотерь свободной поверхности тела животного.

Однако определение температурного поля напольного обогревателя путем решения системы дифференциальных уравнений (17) возможно при условии работы напольного обогревателя без регулятора температуры, т.е. когда мощность нагревателя соответствует требуемой по условию обеспечения заданной температуры, что практически невозможно, так как температура обогревателя в процессе выращивания молодняка меняется. Поэтому вместо стационарной задачи теплообмена напольного обогревателя необходимо решать нестационарную задачу до того момента времени τ , пока температура на обогревателе не достигнет заданной, при которой регулятор отключит его от напряжения питания U .

В таком случае рассмотрим нестационарную задачу распределения температурного поля напольного обогревателя:

Решение данной системы уравнений находят в виде температурного поля напольного обогревателя $\Theta_{\text{п}}(X, Y, \tau)$ при заданных исходных данных и заданных краевых условиях.

При определении краевых условий следует исходить из реальных условий теплообмена на концах (торцах) напольного обогревателя в любой момент времени нагрева (граничные условия) и на всей его поверхности в начальный момент (начальные условия).

Учитывая, что толщина обогреваемой панели мала по сравнению с площадью теплоотдающей поверхности, а температура панели в начальный момент времени равна температуре воздуха, запишем граничные и начальные условия напольного обогревателя:

$$\text{при } x = 0 \quad \Theta_{\text{п}} = \Theta_{\text{п } x=0}; \quad (\partial \Theta_{\text{п}} / \partial X)_{x=0} = 0; \quad (21)$$

$$\text{при } x = B \quad \Theta_{\text{п}} = \Theta_{\text{п } x=B}; \quad (\partial \Theta_{\text{п}} / \partial X)_{x=B} = 0; \quad (22)$$

$$\text{при } y = 0 \quad \Theta_{\text{п}} = \Theta_{\text{п } y=0}; \quad (\partial \Theta_{\text{п}} / \partial Y)_{y=0} = 0; \quad (23)$$

$$\text{при } y = L \quad \Theta_{\text{п}} = \Theta_{\text{п } y=L}; \quad (\partial \Theta_{\text{п}} / \partial Y)_{y=L} = 0; \quad (24)$$

$$\text{при } \tau = 0 \quad \Theta_{\text{п}} = \Theta_{\text{в } \tau=0}. \quad (25)$$

Полученная система уравнений в частных производных второго порядка является нелинейной и не имеет точных аналитических решений. Для ее решения можно воспользоваться наиболее распространенным из числовых методов – методом конечных разностей [31, 32], позволяющим получить числовую таблицу приближенных значений искомого решения. При этом дифференциальные операторы исходных дифференциальных уравнений заменяются их приближенными значениями, выраженными через разности величин функций в отдельных дискретных точках («узлах») разностной сетки. В результате такой замены дифференциальные уравнения сводятся к алгебраическим системам, в которых неизвестны значения функции в узлах сетки. Для решения этих систем уравнений в двумерном пространстве введем разностную сетку с ячейками в виде прямоугольных параллелепипедов, для чего проводят три семейства плоскостей:

$$X_j = j \cdot h_x (j = 1, 2, 3, \dots, K), \quad Y_i = i \cdot h_y (i = 1, 2, 3, \dots, M), \quad \tau^n = \sum_{n=1}^N \tau_h.$$

Тогда значения сеточной функции – температуры напольной панели в узлах (X_j, Y_i, τ^n) обозначим символом $\Theta_{\text{п } ij}^{\text{н}}$. Используя метод расщепления, т.е. разбивая расчет на одном шаге по времени от n -го к $(n+1)$ -му слою на отдельные этапы расчета по осям X и Y , со-

гласно [32], строят продольно-поперечную разностную схему следующего вида для уравнения (19):

$$\begin{aligned}
 & C\rho\delta \frac{\Theta_{\pi ij}^{n+1/2} - \Theta_{\pi ij}^n}{\tau/2} = \frac{\lambda\delta}{h_y^2} \times \\
 & \times (\Theta_{\pi+1,j}^{n+1/2} - 2\Theta_{\pi ij}^{n+1/2} + \Theta_{\pi-1,j}^{n+1/2}) + \\
 & + \frac{\lambda\delta}{h_x^2} (\Theta_{\pi,j+1}^n - 2\Theta_{\pi ij}^n + \Theta_{\pi,j-1}^n) + \\
 & + q_{v,\pi ij}^n + q_{ж,конг ij}^n - q_{п,к ij}^n - q_{п,л ij}^n; \quad (26) \\
 & C\rho\delta \frac{\Theta_{\pi ij}^{n+1} - \Theta_{\pi ij}^{n+1/2}}{\tau/2} = \frac{\lambda\delta}{h_y^2} \times \\
 & \times (\Theta_{\pi+1,j}^{n+1/2} - 2\Theta_{\pi ij}^{n+1/2} + \Theta_{\pi-1,j}^{n+1/2}) + \\
 & + \frac{\lambda\delta}{h_x^2} (\Theta_{\pi,j+1}^{n+1} - 2\Theta_{\pi ij}^{n+1} + \Theta_{\pi,j-1}^{n+1}) + \\
 & + q_{v,\pi ij}^{n+1/2} + q_{ж,конг ij}^{n+1/2} - q_{п,к ij}^{n+1/2} - q_{п,л ij}^{n+1/2}. \quad (27)
 \end{aligned}$$

Соответственно, по аналогии для уравнения (20):

$$\begin{aligned}
 & C\rho\delta \frac{\Theta_{\pi ij}^{n+1/2} - \Theta_{\pi ij}^n}{\tau/2} = \frac{\lambda\delta}{h_y^2} \times \\
 & \times (\Theta_{\pi+1,j}^{n+1/2} - 2\Theta_{\pi ij}^{n+1/2} + \Theta_{\pi-1,j}^{n+1/2}) + \\
 & + \frac{\lambda\delta}{h_x^2} (\Theta_{\pi,j+1}^n - 2\Theta_{\pi ij}^n + \Theta_{\pi,j-1}^n) + q_{v,\pi ij}^n + \\
 & + q_{инк,л \rightarrow \pi ij}^n - q_{п,к ij}^n - q_{п,к ij}^n - q_{п,л ij}^n - q_{п,л ij}^n; \quad (28) \\
 & C\rho\delta \frac{\Theta_{\pi ij}^{n+1} - \Theta_{\pi ij}^{n+1/2}}{\tau/2} = \frac{\lambda\delta}{h_y^2} \times \\
 & \times (\Theta_{\pi+1,j}^{n+1/2} - 2\Theta_{\pi ij}^{n+1/2} + \Theta_{\pi-1,j}^{n+1/2}) + \\
 & + \frac{\lambda\delta}{h_x^2} (\Theta_{\pi,j+1}^{n+1} - 2\Theta_{\pi ij}^{n+1} + \Theta_{\pi,j-1}^{n+1}) + \\
 & + q_{v,\pi ij}^{n+1/2} + q_{инк,л \rightarrow \pi ij}^{n+1/2} - q_{п,к ij}^{n+1/2} - \\
 & - q_{п,к ij}^{n+1/2} - q_{п,л ij}^{n+1/2} - q_{п,л ij}^{n+1/2}. \quad (29)
 \end{aligned}$$

Суть этой схемы состоит в том, что шаг по времени τ делится на два полушага. На первом из них вторая производная по координате Y аппроксимируется на промежуточном слое $(n+1/2)$, т. е. используется неявная аппроксимация. В этом случае $\partial^2\Theta/\partial x^2$ аппроксимируется на слое n , т. е. явно. На втором полушаге, наоборот, неявная аппроксимация используется только по направлению X .

Далее уравнения (26), (27) преобразуем и перепишем в виде систем нелинейных алгебраических уравнений относительно значений искомых температур, соответственно, в узлах $(n+1/2)$ -го и $(n+1)$ -го слоев:

$$\begin{aligned}
 & \Theta_{\pi-1,j}^{n+1/2} - 2\left(\frac{c\rho h_y^2}{\lambda\tau} + 1\right)\Theta_{\pi ij}^{n+1/2} + \Theta_{\pi+1,j}^{n+1/2} = -F_{ij}^n, \\
 & \text{где } F_{ij}^n = \left(\frac{h_y}{h_x}\right)^2 (\Theta_{\pi,j+1}^n + \Theta_{\pi,j-1}^n) + \\
 & + 2\left(\frac{c\rho h_y^2}{\lambda\tau} - \left(\frac{h_y}{h_x}\right)^2\right)\Theta_{\pi ij}^n + \left(\frac{h_y^2}{\lambda\delta}\right)(q_{v,\pi ij}^n + q_{ж,конг ij}^n - \\
 & - q_{п,к ij}^n - q_{п,л ij}^n); \quad (30)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \Theta_{\pi,j-1}^{n+1} - 2\left(\frac{c\rho h_x^2}{\lambda\tau} + 1\right)\Theta_{\pi ij}^{n+1} + \Theta_{\pi,j+1}^{n+1} = -F_{ij}^{n+1/2}, \\
 & \text{где } F_{ij}^{n+1/2} = \left(\frac{h_x}{h_y}\right)^2 (\Theta_{\pi+1,j}^{n+1/2} + \Theta_{\pi-1,j}^{n+1/2}) + \\
 & + 2\left(\frac{c\rho h_x^2}{\lambda\tau} - \left(\frac{h_x}{h_y}\right)^2\right)\Theta_{\pi ij}^{n+1/2} + \left(\frac{h_x^2}{\lambda\delta}\right) \times \\
 & \times (q_{v,\pi ij}^{n+1/2} + q_{ж,конг ij}^{n+1/2} - q_{п,к ij}^{n+1/2} - q_{п,л ij}^{n+1/2}). \quad (31)
 \end{aligned}$$

Аналогичным образом преобразуем и уравнения (28) и (29):

$$\begin{aligned}
 & \Theta_{\pi-1,j}^{n+1/2} - 2\left(\frac{c\rho h_y^2}{\lambda\tau} + 1\right)\Theta_{\pi ij}^{n+1/2} + \Theta_{\pi+1,j}^{n+1/2} = -F_{ij}^n, \\
 & \text{где } F_{ij}^n = \left(\frac{h_y}{h_x}\right)^2 (\Theta_{\pi,j+1}^n + \Theta_{\pi,j-1}^n) + \\
 & + 2\left(\frac{c\rho h_y^2}{\lambda\tau} - \left(\frac{h_y}{h_x}\right)^2\right)\Theta_{\pi ij}^n + \left(\frac{h_y^2}{\lambda\delta}\right) \times \\
 & \times (q_{v,\pi ij}^n + q_{инк,л \rightarrow \pi ij}^n - q_{п,к ij}^n - q_{п,к ij}^n - q_{п,л ij}^n - q_{п,л ij}^n); \quad (32)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \Theta_{\pi,j-1}^{n+1} - 2\left(\frac{c\rho h_x^2}{\lambda\tau} + 1\right)\Theta_{\pi ij}^{n+1} + \Theta_{\pi,j+1}^{n+1} = -F_{ij}^n, \\
 & \text{где } F_{ij}^n = \left(\frac{h_x}{h_y}\right)^2 (\Theta_{\pi+1,j}^{n+1/2} + \Theta_{\pi-1,j}^{n+1/2}) + \\
 & + 2\left(\frac{c\rho h_x^2}{\lambda\tau} - \left(\frac{h_x}{h_y}\right)^2\right)\Theta_{\pi ij}^{n+1/2} + \left(\frac{h_x^2}{\lambda\delta}\right) \times \\
 & \times (q_{v,\pi ij}^{n+1/2} + q_{инк,л \rightarrow \pi ij}^{n+1/2} - q_{п,к ij}^{n+1/2} - q_{п,к ij}^{n+1/2} - \\
 & - q_{п,л ij}^{n+1/2} - q_{п,л ij}^{n+1/2}). \quad (33)
 \end{aligned}$$

Матрицы систем (30)-(33) трехдиагональные, поэтому для решения этих систем наиболее рациональный способ – метод прогонки. При этом сначала необходимо решить системы уравнений (30), (32), из которых находятся значения сеточной функции

$\Theta_{nij}^{n+1/2}$. Эти значения используются затем для вычисления искомым значений Θ_{nij}^{n+1} из системы (31), (33). При решении этих систем к ним необходимо добавить начальные условия (25) и соответствующие граничные условия (21), (24) на каждом из этих дробных по времени шагов.

Из граничных условий находят прогоночные коэффициенты α и β на концах напольной панели. Для этого граничные условия при $x=0$ приводим к виду:

$$\Theta_{ni1} = \alpha_{i1}\Theta_{ni2} + \beta_{i1}, i = 1, 2, \dots, M, \quad (34)$$

а при $x=B$ – к виду:

$$\Theta_{niK} = \alpha_{iK}\Theta_{ni,K-1} + \beta_{iK}, i = 1, 2, \dots, M. \quad (35)$$

При $y=0$ приводим к виду:

$$\Theta_{pij} = \alpha_{1j}\Theta_{pi2j} + \beta_{1j}, j = 1, 2, \dots, K, \quad (36)$$

а при $y=L$ – к виду:

$$\Theta_{pmj} = \alpha_{Mj}\Theta_{pm-1,j} + \beta_{Mj}, j = 1, 2, \dots, K. \quad (37)$$

Тогда, записав разностные схемы для каждого из граничных условий и преобразовав их, получим следующие прогоночные коэффициенты для $(n+1/2)$ -го и $(n+1)$ -го слоев.

Для граничных условий:

$$\text{при } x = 0 \quad \Theta_{ni1} = \Theta_{ni2}; \quad \alpha_{i1} = 1; \quad \beta_{i1} = 0; \quad (38)$$

$$\text{при } x = L \quad \Theta_{niK} = \Theta_{ni,K-1}; \quad \alpha_{iK} = 1; \quad \beta_{iK} = 0; \quad (39)$$

$$\text{при } y = 0 \quad \Theta_{pij} = \Theta_{pi2j}; \quad \alpha_{1j} = 1; \quad \beta_{1j} = 0; \quad (40)$$

$$\text{при } y = L \quad \Theta_{pmj} = \Theta_{pm-1,j}; \quad \alpha_{Mj} = 1; \quad \beta_{Mj} = 0, \quad (41)$$

где $i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, K$.

Вычислив прогоночные коэффициенты α и β на границах напольной панели, определяют их значения в оставшихся внутренних точках по следующим рекуррентным формулам, соответственно, для $(n+1/2)$ -го слоя:

$$\alpha_{ij} = -1 / \left(\alpha_{i-1,j} - 2 \left(\frac{c\rho h_y^2}{\lambda\tau} + 1 \right) \right); \quad (42)$$

$$\beta_{ij} = \alpha_{ij}(\beta_{i-1,j} + F_{ij}^n), \quad (43)$$

$i=2, 3, \dots, M-1, j=2, 3, \dots, K-1,$

и для $(n+1)$ -го слоя:

$$\alpha_{ij} = -1 / \left(\alpha_{i,j-1} - 2 \left(\frac{c\rho h_x^2}{\lambda\tau} + 1 \right) \right); \quad (44)$$

$$\beta_{ij} = \alpha_{ij}(\beta_{i,j-1} + F_{ij}^{n+1/2}), \quad (45)$$

$i=2, 3, \dots, M-1, j=2, 3, \dots, K-1.$

После расчета прогоночных коэффициентов находят значения температуры в точках последних M -го и K -го рядов, соответственно, для $(n+1/2)$ -го слоя:

$$\Theta_{pmj}^{n+1/2} = \frac{\alpha_{Mj}\beta_{M-1,j} + \beta_{Mj}}{1 - \alpha_{Mj}\alpha_{M-1,j}}, \quad (46)$$

$j=1, 2, \dots, K,$

и $(n+1)$ -го слоя:

$$\Theta_{piK}^{n+1} = \frac{\alpha_{iK}\beta_{i,K-1} + \beta_{iK}}{1 - \alpha_{iK}\alpha_{i,K-1}}, \quad (47)$$

$i=1, 2, \dots, M.$

Далее определяют значения температуры напольной панели в оставшихся точках по рекуррентным формулам для $(n+1/2)$ -го слоя:

$$\Theta_{pij}^{n+1/2} = \alpha_{ij}\Theta_{pi+1,j}^{n+1/2} + \beta_{ij}, \quad (48)$$

$i=M-1, M-2, \dots, 1, j=1, 2, \dots, K;$

для $(n+1)$ -го слоя:

$$\Theta_{pij}^{n+1} = \alpha_{ij}\Theta_{pi,j+1}^{n+1} + \beta_{ij}, \quad (49)$$

$j=K-1, K-2, \dots, 1, i=1, 2, \dots, M.$

Решаемое уравнение трехмерное (двумерное в пространстве и одномерное во времени) нелинейное, поэтому его решают методом итераций для каждого временного слоя.

При решении приведенных нелинейных задач на каждом шаге по времени строится итерационный процесс и производится уточнение коэффициентов (в нашем случае коэффициента теплопередачи), зависящих от решения. В этих случаях целесообразно контролировать устойчивость вычислительного процесса по числу итераций, необходимых для получения требуемой точности. Если, например, число итераций на данном временном слое превышает заданное максимально допустимое число $N_{\max} \sim 7 \dots 10$, то временной шаг τ^n уменьшается вдвое, и счет задачи повторяется для этого же временного слоя с уменьшенным шагом $0,5 \cdot \tau^n$. Если же необходимая точность вычислительного процесса достигается за число итераций, меньшее какого-то заданного числа N_{\min} (обычно $N_{\min}=2$ или 3), то новый временной слой рассчитывается с $\tau^{n+1}=1,3 \cdot \tau^n$. В том случае, когда число итераций S находится в пределах $N_{\min} \leq S \leq N_{\max}$, очередной $(n+1)$ -й слой рассчитывается с $\tau^{n+1}=\tau^n$. Соблюдение данного условия приводит к ведению вычислительно процесса с переменным шагом по времени. При этом достигается хорошая адекватность математической модели не только в статических, но и динамических режимах работы напольных панелей.

На рисунке 2 приведен обобщенный алгоритм расчета характеристик напольной панели установки комбинированного обогрева животных в двумерном пространстве.

Заключение

1. Для обеспечения высокой сохранности поросят-сосунов в помещениях для их содержания необходимо поддерживать температуру воздуха на уровне $35 \dots 20$ °С в зависимости от возраста, а для подсосных свиноматок – $11 \dots 13$ °С, что является явным противоречием в режиме содержания разновозрастных животных. Содержание подсосных свиноматок при температуре выше 13 °С снижает их молокоотдачу, что приводит к недокорму поросят-сосунов и, соответственно, снижению их роста.

2. Создание требуемых температурных режимов для разных возрастных групп животных, находящихся в одном производственном помещении, возможно только при использовании системы общего обогрева помещения и средств местного обогрева поросят-сосунов, в частности, комбинированных установок, состоящих из напольных панелей и инфракрасных излучателей.

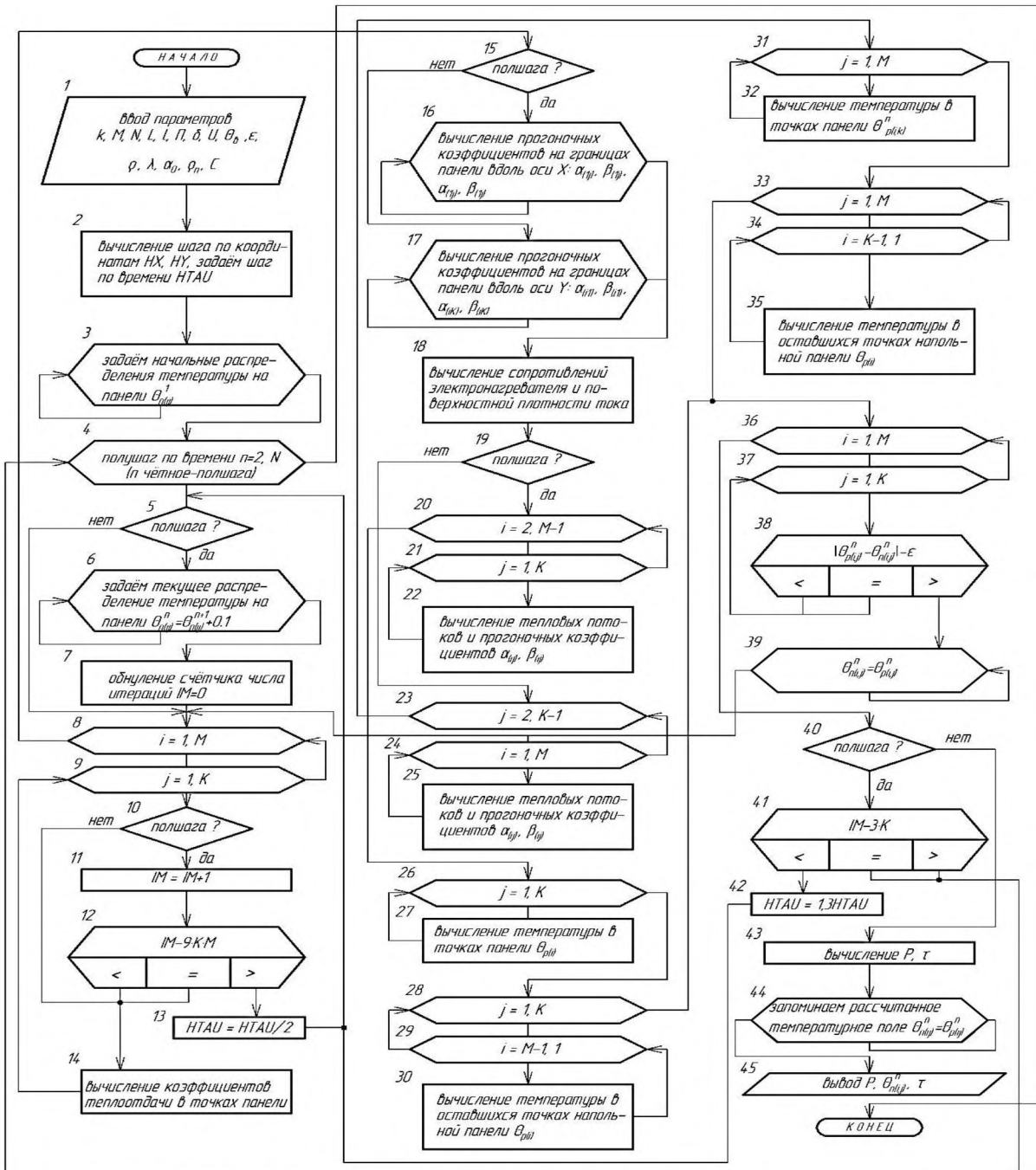


Рисунок 2. Алгоритм расчета характеристик напольных панелей в двумерном пространстве при комбинированном обогреве животных

3. При комбинированном обогреве животных теплоотдача от тела животного, которое можно представить в виде цилиндра с оболочкой и усеченной боковой поверхностью, контактирующей с напольной панелью, осуществляется теплопроводностью, со свободной поверхности – конвекцией и излучением.

4. Моделирование процесса теплообмена животных при комбинированном обогреве в одномерном пространстве, проведенное в работе [9] с учетом коэффициента теплопроводности напольного обогрева-

теля вдоль его теплоотдающей поверхности, а также температурного коэффициента резистивного нагревателя, показало хорошую адекватность, однако рассчитываемый тепловой поток, теряемый теплопроводностью частью тела животного, контактирующей с напольной панелью, имеет весьма приближенное значение из-за искажения одномерного температурного поля напольной панели в зоне контакта.

5. Предложенная двумерная в напольном пространстве математическая модель теплообмена жи-

вотного при комбинированном обогреве исключает указанные недостатки ранее используемых моделей. При этом разработанный алгоритм расчета характеристик напольной панели требует использования численных методов и ЭВМ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Комлацкий, В.И. Биология и экология свиней: учеб. пособие / В.И. Комлацкий, Л.Ф. Величко, В.А. Величко. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – 137 с.
2. Хэммонд, Дж. Биологические основы продуктивности животных / Дж. Хэммонд, Йоганссон, Ф. Хаинг // Руководство по разведению животных. – М., 1963. – Т. 1. – 503 с.
3. Винчестер, К. Окружающая среда и рост животных / К. Винчестер // Сельское хозяйство за рубежом. – 1965. – № 8. – С. 30-37.
4. Бабаев, А.Н. Влияние стрессовых факторов на организм свиней / А.Н. Бабаев, В.Д. Володарская // Сельское хозяйство за рубежом. – 1981. – № 1. – С. 53-55.
5. Эдди, С. Температурный режим при содержании свиней / С. Эдди // Свиноводство / ВНИИТЭИСХ, 1977. – № 9. – С. 26.
6. Понд, У. Дж. Биология свиньи / У. Дж. Понд, К.А. Хаупт; пер. с англ. – М.: Колос, 1983. – 334 с.
7. Кнап, И. Условия организации эффективности откорма свиней / И. Кнап // Международный сельскохозяйственный журнал. – 1965. – № 5. – С. 25-28.
8. Плященко, С.И. Естественная резистентность организма животных / С.И. Плященко, В.Г. Сидоров. – Л.: Колос, 1979. – 184 с.
9. Прищепов, М.А. Энергетическая эффективность систем обогрева поросят-сосунов / М.А. Прищепов. – Минск: БГАТУ, 1998. – 92 с.
10. Ажаев, А.М. Физико-гигиенические аспекты действия высоких и низких температур. Проблемы космической биологии / А.М. Ажаев. – М.: Наука, 1979. – Т. 38. – 264 с.
11. Голиков, А.Н. Адаптация сельскохозяйственных животных / А.Н. Голиков. – М.: Агропромиздат, 1985. – 215 с.
12. Windisch, K. Untersuchungen zur strahlungs / K. Windisch // Wärmeabgabe des Menschen – Stadt – und Gebäudetechnik, 1980. – № 4. – S. 110-113.
13. Дворников, А.Ф. К вопросу использования «внепиковой» электроэнергии для теплоснабжения / А.Ф. Дворников // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1971. – № 1. – С. 22-23.
14. Смолянский, Г.Б. Теплообмен и терморегуляция / Г.Б. Смолянский. – Петрозаводск: ПГУ, 1975. – 224 с.
15. Егназаров, А.Г. Отопление и вентиляция зданий и сооружений сельскохозяйственных комплексов / А.Г. Егназаров. – М.: Стройиздат, 1981. – 239 с.
16. Богомолов, А.И. Газовые горелки ИК-излучения и их применение / А.И. Богомолов, Д.Я. Виздорчик, М.А. Маевский. – М.: Стройиздат, 1967. – 254 с.
17. Кошечев, В.С. Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека от холода / В.С. Кошечев. – М.: Медицина, 1981. – 288 с.
18. Левитин, И.Б. Применение ИК техники в народном хозяйстве / И.Б. Левитин. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 264 с.
19. Онегов, А.П. Гигиена сельскохозяйственных животных / А.П. Онегов, И.Ф. Храбустовский, В.И. Черных. – М.: Колос, 1972. – 432 с.
20. Быстрицкий, Д.Н. Электрические установки инфракрасного излучения в животноводстве / Быстрицкий Д.Н., Н.Ф. Кожевникова, А.К. Ломцов, В.П. Муругов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 152 с.
21. Петрухин, И.В. Биологические основы выращивания поросят / И.В. Петрухин. – М.: Россельхозиздат, 1970. – 239 с.
22. Кожевникова, Н.Ф. Выбор режима инфракрасного обогрева молодняка / Н.Ф. Кожевникова // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1978. – № 3. – С. 30-32.
23. Банхиди, Л. Тепловой микроклимат помещений / Л. Банхиди; пер. с венг. – М.: Стройиздат, 1981. – 248 с.
24. Муринас, К.Ю. исследование и разработка технических средств местного обогрева молодняка поросят в условиях Литовской ССР: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / К.Ю. Муринас; Латвийская с.-х академия. – Елгава, 1967. – 22 с.
25. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
26. Герасимович, Л.С. Исследование и разработка напольных полупроводниковых пленочных электрообогревателей для молодняка птицы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Л.С. Герасимович; ЦНИИМЭСХ НЗ СССР. – Минск, 1970. – 25 с.
27. Карелина, В.В. Исследование эффективности работы систем газового ИК локального обогрева в помещениях свинарников-маточников животноводческих комплексов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / В.В. Карелина; МИСИ. – М., 1977. – 20 с.
28. Плященко, С.И. Микроклимат и продуктивность животных / С.И. Плященко, Н.И. Хохлова. – Л.: Колос, 1976. – 208 с.
29. Беляева, С.К. Исследование энергетики технических средств локального обогрева в свинарниках-маточниках: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / С.К. Беляева; ВИЭСХ. – М., 1978. – 20 с.
30. Кисель, А.К. Разработка тепловой модели комбинированного электрообогревателя поросят-сосунов / А.К. Кисель // Низкотемпературные поверхностно-распределенные электронагреватели в сельском хозяйстве: сборник науч. трудов. – Горки, 1985. – Вып. 124. – С. 12-19.
31. Берковский, Б.М. Разностные методы исследования задач теплообмена / Б.М. Берковский, Е.Ф. Ноготов. – Минск: Наука і тэхніка, 1975. – 114 с.
32. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 616 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 13.02.2025