ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.171
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-87-96

Исследование теплообменных процессов в терморегулируемом матрасе для коров

Ю.Г. Иванов[1]✉, ***С.П. Рудобашта***[2], ***Д.А. Павлов***[3]

[1, 2, 3] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

[1] iy.electro@mail.ru✉; https: orcid.org//0000-0002-4766-9532

[2] rudobashta@mail.ru; https: orcid.org//0000-0002-3129-8562

[3] pavlovdaniil227@gmail.com

Аннотация. Коровы испытывают тепловой стресс при температуре воздуха в коровнике выше 24°С и нуждаются в обогреве в зимний период. Тепловой стресс коров сопровождается учащенным дыханием и пульсом и приводит к снижению молочной продуктивности. Для улучшения комфортного состояния коров в боксах требуется адаптивное терморегулируемое воздействие. Цель исследований – разработать терморегулируемый водяной матрас для отдыха коров на основе адаптивного управления температурой теплоносителя. Представлены нестационарная и стационарная математические модели процесса теплообмена, позволяющие определить основные параметры нагрева и охлаждения поверхности матраса. Разработаны и изготовлены экспериментальный образец комплекта оборудования терморегулируемого матраса на одно скотоместо и лабораторный стенд для исследований параметров и режимов работы. Разработанный терморегулируемый водяной матрас для отдыха коров обеспечивает управляемое изменение температуры поверхности за счет подачи теплоносителя (воды) через трубчатый теплообменник, расположенный внутри эластичного ложа. Экспериментальные лабораторные исследования матраса проведены при температуре теплоносителя 42, 47 и 52°С и расходе 1,6; 3,2 и 7,0 кг/мин. В результате подтверждена закономерная зависимость температуры наружной поверхности водяного матраса от температуры и расхода теплоносителя при его охлаждении и нагреве. Доказана возможность использования терморегулируемого матраса в качестве элемента адаптивной системы обеспечения температурного комфорта коров. Терморегулируемый водяной матрас для отдыха коров, индивидуально воздействуя на животное, снижает риск теплового стресса, поддерживает более комфортные условия содержания и способствует уменьшению потерь молочной продуктивности в жаркий период года. В дальнейшем будет целесообразным определить режимы автоматического управления температурой водяного матраса в зависимости от физиологических показателей коров (частоты дыхания и/или пульса) в условиях животноводческой фермы.

Ключевые слова: тепловой стресс; терморегулируемый водяной матрас; матрас для отдыха коров; трубчатый теплообменник; теплообмен; управляемое изменение температуры поверхности; комфортные условия содержания

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям в рамках Федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства», договор (соглашение) № 434ГССС27/107334 от 03.10.2025.

Для цитирования: Иванов Ю.Г., Рудобашта С.П., Павлов Д.А. Исследование теплообменных процессов в терморегулируемом матрасе для коров // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 87-96. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-87-96

© Иванов Ю.Г., Рудобашта С.П., Павлов Д.А., 2026

ORIGINAL ARTICLE

Study of heat transfer processes in a temperature-controlled water mattress for dairy cows

***Yu.G. Ivanov*[1]✉, *S.P. Rudobashta*[2], *D.A. Pavlov*[3]**

[1,2,3] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

[1] iy.electro@mail.ru; https: orcid.org//0000-0002-4766-9532

[2] rudobashta@mail.ru, https: orcid.org//0000-0002-3129-8562

[3] pavlovdaniil227@gmail.com

Abstract. Cows experience heat stress at cowshed air temperatures above 24°C and require supplemental heating during the winter period. Heat stress in cows is accompanied by elevated respiration and heart rates, leading to reduced milk yield. Improving cow comfort in resting stalls requires adaptive temperature control. The study aimed to develop a temperature-controlled water mattress for resting cows based on adaptive regulation of the heat transfer meduim temperature. The authors formulated both transient and steady-state mathematical models of the heat transfer process to determine the fundamental parameters governing the heating and cooling of the mattress surface. An experimental prototype of the temperature-controlled mattress system for a single stall unit and a laboratory test rig were designed and fabricated to evaluate performance parameters and operating modes. The developed temperature-controlled water mattress provides dynamic adjustment of surface temperature by circulating a heat transfer medium (water) through a tubular heat exchanger embedded within a flexible mattress body. Laboratory experiments were conducted at heat transfer medium temperatures of 42, 47, and 52°C and mass flow rates of 1.6, 3.2, and 7.0 kg/min. The results confirmed a predictable relationship between the outer surface temperature of the water mattress and the temperature and flow rate of the heat transfer medium during both cooling and heating cycles. The finding have proved the feasibility of using the temperature-controlled mattress as an active component in an adaptive system for ensuring thermal comfort in cattle. By providing individualized thermal management, the water mattress reduces heat stress risk, maintains optimal housing conditions, and mitigates milk yield losses during hot seasons. Further research will focus on establishing automated temperature control algorithms based on physiological responses of cows (respiration rate and/or heart rate) under commercial farm conditions.

Keywords: heat stress; temperature-controlled water mattress; cow resting mattress; tubular heat exchanger; heat transfer; controlled surface temperature; comfortable housing conditions for animals

Funding: The work was supported by the Innovation Promotion Foundation within the framework of the Federal project “Platform of University Technology Entrepreneurship”, Contract (Agreement) No. 434GSSS27/107334 dated 03.10.2025.

For citation: Ivanov Yu.G., Rudobashta S.P., Pavlov D.A. Study of heat transfer processes in a temperature-controlled water mattress for dairy cows. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):87-96. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-87-96

Введение

Ускорение темпов глобального потепления на планете приводит к росту температуры в помещениях для содержания крупного рогатого скота, что негативно сказывается на продуктивности и здоровье животных. В частности, при температуре воздуха в коровнике выше 24°C животные испытывают тепловой стресс, возрастает частота дыхания и пульса, что приводит к снижению молочной продуктивности коров. При повышении температуры воздуха в помещении до 30°C ежедневные потери могут составлять 7…10 л молока на корову, на ферме на 400 коров ежемесячные потери могут составить около 100 т молока[1] [1, 2].

Как отмечает A. Berman [3], для предотвращения тепловых стрессов важно в жаркий период создать условия, обеспечивающие корове дополнительную теплоотдачу в окружающую среду. Комфортные условия содержания скота при температуре воздуха выше 24°C можно обеспечить несколькими способами: во-первых, обдувом животных потоком воздуха местной принудительной вентиляции [4-6,]; во-вторых, мелкодисперсным распылением воды, в результате чего температура воздуха снижается за счет испарения влаги [7, 8]; в-третьих, для активного испарения с кожного покрова животных предложен комбинированный способ, заключающийся в распылении воды

[1] Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Сидоренко М.С. Автоматический мониторинг физиологических показателей животных для управления технологическими процессами на молочных фермах: Монография. М.: МЭСХ, 2019. 230 с.

на тело животного и обдуве вентилятором [9, 10]. Однако последние два способа приводят к повышению влажности воздуха в помещении и могут привести к усилению теплового стресса у животных[2]. Отметим также, что формируемое такими способами температурное поле является неравномерным внутри коровника и по-разному воздействует на всех животных. Согласно исследованиям X.A. Ortiz, K.R. Bastian и др. [11, 12] возможно кондуктивное охлаждение КРС за счет прокладки теплообменника под полом коровника с различными материалами подстилок (песок и высушенный навоз, с вариантами в сухом и увлажненном состоянии). Исследованиями Bastian [12] установлено, что применение водяных матрасов также снимает тепловой стресс у коров. Необходимо отметить, что способы охлаждения X.A. Ortiz и K.R. Bastian [11, 12] не учитывают физиологического состояния коров при тепловых стрессах.

Цель исследований: предложить способ терморегулируемого воздействия на коров для снятия тепловых стрессов и представить нестационарную и стационарную математические модели процесса теплообмена; разработать терморегулируемый водяной матрас для отдыха коров в индивидуальных боксах и провести экспериментальные исследования.

Материалы и методы

Разработанный водяной матрас оснащен эластичный лежаком *1* для размещения животного, датчиком температуры воды в матрасе *2*, насосом *3*, чиллером *4*, контроллером *5*, датчиками температуры *6* и влажности *7* окружающей среды, а также датчиками *8*, фиксирующими физиологическое состояние коров (частоту дыхания и/или частоту пульса) (рис. 1). В проектируемом терморегулируемом матрасе температура воды будет регулироваться адаптивно, в зависимости от температуры и влажности воздуха и с учетом частоты дыхания и/или частоты сердечного пульса коров, которые повышаются при возникновении теплового стресса, а при его снятии возвращаются в норму[3].

В лабораторных исследованиях реализован ручной режим задания температуры теплоносителя без обратной связи по физиологическим показателям коров, поскольку основной целью исследований

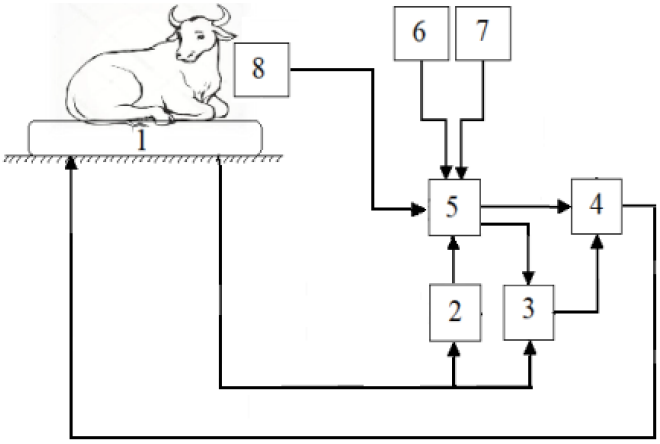


Рис. 1. Функциональная схема терморегулируемого матраса для коров

Fig. 1. Functional diagram of a temperature-controlled mattress for cows

является установление тепловых характеристик терморегулируемого матраса.

Разработанный матрас представляет собой эластичное ложе (матрас) из вспененного полиэтилена высокой плотности размерами 1,2 х 2,0 м, толщиной 10 см. Внутри матраса проходит трубчатый теплообменник, обогревающий или охлаждающий расположенную в верхней центральной части матраса водяную подушку размерами 1,2 х 0,8 м, толщиной 5 см. Сверху водяная подушка накрыта резинотканевым покрытием (матом), на которое укладывается корова. В работе исследовали терморегулируемую часть матраса – водяную подушку.

Предлагаемый эластичный водяной матрас предотвращает, помимо снижения тепловых стрессов, травмируемость конечностей коров в моменты их подъема или укладывания.

Результаты и их обсуждение

Процесс нагрева водяной подушки матраса можно разбить на две стадии: нестационарную, когда температура водяной подушки еще не достигла своего постоянного значения, и стационарную, при которой температура водяной подушки с определенной точностью достигла максимального (при ее нагреве) и минимального (при охлаждении) значений. Сформулируем математические модели для этих стадий, приняв следующие условия и допущения:

– система состоит из двух частей: водяной подушки толщиной R_1 и находящегося сверху над ним мата (резинотканевое покрытие) толщиной R_2;

– задача является одномерной: изменение температуры происходит только по вертикальной координате (координата x), то есть тепловые потери через боковые стенки системы и через ее низ пренебрежимо малы;

[2] Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Сидоренко М.С. Автоматический мониторинг физиологических показателей животных для управления технологическими процессами на молочных фермах: Монография. М.: МЭСХ, 2019. 230 с.

[3] Устройство обеспечения температурного комфорта коров в помещении животноводческого комплекса: Патент № 239859 / Ю.Г. Иванов, С.А. Андреев, В.И. Стяжкин, Д.А. Понизовкин, Д.А. Павлов; № 2025112228; заявл. 12.05.2025; опубл. 17.12.2025заявитель, патентообладатель ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

– все теплофизические характеристики постоянны;

– перенос теплоты через водяную подушку осуществляется путем теплопроводности с некоторым эффективным коэффициентом теплопроводности λ_1, который учитывает естественную конвекцию воды.

С учетом этих условий сформулируем нестационарную задачу теплообмена для рассматриваемой системы, поместив начало координат в нижнюю плоскость водяной подушки и направив координату x вверх. Целью расчета по нестационарной модели является определение времени выхода температуры в той или иной точке системы или среднеобъемной температуры на нужное значение. Пусть индекс «1» относится к водяной подушке, а индекс «2» – к мату. С учетом принятых условий нестационарная задача является одномерной, в которой температуры t_1 и t_2 являются функциями двух независимых параметров – координаты x и времени τ: $t_1 = f_1(x, \tau)$; $t_2 = f_2(x, \tau)$.

Нестационарная задача

Представим нестационарную задачу в виде:

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2}, \quad 0 < x < R_1, \quad \tau > 0, \tag{1}$$

$$t_1 = t_н = \text{const}, \quad 0 \le x \le R_1, \quad \tau = 0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial x} = 0, \quad x = 0, \quad \tau > 0, \tag{3}$$

$$t_1 = t_2, \quad x = R_1, \quad \tau \ge 0, \tag{4}$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2}, \quad R_1 < x < R_2, \quad \tau > 0, \tag{5}$$

$$t_2 = t_1 = t_н = \text{const}, \quad 0 \le x \le R_1, \quad \tau = 0, \tag{6}$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x}, \quad x = R_1, \quad \tau > 0, \tag{7}$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} = \alpha (t_2 - t_c), \quad x = R_1 + R_2, \tau > 0, \tag{8}$$

где λ_1, a_1 – коэффициент теплопроводности (Вт/(м К)), характеризующий способность водяного матраса проводить тепло, и коэффициент температуропроводности (м^2/с), характеризующий скорость, с которой в водяном матрасе выравнивается температура водяной подушки, соответственно; λ_2, a_2 – то же, соответственно, у мата; α – коэффициент теплоотдачи мата с внешней воздушной средой, Вт/(м^2 К).

Согласно представленной модели задача предполагает следующие условия: в момент начала процесса теплообмена температуры водяной подушки и мата постоянны и равны (уравнения (2) и (6)); плотность потока теплоты через нижнюю поверхность водяной подушки отсутствует (уравнение (3)); на стыке водяной подушки и мата имеет место граничное условие теплообмена четвертого рода (ГУ-4), выражающее равенство температур и тепловых потоков (уравнения (6) и (7)); теплообмен поверхности матраса с воздухом происходит в соответствии с уравнением теплоотдачи Ньютона – граничное условие третьего рода (ГУ-3) (уравнение (8)). Левая часть уравнения (8) выражает перенос теплоты в мате за счет теплопроводности. В режиме охлаждения производная $\frac{\partial t_2}{\partial x}$ отрицательна, в совокупности со знаком «-» левая часть уравнения (8) положительна, правая часть уравнения тоже положительна, то есть знаки соблюдаются. В режиме нагрева производная $\frac{\partial t_2}{\partial x}$ в уравнении (8) положительна, в совокупности со знаком «-» левая часть этого уравнения отрицательна, но и правя часть уравнения (8) тоже отрицательна, то есть знаки в уравнении (8) также соблюдаются.

Представленная нестационарная задача может быть решена одним из известных численных методов. Результатом будут являться функции $t_1 = f_1(x, \tau)$; $t_2 = f_2(x, \tau)$, выражающие изменение локальных температур во времени. Интегрируя эти функции по координате, можно получить изменение среднеобъемных температур водяной подушки и мата во времени:

$$\overline{t_1}(\tau) = = \frac{1}{R_1} \int_0^{R_1} t(x, \tau), \tag{9}$$

$$\overline{t_2}(\tau) = = \frac{1}{R_2 - R_1} \int_{R_1}^{R_2} t(x, \tau). \tag{10}$$

Коэффициент теплоотдачи α, входящий в уравнение (8), может быть по уравнению подобия для естественной конвекции [6], которое имеет вид:

$$Nu = C(Gr \cdot \text{Pr})^n, \tag{11}$$

где $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda_в}$ – число Нуссельта; $Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta |t_{ст} - t_в|$ – число Грасгофа; $\text{Pr} = \frac{\nu}{a}$ – число Прандтля; l – определяющий размер тела по вертикали (в данном случае $l = R_1 + R_2$ – суммарная толщина водяной подушки и мата), м; $\lambda_в = 0{,}026$ Вт/(м °С)) – коэффициент теплопроводности воздуха; $g = 9{,}81$ м/с^2 – ускорение свободного падения; $\nu = 16{,}0 \cdot 10^{-6}$ м^2/с – кинематическая вязкость воздуха; β – коэффициент объемного расширения воздуха при средней его температуре 25°С, К$^{-1}$; $\beta = 1/((t_{ст} + t_в)/2 + 273) = 1/((30+20)/2+273) = 0{,}00335$ К$^{-1}$; a – коэффициент температуропроводности воздуха. Число Прандтля для воздуха Pr = 0,71; C, n, ε – константы, значения которых зависят от формы тела, расположения его в пространстве и от режима теплообмена. Для рассматриваемого случая (горизонтальная пластина, охлаждаемая снизу) $C = 0{,}27$; $n = 0{,}25$; $\varepsilon = 1$.

Примем $l = 0{,}053$ м, тогда имеем: $Gr = \frac{9{,}81 \cdot 0{,}053^3}{(16 \cdot 10^{-6})^2} 0{,}00335 \cdot 10 = 1{,}91 \cdot 10^5$; $Nu = C(Gr \cdot \mathrm{Pr})^n = 0{,}27(1{,}91 \cdot 10^5 \cdot 0{,}71)^{0{,}25} = 5{,}18$. Следовательно, $\alpha = Nu\frac{\lambda_в}{l} = 5{,}18\frac{0{,}026}{0{,}053} = 2{,}54$ Вт / (м^2·°С).

Стационарная задача

Целью теплового расчета по стационарной модели является определение затрат теплоты, потребляемой стендом Q_1, и температуры в той или иной частях системы в установившемся режиме работы стенда. Как отмечено выше, начиная с некоторого момента от начала процесса теплообмена, температуры t_1 и t_2 с достаточной точностью приближаются к своим предельным значениям, и можно считать, что наступает стационарный процесс, при котором температуры во времени уже не изменяются. На этой стадии теплота проходит от трубчатого нагревателя через рассматриваемые слои (слой под водяной подушкой, водяная подушка и мат) транзитом. Количество теплоты, выделяемое нагревателем в единицу времени (тепловая мощность), Вт, определяется уравнением:

$$Q_1 = G_в c_в (t_{в.н} - t_{в.к}), \quad (12)$$

где $G_в$ – массовый расход воды, кг/с; $c_в = 4190$ Дж/(кг °С) – теплоемкость воды; $t_{в.н}$, $t_{в.к}$ – температура воды на входе и выходе трубчатого нагревателя, °С. Под трубчатым нагревателем установлен отражательный экран, предназначенный для предотвращения утечек теплоты через низ стенда. Примем, что он обеспечивает 90% сохранения выделяющейся в нагревателе теплоты[4] и, таким образом, в сторону водяной подушки направляется поток теплоты величиной $Q = 0{,}9Q_1$. Процесс транспорта теплоты через систему может быть описан уравнением стационарной теплопередачи через плоскую многослойную стенку[5]. Запишем это уравнение в виде:

$$Q = k(\overline{t}_{в.ср} - t_с)F, \quad (13)$$

где $k = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{R_1}{\lambda_1} + \frac{R_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha}}$ – коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2 °С); k_1 – коэффициент теплопередачи от воды в трубчатом нагревателе к водяной подушке, Вт/(м^2 °С); $\overline{t}_{в.ср} = (t_{в.н} + t_{в.к)} / 2$ – средняя температура воды в трубчатом нагревателе, °С; F – площадь наружной поверхности мата, м^2.

Температура на нижней поверхности водяной подушки $t_{в.п.н}$ составляет:

$$t_{в.п.н} = t_{в.ср} - \frac{Q}{k_1 \cdot F}. \quad (14)$$

Температура на верхней поверхности водяной подушки $t_{в.п.в}$ (нижней поверхности мата) составляет:

$$t_{в.п.в} = t_{в.ср} - \frac{Q}{\frac{1}{(1/k_1 + R_1/\lambda_1)}F}. \quad (15)$$

Для проведения экспериментальных исследований терморегулируемого матраса разработана лабораторная установка, включающая в себя датчики температуры теплоносителя на входе и выходе, электронные весы «Физтех ВТ-Н 32» с блоком индикации для регистрации массового расхода теплоносителя (воды) с погрешностью не более 0,01%, тепловизор Guide PF210, насос для перекачивания теплоносителя GEA Farm Technologies. Исследования проведены в лаборатории кафедры механизации сельского хозяйства РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

В экспериментальных исследованиях целевым показателем является определение диапазона регулирования температуры наружной поверхности водяного матраса при различных значениях температуры и расхода теплоносителя, приближенных к реальным условиям эксплуатации терморегулируемого матраса при беспривязном содержании коров в неотапливаемых коровниках.

При проведении исследований регистрировали расход теплоносителя (воды), изменение температуры воды в трубчатом теплообменнике на входе и выходе, изменение температуры внешней поверхности водяной подушки с помощью тепловизора (рис. 2). Важными в функционале тепловизора являются возможность анализа регистрируемого температурного поля водяного матраса и автоматическое представление усредненного результата измерения, который записывается в журнал опыта.

При охлаждении матраса, предварительно нагретого до 50°С, на вход теплообменника подается теплоноситель (вода) с температурой 16°С. При нагреве подается вода с температурами 42, 47 и 52°С. Температура воздуха в лаборатории и температура водяной подушки, измеряемой в исходном состоянии, составили 18°С. Значения расхода теплоносителя составляли 1,6; 3,2; 7,0 кг/мин. Замеры усреднены после 3-кратной повторности.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунках 3-6. На рисунке 3 представлены закономерности изменения регулируемой

[4] Официальный сайт ООО Ультрастрой Пермь». [Электронный ресурс]. URL: https://urfas.ru/folga_alyuminievaya_gladkaya.php (дата обращения: 06.04.2026).

[5] Рудобашта С.П. Теплотехника. Изд. 2-е, доп. М., 2015. 672 с

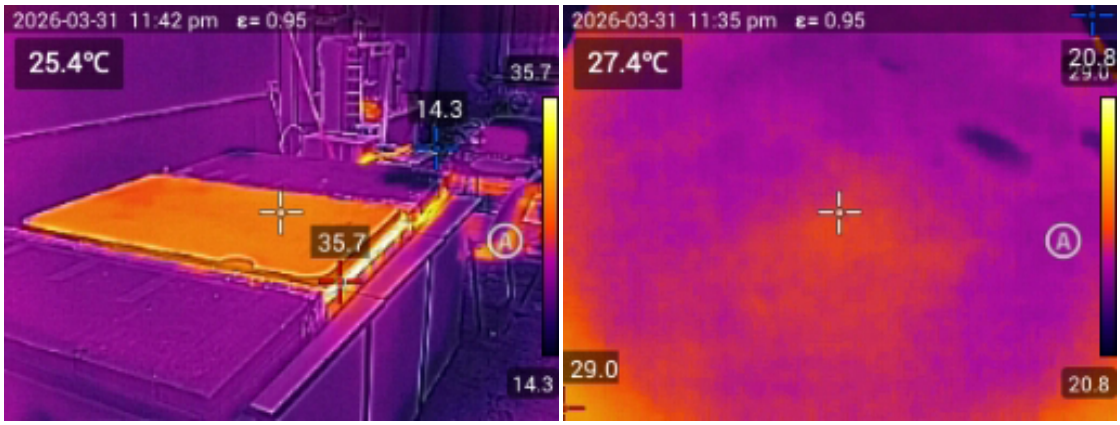


Рис. 2. Фото терморегулируемого матраса, полученное с тепловизора Guide PF210, и температурное поле поверхности водяного матраса

Fig. 2. Thermal image of the temperature-controlled mattress obtained with a Guide PF210 thermal camera, and the surface temperature field of the water mattress

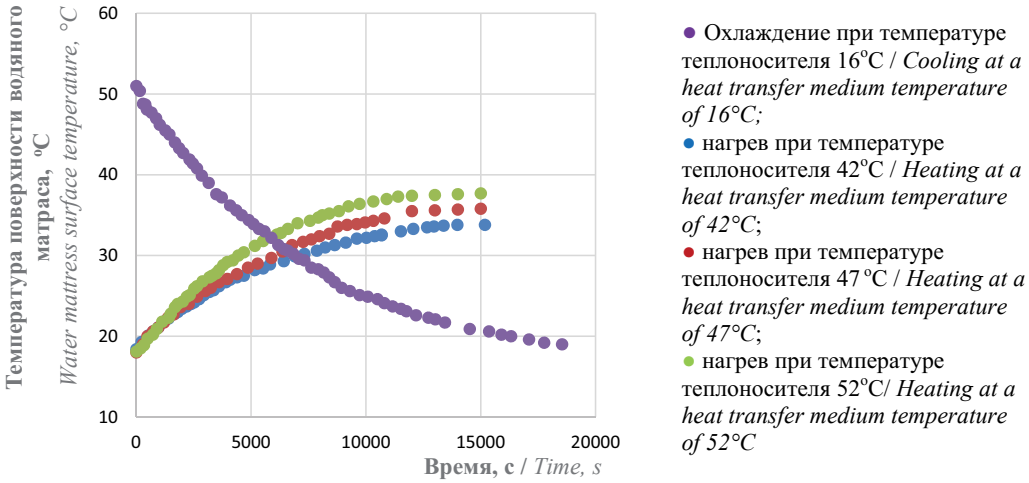


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности водяного матраса от времени прокачивания теплоносителя при расходе 7,0 кг/мин

Fig. 3. Relationship between surface temperature of the water mattress and heat transfer medium pumping time at a flow rate of 7.0 kg/min

температуры наружной поверхности водяного матраса в диапазоне от 18 до 37,7°С при расходе теплоносителя 7,0 кг/мин. При температуре теплоносителя 42°С повышение температуры до установившегося значения 33,5°С происходит за 15000 с (250 мин). При температуре теплоносителя 47°С до установившегося значения 35,8°С время составляет 13700 с (228 мин); при температуре теплоносителя 52°С до установившегося значения 37,7°С – 12500 с (208 мин). Установка обеспечивает охлаждение наружной поверхности матраса в диапазоне 51…19°С за 18540 с (309 мин).

На рисунке 4 представлены закономерности изменения регулируемой температуры наружной поверхности водяного матраса в диапазоне от 18 до 35,9°С при расходе теплоносителя 3,2 кг/мин. При температуре теплоносителя 42°С повышение температуры до установившегося значения 32,5°С происходит за 14820 с (247 мин). Время при температуре теплоносителя 47°С до установившегося значения 34,3°С составляет 14220 с (237 мин). При температуре теплоносителя 52°С до установившегося значения 35,7°С время составляет 13000 с (217 мин).

На рисунке 5 представлены закономерности изменения регулируемой температуры наружной поверхности водяного матраса в диапазоне от 18 до 34,1°С при расходе теплоносителя 1,6 кг/мин. При температуре воды 42°С повышение температуры до установившегося значения 31,4°С происходит за 15540 с (259 мин). При температуре теплоносителя 47°С нагрев до установившегося значения 32,8°С происходит за 14900 с (248 мин). При температуре воды 52°С нагрев до установившегося значения 34°С достигается за 14160 с (236 мин).

На рисунке 6 представлены закономерности изменения разницы температур на входе и выходе

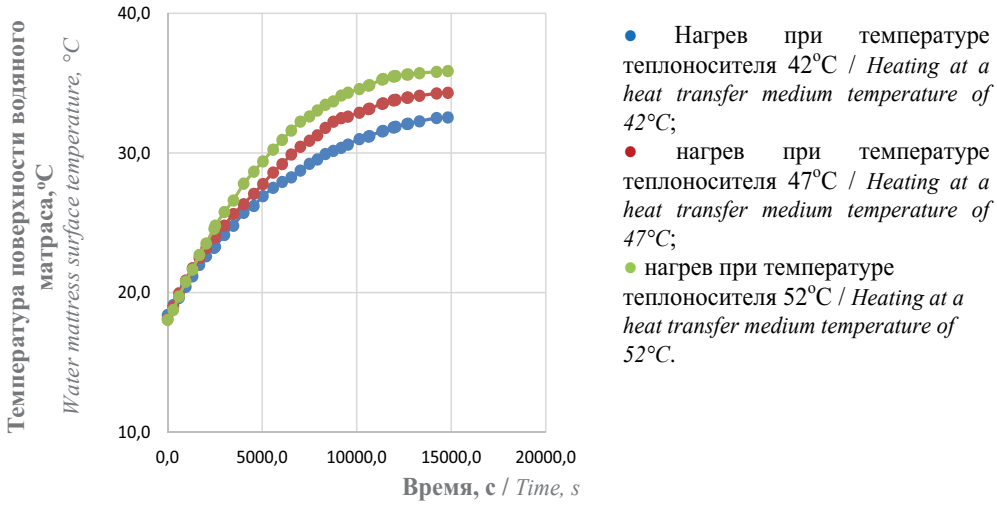


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности водяного матраса от времени прокачивания теплоносителя при расходе 3,2 кг/мин

Fig. 4. Relationship between the water mattress surface temperature and heat transfer medium pumping time at a flow rate of 3.2 kg/min

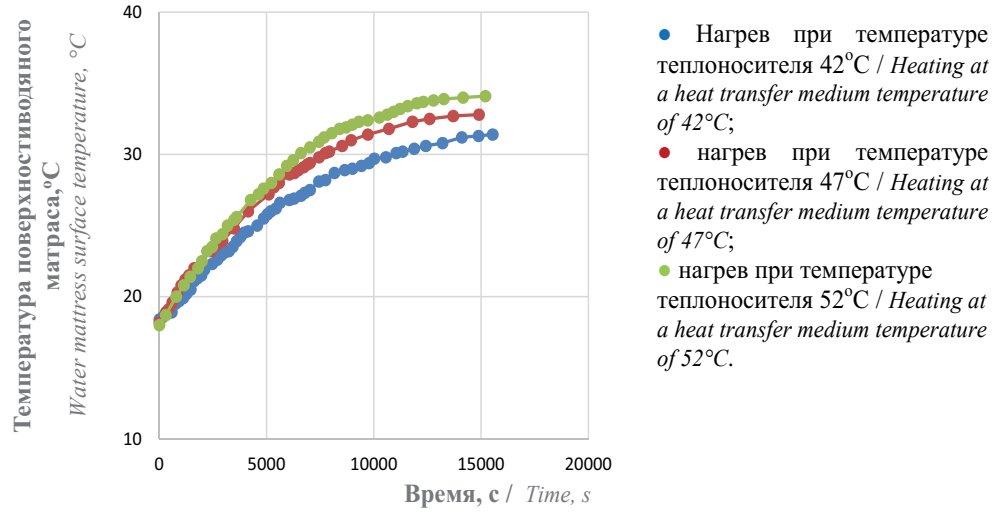


Рис. 5. Зависимость температуры поверхности водяного матраса от времени прокачивания теплоносителя при расходе 1,6 л/мин

Fig. 5. Relationship between the water mattress surface temperature and heat transfer medium pumping time at a flow rate of 1.6 L/min

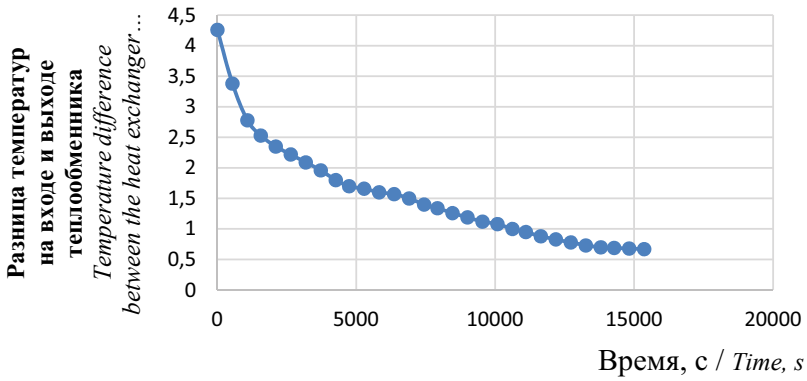


Рис. 6. Усредненная кривая разницы температур на входе и выходе теплообменника при температуре теплоносителя 47°С

Fig. 6. Averaged curve of the temperature difference between the heat exchanger inlet and outlet at a heat transfer medium temperature of 47°C

теплообменника при нагреве водяного матраса с учетом стационарной математической модели для расчетов теплопередачи от теплообменника к водяному матрасу.

Для количественной оценки соответствия расчетной кривой охлаждения экспериментальным данным выполнена проверка адекватности по критерию Фишера (рис. 7). Расчет проводили по шести контрольным точкам при 3-кратной повторности эксперимента. Температура поверхности водяного матраса в расчетной модели определялась по зависимости:

$$t_{расч}(\tau) = 16 + (51 - 16) \cdot \exp(-\tau / 7546{,}6),$$

где $t_{расч}(\tau)$ – расчетная температура поверхности водяного матраса, °С; τ – время охлаждения, с; 16°С – температура охлаждающего теплоносителя; 51°С – начальная температура поверхности матраса.

Результаты расчета дисперсии адекватности, дисперсии воспроизводимости и критерия Фишера представлены в таблице.

Поскольку расчетное значение критерия Фишера меньше критического значения (Fp = 1,84 < Fкр = = 3,106), расчетная модель охлаждения поверхности водяного матраса может быть признана адекватной экспериментальным данным на 5%-ном уровне значимости.

Установленные закономерности позволяют настраивать необходимые значения температуры наружной поверхности водяного матраса в зависимости от температуры теплоносителя при его нагреве или охлаждении и различных расходах теплоносителя. Поученные лабораторные данные могут быть применены в математических моделях при проектировании прототипа терморегулируемого водяного матраса для охлаждения или обогрева коров.

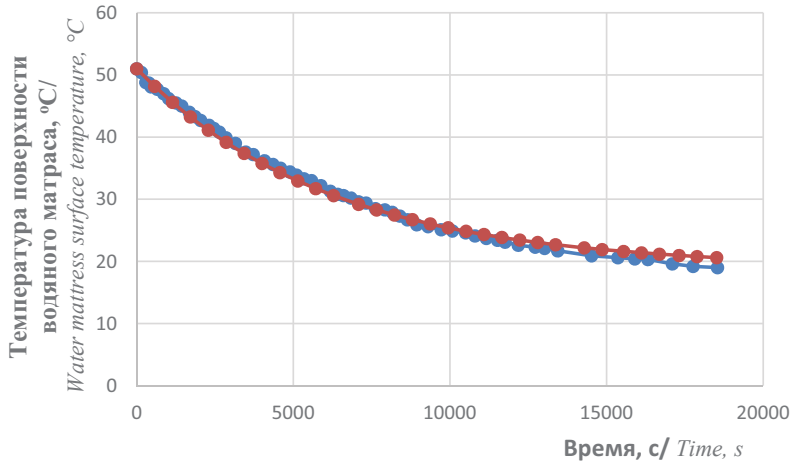


Рис. 7. Сопоставление теоретической и экспериментальной кривых охлаждения поверхности водяного матраса:
● – экспериментальная кривая; ● – теоретическая кривая

Fig. 7. Comparison of theoretical and experimental cooling curves for the water mattress surface:
● – experimental curve; ● – theoretical curve

Таблица

Результаты проверки адекватности расчетной модели охлаждения поверхности водяного матраса по критерию Фишера

Table

Results of testing the adequacy of the calculated cooling model of the water mattress surface using Fisher's criterion

Время τ, с	0	3600	7200	10800	14400	18540
Температура $t_{расч}$, °С	51	37,72	29,48	24,37	21,19	19
t1	50,2	36,5	28,5	23,6	20,3	18,5
t2	51,2	37,7	29,7	24,8	21,3	19,2
t3	51,6	37	30	23,9	21,1	19,3
tcp	51	37,2	29,4	24,1	20,9	19
s^2_i	0,52	0,39	0,63	0,39	0,28	0,19
S^2ад	0,2603					
S^2в	0,48					
Fp	1,84					

Выводы

1. Разработанный терморегулируемый водяной матрас для коров предназначен для снижения теплового стресса в летний период и возможного обогрева животных в холодное время года. Предложенная конструкция обеспечивает управляемое изменение температуры поверхности матраса за счет подачи теплоносителя через трубчатый теплообменник, расположенный внутри эластичного ложа.

2. Разработанные нестационарная и стационарная математические модели позволяют описать процесс теплообмена в системе «Теплоноситель – водяной матрас – мат – окружающая среда» и определить основные параметры нагрева и охлаждения поверхности матраса.

3. Экспериментальные исследования подтвердили закономерную зависимость температуры наружной поверхности водяного матраса от температуры и расхода теплоносителя. При повышении температуры теплоносителя до 42, 47 и 52°С наблюдается постепенный рост температуры поверхности матраса, а при подаче охлажденной воды происходит ее снижение. Увеличение расхода теплоносителя способствует более интенсивному изменению температуры поверхности, что подтверждает возможность регулирования теплового режима матраса.

4. Полученные результаты показывают, что терморегулируемый матрас может быть использован как элемент адаптивной системы обеспечения температурного комфорта для коров. Его применение позволит индивидуально воздействовать на животное в зоне отдыха, снижать риск теплового стресса, поддерживать более комфортные условия содержания и потенциально уменьшать потери молочной продуктивности в жаркий период года.

5. Дальнейшие исследования по установлению режимов автоматического управления температурой водяного матраса в зависимости от физиологических показателей коров (частоты дыхания и/или пульса) целесообразно провести в условиях животноводческой фермы.

Список источников

1. Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А. Влияние параметров среды коровника на физиологические показатели животных // Механизация электрификация сельского хозяйства. 2015. № 4. С. 18-21. EDN: UXPZNN

2. Вторый В.Ф., Вторый С.В. Информационная модель влияния теплового стресса на молочную продуктивность коров // Аграрный научный журнал. 2022. № 2. С. 69-72. https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp69-72

3. Berman A. Effects of body surface area estimates on predicted energy requirements and heat stress. Journal of Dairy Science. 2003;86(11):3605-3610. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73966-6

4. Иванов Ю.Г., Борулько В.Г., Понизовкин Д.А. Влияние параметров принудительной вентиляции на физиологические показатели коров при высоких значениях температуры и влажности воздуха в помещении // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2015. № 4 (20). С. 192-194. EDN: VBWKSH

5. Довлатов И.М., Комков И.В. Обоснование режимов работы автоматизированной системы для снижения теплового стресса КРС // Техника и технологии в животноводстве. 2025. Т. 15, № 1. С. 14-23. EDN: QPRGWE

6. Довлатов И.М., Комков И.В. Математическое имитационное моделирование автоматизированной системы для снижения теплового стресса и сходимость с теоретическими значениями // Аграрная наука. 2025. № 1. С. 114-120. EDN: CYTSOU

7. Berman A. Estimates of heat stress relief needs for Holstein dairy cows. Journal of Animal Science. 2005;83(6):1377-1384. https://doi.org/10.2527/2005.8361377x

8. Новиков Н.Н. Технические решения для обеспечения комфортных условий содержания животных в жаркое время // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 3 (47). С. 28-35. EDN: HCKTKX

9. Berman A. An overview of heat stress relief with global warming in perspective. International Journal of Biometeorology. 2019;63:493-498. https://doi.org/10.1007/s00484-019-01680-7

Reference

1. Ivanov Yu.G., Ponizovkin D.A. Influence of parameters of air pollution on the physiological indicators of barn animals. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2015;4:18-21. (In Russ.)

2. Vtorvy V.F., Vtorvy S.V. Information model of heat stress effect on lactation performance of cows. *Agrarian Scientific Journal*. 2022;2:69-72. (In Russ.) https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp69-72

3. Berman A. Effects of body surface area estimates on predicted energy requirements and heat stress. *Journal of Dairy Science*. 2003;86(11):3605-3610. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73966-6

4. Ivanov Yu.G., Borul'ko V.G., Ponizovkin D.A. Effect of mechanical ventilation parameters on the physiological responses of cows under high indoor air temperature and humidity. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatelskogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2015;4:192-194. (In Russ.)

5. Dovlatov I.M., Komkov I.V. Justification of cattle thermal stress reducing at automated systems' regimes operating. *Machinery and Technologies in Livestock***.** 2025;15(1):14-23. (In Russ.)

6. Dovlatov I.M., Komkov I.V. Mathematical simulation modeling of an automated system to reduce heat stress and convergence to theoretical values. *Agrarian Science***.** 2025;1:114-120. (In Russ.)

7. Berman A. Estimates of heat stress relief needs for Holstein dairy cows. Journal of Animal Science. 2005;83(6):1377-1384. https://doi.org/10.2527/2005.8361377x

8. Novikov N.N. Technical solutions for animals keeping comfortable conditions in hot weather ensuring. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2022;3:28-35. (In Russ.)

9. Berman A. An overview of heat stress relief with global warming in perspective. *International Journal of Biometeorology*. 2019;63:493-498. https://doi.org/10.1007/s00484-019-01680-7

10. Kolchik I.E., Novikov N.N. Engineering solutions for maintaining comfortable livestock housing conditions in hot weather. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2022;1(45):32-38. (In Russ.)

10. Кольчик И.Е., Новиков Н.Н. Усовершенствование технических решений водоиспарительных систем кондиционирования воздуха животноводческих помещений // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 1 (45). С. 32-38. EDN: DMCOXZ

11. Ortiz X.A. et al. Evaluation of conductive cooling of lactating dairy cows under controlled environmental conditions. Journal of Dairy Science. 2015;98(3):1759-1771. https://doi.org/10.3168/jds.2014-8583

12. Bastian K.R., Gebremedhin K.G., Scottet N.R. A finite difference model to determine conduction heat loss to a water-filled mattress for dairy cows. Transactions of the ASAE. 2003;46(3):773-780. https://doi.org/10.13031/2013.13592

11. Ortiz X.A. et al. Evaluation of conductive cooling of lactating dairy cows under controlled environmental conditions. *Journal of Dairy Science*. 2015;98(3):1759-1771. https://doi.org/10.3168/jds.2014-8583

12. Bastian K.R., Gebremedhin K.G., Scottet N.R. A finite difference model to determine conduction heat loss to a water-filled mattress for dairy cows. *Transactions of the ASAE*. 2003;46(3):773-780. https://doi.org/10.13031/2013.13592

Информация об авторах

[1] **Иванов Юрий Григорьевич,** д-р техн. наук, профессор; iy.electro@mail.ru; https: orcid.org//0000-0002-4766-9532; SPIN-код: 2490-7588

[2] **Рудобашта Станислав Павлович,** д-р техн. наук, профессор; rudobashta@mail.ru; https: orcid.org//0000-0002-3129-8562; SPIN-код: 4121-5567

[3] **Павлов Даниил Александрович,** аспирант; pavlovdaniil227@gmail.com

[1, 2, 3] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Author Information

Yuri G. Ivanov[1], DSc (Eng), Professor; iy.electro@mail.ru; https: orcid.org//0000-0002-4766-9532

Stanislav P. Rudobashta[2], DSc (Eng), Professor; rudobashta@mail.ru; https: orcid.org//0000-0002-3129-8562

Daniil A. Pavlov[3], PhD student; pavlovdaniil227@gmail.com

[1, 2, 3] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Вклад авторов

Иванов Ю.Г. – концептуализация, методология, программное обеспечение, формальный анализ, ресурсы создание черновика рукописи, получение финансирования;
Рудобашта С.П. – верификация данных, формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Павлов Д.А. – проведение экспериментальных исследований, ресурсы

Author Contribution

Yu.G. Ivanov – conceptualization, methodology, software, formal analysis, resources, writing – original draft, funding acquisition;
S.P. Rudobashta – validation, formal analysis, writing – review and editing of the manuscript;
D.A. Pavlov – investigation, resources.

Статья поступила 15.05.2026, после рецензирования и доработки 16.06.2026, принята к публикации 20.08.2026

Received 15.05.2026; Revised 16.06.2026; Accepted 20.08.2026