

EDN: LZQXUI

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-75-83



Научная статья

УДК 631.9 631/635/636.034



Математический аппарат контроллера с интеграцией этологических маркеров теплового стресса

Илья Владимирович Комков,
аспирант, младший научный сотрудник,
e-mail: ilyakomkov10@yandex.ru;

Игорь Мамедярович Довлатов,
канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
e-mail: dovlatovim@mail.ru

Федеральный научный агринженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Тепловой стресс представляет серьезную проблему в молочном животноводстве, приводит к снижению надоев, ухудшению репродуктивных показателей и увеличению заболеваемости скота. В условиях глобального потепления актуальность разработки эффективных систем мониторинга и регулирования микроклимата значительно возрастает. (*Цель исследования*) Разработка математического аппарата и алгоритмов работы контроллера, регулирующего уровень теплового стресса с использованием этологических признаков. (*Материалы и методы*) Проведен систематический анализ этологических реакций крупного рогатого скота (20 дойных коров), в том числе оценка поведенческих маркеров, физиологических параметров и микроклиматических условий. Для оценки теплового стресса использован температурно-влажностный индекс (THI). (*Результаты и обсуждение*) В ходе исследования идентифицированы 10 доминирующих поведенческих маркеров теплового стресса из 16 возможных: повышенное сердцебиение, снижение пищеварительной активности, повышенная избирательность пищи, увеличенное поение, учащенное дыхание, поиск затененных мест, увеличение времени лежания, изменение этологии и угнетение половой охоты. Разработан математический аппарат, включающий уравнения лучистой энергии, влагообмена, определения относительной влажности и температуры воздуха, концентрации углекислого газа. Также созданы алгоритмы для автоматизированного анализа фото- и видеоматериалов с целью выявления этологических признаков стресса. Данная система контроля обеспечивает точность измерений температурно-влажностного индекса ± 1 и снижение энергопотребления на 25 процентов по сравнению с аналогами. (*Выводы*) Созданная система позволяет оперативно выявлять ранние признаки теплового стресса и минимизировать его негативные последствия для продуктивности и благополучия животных. Интеграция данных о микроклимате и поведенческих реакциях животных обеспечивает комплексный подход к управлению микроклиматом в животноводческих помещениях. Предлагаемые математический аппарат и алгоритмы могут быть интегрированы в существующие системы управления микроклиматом, что повысит экономическую эффективность молочного животноводства в условиях климатических изменений.

Ключевые слова: молочный скот, тепловой стресс, продуктивность, ухудшение здоровье, контроллер, математический аппарат, этологические признаки, алгоритмы работы, температурно-влажностный индекс, климат-контроль.

Для цитирования: Комков И.В., Довлатов И.М. Математический аппарат контроллера с интеграцией этологических маркеров теплового стресса // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19. №4. С. 75-83. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-75-83. EDN: LZQXUI.

Scientific article

Mathematical Framework for a Heat Stress Control System Integrating Behavioral Markers

Ilia V. Komkov,
Ph.D. student (Eng.), junior researcher,
e-mail: ilyakomkov10@yandex.ru;

Igor M. Dovlatov,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: dovlatovim@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Heat stress presents a significant challenge in livestock farming, leading to decreased productivity, impaired reproductive performance, and increased morbidity. In the context of global warming, the need for effective systems to monitor and regulate the microclimate in animal environments is becoming increasingly important. (*Research purpose*) The aim of this study is to develop a mathematical framework and control algorithms for a system that regulates heat stress levels based on ethological indicators. (*Materials and methods*) A systematic analysis was conducted on the ethological responses of cattle based on observation of 20 dairy cows. The study included the assessment of behavioral markers, physiological parameters, and microclimatic conditions.

Heat stress levels were evaluated using the Temperature-Humidity Index (THI). (*Results and discussion*) The study identified 10 dominant behavioral markers of heat stress out of 16 possible, including elevated heart rate, reduced digestive activity, increased food selectivity, increased water intake, rapid breathing, seeking shaded areas, prolonged lying time, alterations in behavior patterns, and suppression of estrus. A mathematical framework was developed, incorporating equations for radiant energy, moisture exchange, relative humidity, air temperature, and carbon dioxide concentration. Additionally, algorithms were designed for the automated analysis of photo and video data to detect ethological indicators of stress. The proposed control system ensures accurate measurement of the Temperature-Humidity Index (± 1) and achieves a 25 percent reduction in energy consumption compared to existing systems. (*Conclusions*) The developed system enables early detection of heat stress symptoms and contributes to mitigating their negative impact on animal productivity and welfare. By integrating microclimate data with behavioral responses, the system offers a comprehensive approach to climate control in livestock housing. The proposed mathematical framework and control algorithms can be incorporated into existing microclimate control systems, thereby improving the economic efficiency of dairy farming under changing climate conditions.

Keywords: dairy cattle, heat stress, productivity, health deterioration, controller, mathematical framework, ethological indicators, control algorithms, temperature-humidity index, climate control.

For citation: Komkov I.V., Dovlatov I.M. Mathematical framework for a heat stress control system integrating behavioral markers. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 75-83 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-75-83. EDN: LZQXUI.

Бездействие высокой температуры и влажности вызывает тепловой стресс у сельскохозяйственных животных, что приводит к ухудшению их здоровья, снижению продуктивности и росту экономических потерь. Использование современных технических средств позволяет эффективно контролировать температурный режим в помещениях и минимизировать негативное влияние жары. Комплексный подход, основанный на достижениях науки и техники, способен обеспечить устойчивость перед вызовами изменений глобального климата [1, 2]. Это требует адаптации сельскохозяйственных систем путем создания и управления микроклиматом, оптимизации водопользования, а также цифровых технологий, обеспечивающих продовольственную и экологическую стабильность. Данная область остается актуальным направлением в аграрной науке [3, 4].

Для предупреждения и предотвращения теплового стресса проводятся научные исследования по созданию систем микроклимата в помещениях, выведению адаптированных пород крупного рогатого скота. Также рекомендуется разрабатывать и внедрять в рацион специальные кормовые добавки, локальные пастищные системы, гибридные модели прогнозирования и точного планирования [5].

Состояние теплового стресса у дойных коров вызывает нарушение гормонального баланса, окислительный стресс и апоптоз клеток, ухудшение reproductive способности и повышение риска потери эмбрионов. Снижается содержание жира и белка в молоке из-за нарушения липидного синтеза и азотистого обмена. Метаболические изменения выражаются в дефиците глюкозы, повышении уровня мочевины и кетоновых тел, в других отклонениях. Прогнозирование влияния теплового стресса на

дойных коров предполагает применение современных подходов, в том числе моделей машинного обучения, в зависимости от изменения температурно-влажностного индекса (*Temperature-Humidity Index, THI*) [6-8].

В Южной Корее при $THI > 72$ суточный удой снижается на 0,3-1,2 кг, содержание в молоке жира и белка – на 0,1-0,3%, наблюдаются гипертермия ($>39,5^{\circ}\text{C}$) и тахипноэ (>80 вдохов/мин). В Казахстане из-за зимнего отклонения температуры ($-1,7^{\circ}\text{C}$) и влажности (+9,6%) заболеваемость животных повышается до 63,8%, летом – до 37-47%. Экономические потери в обоих регионах достигают 5% выручки.

Согласно данным с болюсов активность животных увеличивалась с ростом относительной влажности воздуха (*RH*) до 45%, стабилизировалась в диапазоне 45-65% и резко возрастала при более высокой влажности, тогда как потребление воды снижалось [9-11].

В других исследованиях выявлены различия в реакции голштинских и джерсейских коров на тепловой стресс (*THI* 74,86 и 62,92). При *THI* 74,86 увеличилась частота дыхания и снизился удой у обеих пород, но у джерсейских отмечены лучшие показатели терморегуляции и качество молока. У коров тайско-голштинской популяции благодаря скрещиванию с местными породами порог стресса выше (*THI* 76). В регионе Латинской Америки, где в среднем 312 дней *THI* ≥ 68 , летом круглогодично и зимой течение 8-12 ч, коровы находятся в стрессе более 75% времени. При *THI* ≥ 72 удой падает на 6,7-11,8% [12, 13].

Летом из-за теплового стресса у дойных коров снижается лежание на 15% и увеличивается стояние на 20%. Циркадная ритмика проявляется в

утренне-вечерней активности кормления и ночном лежании. Ограниченнное пространство усиливает конкуренцию за кормушки, что коррелирует с ухудшением метаболизма и продуктивности. Исследования, проведенные в Краснодарском крае, показали, что при $THI > 72$ снижаются удой на 10-25%, содержание жира и белка на 0,1-0,3%. Отмечаются гематологические изменения (повышение температуры тела, частоты дыхания, уровня кортизола, времени стояния), увеличивающие риск мастита и кетоза [14, 15].

У животных повышаются температура глаз (*IRT-Eye*), частота дыхания (80-100 вдохов/мин), уровень кортизола (30-40%), потребление воды (50%). 70% животных перемещаются в тень, снижается кормовая активность (15-20%) [16, 17].

Увеличивается время стояния (18-23%), снижаются лежание (18-22%) и руминация (30%), животные чаще посещают поилки (40-45%). Физиологические изменения проявляются в повышении температуры тела (до 39,8 °C), дыхания (72 вдохов/мин), кортизола (42%) и лактата (28%), снижении pH крови (7,31). Эти поведенческие и физиологические показатели служат ранними индикаторами стресса, за 2-3 ч до его клинических проявлений [18, 19].

С целью снижения теплового стресса у коров предлагается система обеспечения температурных режимов, устойчивая к агрессивному влиянию внешней среды, герметичная и малошумная (не более 65-70 дБ). Устанавливается оборудование точечного обдува воздухом над животными или в зоне отдыха с возможностью увлажнения мелкодисперсной жидкостью или дезинфекции помещений в присутствии животных. Разработанные алгоритмы позволяют минимизировать термический стресс и поддерживать комфортные условия для скота [20].

Разработана система регулирования уровня теплового стресса КРС с использованием прецизионной вентиляции и адаптивного увлажнения воздуха. С помощью датчиков THI обеспечивается контроль с точностью ± 1 ед., снижается энергопотребление на 25%, капитальные затраты на 24% по сравнению с использованием вентиляционного рукава ГСВ-100, эксплуатационные расходы сокращаются на 18% [21, 22].

Путем моделирования воздушных потоков выявлена вертикальная стратификация температуры в помещениях. Коньковые зазоры способствуют оттоку теплого воздуха, но их эффективность ограничена. В проектировании систем вентиляции применяется *CFD*-моделирование для точного прогнозирования теплового стресса с учетом физиологических параметров животных и климатических факторов [23].

Цель исследования: разработка математического аппарата и алгоритмов работы контроллера, ре-

гулирующего уровень теплового стресса коров с использованием этологических признаков.

МATERIALY I METODY. Аналитическая информация формировалась из открытых источников данных *eLibrary*, *MDPI*, *Google Scholar*. Хозяйственный эксперимент проводился в 2023 г. на базе ФГБУ «Опытная Станция «Григорьевское» (Ярославская область). Для опыта были отобраны 20 лактирующих коров голштинской породы ($n = 20$) в типовом коровнике привязного содержания с естественной вентиляцией при температурном режиме 15-25 °C. Животные были распределены в группы по принципу пар-аналогов с учетом живой массы (650 ± 15 кг), стадии лактации (120 ± 10 дней) и исходного удоя ($12 \pm 0,8$ кг/сут).

Тепловой стресс моделировался в течение 48-часового периода с поддержанием температурно-влажностного индекса $THI \geq 77$. Параметры микроклимата контролировали с помощью датчиков *Novo UI2-012*, обеспечивающих непрерывный мониторинг температуры и относительной влажности воздуха. Изменения в этологии животных фиксировались на основании визуальной оценки поведенческих реакций, стандартизованных протоколов наблюдения, анализа индивидуальной и групповой активности. Молочную продуктивность устанавливали по контролльному доению до наступления теплового стресса 13 июля (15 °C) и на вторые сутки после его наступления 9 августа (тепловой стресс наблюдался 7 августа при 29 °C). Молоко коров собирали в пластиковые контейнеры без добавления консерванта, анализировали в нем содержание жира, белка и количество соматических клеток на приборах «Лактан 1-4М Профи», «СОМАТОС-Мини».

Исследование проведено с соблюдением этических норм и обеспечением здоровья крупного рогатого скота. Животные наблюдались в естественных условиях проживания с тем оснащением, которое на момент эксперимента было на ферме. Данные о молочной продуктивности и качестве молока представлены в *таблице 1*.

До наступления теплового стресса среднесуточный удой коров составлял 12,0 кг. После воздействия теплового стресса ($THI \geq 77$) наблюдалось снижение продуктивности на 13,5%, что согласуется с установленным влиянием термического стресса на физиологические показатели животных. Задокументировано ухудшение показателей качества молока. Содержание молочного жира и белка снизилось на 0,28 и 0,20% соответственно, что может быть связано с нарушением метаболических процессов в организме коров. Увеличение на 27,0% количества соматических клеток указывает на возможное развитие стресс-индуцированных физиологических дисфункций, требующих дальнейшего изучения в контексте зоогигиенических норм.

Таблица 1

СРЕДНИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА МОЛОКА ($N = 20$) AVERAGE MILK YIELD AND MILK QUALITY INDICATORS ($N = 20$)		
Показатель	$M \pm m$	δ
<i>До начала теплового стресса</i>		
Суточный удой, кг	12,0±0,76	2,42
Массовая доля жира, %	3,70±0,04	0,14
Массовая доля белка, %	3,39±0,01	0,05
Количество соматических клеток, тыс./см ³	248,10±7,61	24,07
<i>После воздействия теплового стресса</i>		
Суточный удой, кг	10,38±0,66	2,09
Массовая доля жира, %	3,42±0,04	0,13
Массовая доля белка, %	3,18±0,01	0,04
Количество соматических клеток, тыс./см ³	315,09±9,67	30,56

Для идентификации теплового стресса используется разработанная ранее формула [24]:

$$THI = 0,8 \cdot T + K \cdot RH (T - 14,4), \quad (1)$$

где T – температура окружающей среды, °C; RH – относительная влажность воздуха в помещении, $RH = 0,50\%$; K – поправочный коэффициент, учитывающий влияния влажности кормов, $K=0,95-1,05$ в зависимости от вида корма (0,95 – молотое зерно; 1,00 – гранулированные комбикорма; 1,05 – сочные корма с высоким содержанием влажности).

Для обработки полученных данных использовали пакет программ *Microsoft Office*, в частности *Microsoft Excel* (США). Функционально-структурные схемы разработаны с помощью онлайн-приложения для создания диаграмм и схем *Draw.io*.

По таблице теплового стресса (рис. 1) [24] определяли начало его воздействия.

φ °C	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35
50%	0,82	0,93	1,02	1,17	1,33	1,49	1,63	1,79
55%	0,83	1	1,16	1,25	1,39	1,56	1,72	1,83
60%	0,86	1,04	1,18	1,31	1,46	1,6	1,76	1,88
65%	0,88	1,09	1,21	1,39	1,56	1,82	1,86	1,98
70%	0,92	1,12	1,26	1,46	1,69	1,97	2,01	2,09
75%	0,96	1,12	1,28	1,61	1,92	2,06	2,18	2,28
80%	1	1,18	1,34	1,68	1,98	2,25	2,33	2,46

Рис. 1. Зависимость индекса теплового стресса от температуры и относительной влажности воздуха
Fig. 1. Dependence of the heat stress index on air temperature and relative humidity

Результаты и обсуждение. На основании наблюдений у 100% обследованных коров отмечено развитие тахипноэ, активный поиск затененных зон, усиление водопотребления и выраженные изменения в этологическом поведении (табл. 2).

Выявлены признаки общей вялости (75% животных), тахикардии (70%), снижение секреторной активности желудочно-кишечного тракта (50%). Наблюдались угнетение охоты и повышен-

Таблица 2

ЭТОЛОГИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ЖИВОТНЫМИ ($N = 20$) ETHOLOGICAL MONITORING OF EXPERIMENTAL CATTLE ($N = 20$)		
Этологический признак	Количество коров с выявленным признаком	% от общего количества
Повышение частоты сердечных сокращений	14	70
Снижение пищеварительной активности	10	50
Учащение дыхания	20	100
Поиск затененных мест	20	100
Снижение качества рогового слоя	8	35
Изменение этологии	20	100
Увеличение времени лежания	10	50
Угнетение половой охоты	12	60
Повышение потливости (гипергидроз)	12	60
Возникновение хромоты	10	50
Отслоение роговой пластины	7	35
Повышение избирательности пищи	10	50
Повышенное поение	20	100
Повышение агрессивности	4	20
Повышение общей тревожности	11	55
Общая вялость	15	75

ная потливость (60%), агрессивное поведение (20%), усиление общей тревожности (55%), Зафиксированы повышение избирательности пищи, увеличение времени лежания, развитие клинически выраженной хромоты. У 40% животных хромота была непосредственно связана с влиянием теплового стресса. Выявлено отслоение роговой пластины у 35% коров.

По сопоставлению научных данных и результатов эксперимента разработана интегративная функционально-структурная схема, описывающая механизмы адаптации организма КРС к тепловому стрессу (рис. 2). Такая модель может служить основой для оптимизации стратегий управления микроклиматом и кормлением в условиях климатических изменений.

Возникновение теплового стресса у крупного рогатого скота обусловлено взаимодействием факторов, которые совместно выступают причинными элементами его развития.

На основе интегративной модели адаптации к тепловому стрессу предложено создать структурированную базу данных для автоматизированной оценки поведенческого профиля животных.



Рис. 2. Функциональная схема патофизиологических реакций на тепловой стресс

Fig. 2. Functional diagram of pathophysiological reactions to heat stress

Технологии видеонаблюдения и алгоритмы машинного обучения позволяют выявлять ранние признаки стресса и оптимизировать параметры содержания скота в условиях климатических изменений. Данный подход объединяет физиологические показатели (изменения руминации, активности, микроклимата) с поведенческими индикаторами, обеспечивая комплексный анализ адаптационных реакций.

Для обеспечения высокоточного функционирования системы управления микроклиматом разработан математический аппарат, представляющий собой комплексную модель, включающую уравнения определения лучистой энергии ($Q_{\text{л}}$), количество тепла, которое необходимо отвести или добавить в помещение ($Q_{\text{в}}$), расчета влагообмена ($W_{\text{в}}$), относительной влажности (W) и температуры (t) воздуха, концентрации углекислого газа (CCO_2), а также индекса температуры и влажности (THI), служащего критически важным показателем для объективной оценки условий теплового стресса и физиологических реакций животных.

$$Q_{\text{л}} = C_{\text{пр}} F_u \left[\left(\frac{T_{\text{ж}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{огр}}}{100} \right)^4 \right] \phi_{\text{ж-огр}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{л}}$ – лучистая энергия, кДж; $C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения; F_u – площадь излучаемой поверхности, м^2 ; $T_{\text{ж}}$ – абсолютная температура излучающей поверхности, K ; $T_{\text{огр}}$ – абсолютная температура поверхности ограждения, K ; $\phi_{\text{ж-огр}}$ – коэффициент облученности в системе животные – ограждения.

$$\pm Q_{\text{в}} = Q_{\text{ж}} + Q_{\text{пж}} + Q_{\text{ср}} + Q + Q_{\text{корм}} + \\ + Q_{\text{ж корм}} - Q_{\text{исп к}} - Q_{\text{исп пж}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{в}}$ – количество тепла, которое необходимо отводить или добавлять в помещение, Вт; $Q_{\text{ж}}$ – тепло, поступающее от животных, Вт; $Q_{\text{пж}}$ – теплопоступления от продуктов жизнедеятельности, Вт; $Q_{\text{ср}}$ – среднечасовое потребление тепловой энергии, Вт;

Q – годовое потребление тепловой энергии, Вт; $Q_{\text{корм}}$ – тепловыделение от кормов, Вт; $Q_{\text{ж корм}}$ – выделение тепла от переваривания корма, Вт; $Q_{\text{исп к}}$ – тепло, расходуемое на испарение влаги из кормов, Вт; $Q_{\text{исп пж}}$ – тепло, расходуемое на испарение влаги из продуктов жизнедеятельности, Вт.

$$W_{\text{в}} = W_{\text{вп}} + W_{\text{дж}} + W_{\text{корм}} + W_{\text{п}} + W_{\text{от ж}}, \quad (4)$$

где $W_{\text{в}}$ – количество влаги, которое необходимо удалить из помещения, кг/ч; $W_{\text{дж}}$ – количество влаги, поступающей в результате дыхания животных, кг/ч; $W_{\text{вп}}$ – количество влаги внутри помещения на поверхности ограждений, кг/ч; $W_{\text{корм}}$ – количество влаги, поступающей с кормом, кг/ч; $W_{\text{п}}$ – количество влаги, поступающей с приточным воздухом, кг/ч; $W_{\text{от ж}}$ – количество влаги, поступающей от отходов жизнедеятельности, кг/ч.

$$W = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где W – относительная влажность воздуха, %; p – абсолютная влажность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; p_0 – плотность насыщенного водяного пара при текущей температуре, $\text{кг}/\text{м}^3$.

$$t = \frac{t_p - t_r}{2}, \quad (6)$$

где t – температура в помещении, $^{\circ}\text{C}$; t_p – температура воздуха в помещении, $^{\circ}\text{C}$; t_r – температура внутренней поверхности пола, стен, оборудования, $^{\circ}\text{C}$.

$$\text{CCO}_2 = 0,03 \cdot V_a / V_{\text{п}}, \quad (7)$$

где 0,03 – содержание углекислого газа в атмосферном воздухе, %; V_a – объем атмосферного воздуха, прошедшего через поглотитель, м^3 ; $V_{\text{п}}$ – объем воздуха внутри помещения, прошедшего через поглотитель, м^3 .

Эффективное регулирование температуры, влажности и скорости воздушного потока в животноводческих помещениях достигается за счет применения технических устройств:

- осевых и потолочных вентиляторов. Они обеспечивают принудительную вентиляцию, повышают обмен воздуха и способствуют отводу избыточного тепла от тела животных. Работа вентиляторов позволяет снизить температуру в зоне содержания скота на 2-5 $^{\circ}\text{C}$, что критично для предотвращения тахипноэ и гипертермии;

- гибких штор для регулирования притока наружного воздуха и защиты животных от прямого солнечного излучения. Адаптация положения животных в зависимости от времени суток и погодных условий позволяет оптимизировать температурно-влажностный режим в помещениях;

- гибких воздуховодов, которые направляют потоки охлажденного воздуха непосредственно к зонам

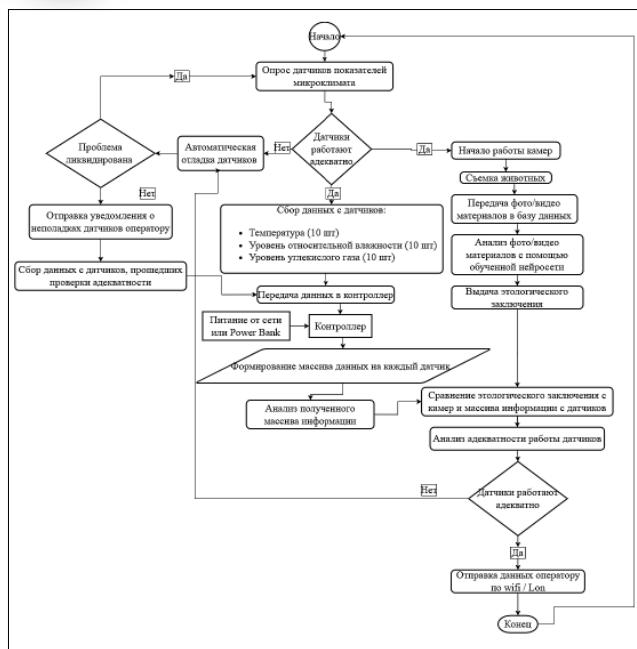


Рис. 3. Алгоритм работы контроллера

Fig. 3. Controller operation algorithm

содержания скота, обеспечивая локальное снижение температуры и улучшая терморегуляцию у коров.

Все эти механизмы подчиняются централизованному контроллеру, который анализирует данные с датчиков температуры, влажности и скорости воздуха, а также значения индекса температуры и влажности. На основе этих параметров автоматически регулируются мощность вентиляторов, положение штор и направление воздушных потоков, обеспечивая стабильные микроклиматические условия в оптимальном диапазоне (5-25 °C).

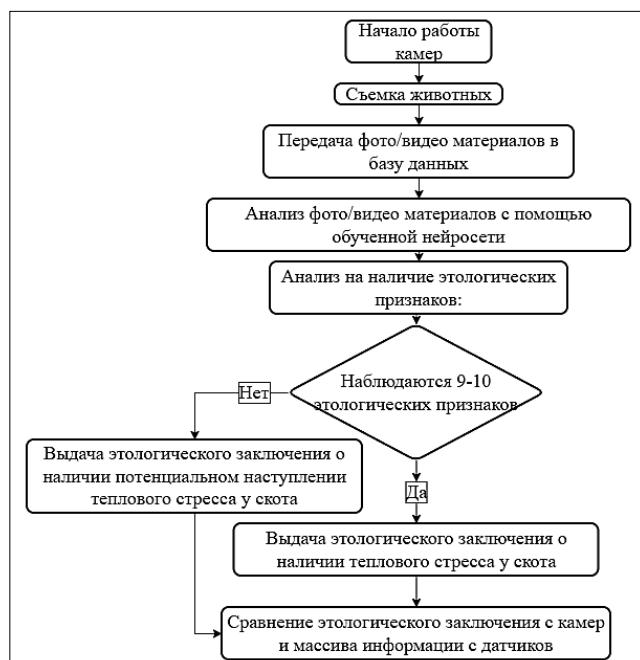
Использование исполнительных механизмов в сочетании с автоматизированным контролем микроклимата представляет собой перспективную стратегию снижения негативного влияния теплового стресса. Это направление требует дальнейших исследований с целью оптимизации энергоэффективности и масштабирования на малые хозяйства.

Необходимо использовать современные технологии, например контроллер, для идентификации и регулирования теплового стресса. На данном этапе исследований предполагаются идентификация теплового стресса и уведомление оператора о его наступлении (рис. 3). В последующем функционал дополнится, и будут передаваться указания исполнительным механизмам для регулирования микроклиматических параметров в помещении.

В соответствии с алгоритмом работы контроллера вначале запускается опрос датчиков показателей микроклимата. Если датчики работают адекватно, то с них осуществляется сбор данных. При отрицательном ответе происходит автоматическая отладка датчиков, их повторный опрос, оператору

отправляется уведомление о неполадках. Данные с прошедших проверку датчиков собираются и передаются в контроллер. По каждому датчику формируется массив данных и проводится анализ.

Для определения этологического состояния животных при положительной проверке адекватности начинают работать фото/видеокамеры (рис. 4). Фото/видеоматериал отправляется в базу данных, осуществляется его анализ с целью выявления этологических признаков теплового стресса и на основе этого формируется этологическое заключение. Проводится сравнение этологического заключения съемки с камера и массива информации с датчиков, затем дополнительно осуществляется анализ адекватности работы датчиков. При подтверждении их адекватности данные о наступлении теплового стресса отправляются оператору и на персональный компьютер. В случае отрицательного ответа происходит возврат к автоматической отладке датчиков и далее.

Рис. 4. Алгоритм оценки этологических признаков
Fig. 4. Algorithm for assessing ethological markers

Анализ полученного материала заключается в определении наличия этологических признаков у животных: повышенная ЧСС; сниженная пищеварительная активность; повышенная избирательность корма; повышенное поение; учащенное дыхание; поиск затененных мест; увеличение времени лежания; изменение этологии; угнетение половой охоты; повышенная потливость; возникновение хромоты; повышенная общая тревожность; общая вялость. При обнаружении хотя бы 9-10 из 13 этологических признаков выдается заключение о наличии теплового стресса.

При отрицательном ответе выдается этологическое заключение о потенциальном наступлении у животных теплового стресса. После этого проводится сравнение этологического заключения с кадером и массива информации с датчиков.

Выходы. Разработанный математический аппарат, включающий уравнения радиационного теплового баланса, влагообмена и температурно-влажностного индекса, обеспечивает высокоточное управление микроклиматом в условиях теплового стресса.

Идентификация 10 ключевых этологических

маркеров из 16 возможных и патофизиологических реакций позволяет оперативно выявлять и минимизировать негативные последствия влияния от теплового воздействия на продуктивность скота.

Разработанные алгоритмы обеспечивают оптимальное функционирование системы управления и комплексную оценку поведенческих маркеров.

Предложена комплексная функциональная схема, отражающая мультисистемные патофизиологические реакции организма животных на тепловое воздействие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Чаплыгин М.Е., Ценч Ю.С., Подзоров А.В. Развитие конструкций сеялок и технологий посева семян в ленте // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19. N1. С. 103-110. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-103-110.
- Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Беляева Н.И. Автоматизированная почвообрабатывающая машина для послойной обработки почвы высокотурбулентной воздушной струей // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19. N2. С. 78-83. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-78-83.
- Киприянов Ф.А., Алешкин А.В., Савиных П.А. Экспериментально-математическое моделирование процесса удаления поверхностной влаги с семян после увлажнения // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19. N1. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-4-12.
- Каличкин В.К., Максимович К.Ю., Алещенко О.А., Алещенко В.В. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур: структура данных и методы искусственного интеллекта // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19. N2. С. 33-44. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-33-44.
- Muzzo B.I., Ramsey R.D., Villalba J.J. Changes in climate and their implications for cattle nutrition and management. *Climate*. 2025. N13 (1). DOI: 10.3390/cli13010001.
- Capela L., Leites I., Pereira R.M.L.N. Heat stress from calving to mating: mechanisms and impact on cattle fertility. *Animals*. 2025. N15. 1747. DOI: 10.3390/ani15121747.
- Antanaitis R., Džermeikaitė K., Krištolaitytė J. et al. Impact of heat stress on the in-line registered milk fat-to-protein ratio and metabolic profile in dairy cows. *Agriculture*. 2024. N14. 203. DOI: 10.3390/agriculture14020203.
- Giannone C., Bovo M., Ceccarelli M. et al. Review of the heat stress-induced responses in dairy cattle. *Animals*. 2023. N13. 3451. DOI: 10.3390/ani13223451.
- Assatbayeva G., Issabekova S., Uskenov R. et al. Influence of microclimate on ketosis, mastitis and diseases of cow reproductive organs. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022. N10(3). 2230. DOI: 10.31893/jabb.22030.
- Jeon E., Jang S., Yeo J.-M. et al.. Impact of climate change and heat stress on milk production in korean holstein cows: a large-scale data analysis. *Animals*. 2023. N13. 2946. DOI: 10.3390/ani13182946.
- Barto A.O., Bailey D.W., Trieu L.L. et al. monitoring behavior and welfare of cattle in response to summer weather in an arizona rangeland pasture using a commercial rumen bolus. *Animals*. 2025. N15. 1448. DOI: 10.3390/ani15101448.
- Wang Z., Guo M., Liang Y. et al. Breed-specific responses and ruminal microbiome shifts in dairy cows under heat stress. *Animals*. 2025. N15. 817. DOI: 10.3390/ani15060817.
- Rodriguez-Venegas R., Meza-Herrera C.A., Robles-Trillo P.A. et al. Heat stress characterization in a dairy cattle intensive production cluster under arid land conditions: an annual, seasonal, daily, and minute-to-minute, big data approach. *Agriculture*. 2022. N12. 760. DOI: 10.3390/agriculture12060760.
- Кузьминова Е.В., Семененко М.П., Абрамов А.А. и др. Проблема теплового стресса в молочном животноводстве // Ветеринария Кубани. 2020. N3. С. 10-11. DOI: 10.33861/2071-8020-2020-3-10-11.
- Leliveld L.M.C., Riva E., Mattachini G., Finzi A. et al. Dairy cow behavior is affected by period, time of day and housing. *Animals*. 2022. N12. 512. DOI: 0.3390/ani12040512.
- Idris M., Sullivan M., Gaughan J.B., Phillips C.J.C. The relationship between the infrared eye temperature of beef cattle and associated biological responses at high environmental temperatures. *Animals*. 2024. N14. 2898. DOI: 10.3390/ani14192898.
- Idris M., Sullivan M., Gaughan J.B., Phillips C.J.C. Behavioural responses of beef cattle to hot conditions. *Animals*. 2024. N14. 2444. DOI: 10.3390/ani14162444.
- Antanaitis R., Džermeikaitė K., Krištolaitytė J. et al. Short-term effects of heat stress on cow behavior, registered by innovative technologies and blood gas parameters. *Animals*. 2024. N14. 2390. DOI: 10.3390/ani14162390.
- Antanaitis R., Džermeikaitė K., Bespalovaitė A. et al. Assessment of ruminating, eating, and locomotion behavior during heat stress in dairy cattle by using advanced technological monitoring. *Animals*. 2023. N13. 2825. DOI: 0.3390/ani13182825.
- Комков И.В., Довлатов И.М., Павкин Д.Ю., Матве-

- ев В.Ю. Разработка алгоритмов управления системы обеспечения температурных режимов для уменьшения стресса животных // *Вестник НГИЭИ*. 2024. N5 (156). С. 7-18. DOI: 10.24412/2227-9407-2024-5-7-18.
21. Довлатов И.М., Комков И.В., Матвеев В.Ю. Повышение рентабельности молочных ферм через адаптацию к глобальному потеплению: анализ NPV автоматизированных систем и стратегии для Южного федерального округа // *Вестник НГИЭИ*. 2025. N6(169). С. 82-91. DOI: 10.24412/2227-9407-2025-6-82-91.
22. Комков И.В., Довлатов И.М., Юрочка С.С. и др. Обоснование современной системы обеспечения темпе-
- ратурных режимов для уменьшения стресса животных // *Аграрный научный журнал*. 2024. N11. С. 142-149. DOI: 10.28983/asj.y2024i11pp142-149.
23. Colombari D., Masoero F., Della Torre A. A CFD Methodology for the modelling of animal thermal welfare in hybrid ventilated livestock buildings. *AgriEngineering*. 2024. N6. 1525-1548. DOI: 0.3390/agriengineering6020087.
24. Довлатов И.М., Комков И.В., Базаев С.О. Влияние теплового стресса, определение температурно-влажностного индекса // *Аграрная наука*. 2024. N10. С. 171-176. DOI: 10.32634/0869-8155-2024-387-10-171-176.

REFERENCES

- Chaplygin M.E., Tsench Yu.S., Podzorov A.V. Development of seeder designs and technologies of seed tape planting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 103-110 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-103-110.
- Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Belyaeva N.I. Automated layer-by-layer soil tillage machine using a highly turbulent air jet. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 78-83 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-78-83.
- Kipriyanov F.A., Aleshkin A.V., Savinykh P.A. Experimental-mathematical modeling of surface moisture removal from pre-moistened seeds. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-4-12.
- Kalichkin V.K., Maksimovich K.Yu., Aleshchenko O.A., Aleshchenko V.V. Crop yield prediction: data structure and ai-powered methods. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 33-44 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-33-44.
- Muzzo B.I., Ramsey R.D., Villalba J.J. Changes in climate and their implications for cattle nutrition and management. *Climate*. 2025. N13(1) (In English). DOI: 10.3390/cli13010001.
- Capela L., Leites I., Pereira R.M.L.N. Heat stress from calving to mating: mechanisms and impact on cattle fertility. *Animals*. 2025. N15. 1747 (In English). DOI: 10.3390/ani15121747.
- Antanaitis R., Džermeikaitė K., Krištolaitytė J. et al. Impact of heat stress on the in-line registered milk fat-to-protein ratio and metabolic profile in dairy cows. *Agriculture*. 2024. N14. 203 (In English). DOI: 10.3390/agriculture14020203.
- Giannone C., Bovo M., Ceccarelli M. et al P. Review of the heat stress-induced responses in dairy cattle. *Animals*. 2023. N13. 3451 (In English). DOI: 10.3390/ani13223451.
- Assatbayeva G., Issabekova S., Uskenov R. et al. Influence of microclimate on ketosis, mastitis and diseases of cow reproductive organs. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022. N10 (3). 2230 (In English). DOI: 10.31893/jabb.22030.
- Jeon E., Jang S., Yeo J.-M. et al. Impact of climate change and heat stress on milk production in korean holstein cows: a large-scale data analysis. *Animals*. 2023. N13. 2946 (In English). DOI: 10.3390/ani13182946.
- Barto A.O., Bailey D.W., Trieu L.L. et al. Monitoring behavior and welfare of cattle in response to summer weather in an arizona rangeland pasture using a commercial rumen bolus. *Animals*. 025. N15. 1448 (In English). DOI: 10.3390/ani15101448.
- Wang Z., Guo M., Liang Y. et al. Breed-specific responses and ruminal microbiome shifts in dairy cows under heat stress. *Animals*. 2025. N15. 817 (In English). DOI: 10.3390/ani15060817.
- Rodriguez-Venegas R., Meza-Herrera C.A., Robles-Trillo P.A. et al. Heat stress characterization in a dairy cattle intensive production cluster under arid land conditions: an annual, seasonal, daily, and minute-to-minute, big data approach. *Agriculture*. 2022. N12. 760 (In English). DOI: 10.3390/agriculture12060760.
- Kuzminova E.V., Semenenko M.P., Abramov A.A. et al. Heat stress problem in dairy farming. *Veterinaria Kubani*. 2020. N3. 10-11 (In Russian). DOI: 10.33861/2071-8020-2020-3-10-11.
- Leliveld L.M.C., Riva E., Mattachini G. et al. Dairy cow behavior is affected by period, time of day and housing. *Animals*. 2022. N12. 512 (In English). DOI: 10.3390/ani12040512.
- Idris M., Sullivan M., Gaughan J.B., Phillips C.J.C. The relationship between the infrared eye temperature of beef cattle and associated biological responses at high environmental temperatures. *Animals*. 2024. N14. 2898 (In English). DOI: 10.3390/ani14192898.
- Idris M., Sullivan M., Gaughan J.B., Phillips C.J.C. Behavioural responses of beef cattle to hot conditions. *Animals*. 2024. N14. 2444 (In English). DOI: 10.3390/ani14162444.
- Antanaitis R., Džermeikaitė K., Krištolaitytė J. et al. Short-term effects of heat stress on cow behavior, registered by innovative technologies and blood gas parameters. *Animals*. 2024. N14. 2390 (In English). DOI: 10.3390/ani14162390.
- Antanaitis R., Džermeikaitė K., Bespalovaitė A. et al. Assessment of ruminating, eating, and locomotion behavior during heat stress in dairy cattle by using advanced technological monitoring. *Animals*. 2023. N13. 2825 (In

- English). DOI: 10.3390/ani13182825.
20. Komkov I.V., Dovlatov I.M., Pavkin D.Yu., Matveev V.Yu. Development of control algorithms for temperature control systems to reduce animal stress. *Bulletin NGIEI*. 2024. N5 (156). 7-18 (In Russian). DOI: 10.24412/2227-9407-2024-5-7-18.
21. Dovlatov I.M., Komkov I.V., Matveev V.Yu. Improving dairy farm profitability through adaptation to global warming: NPV analysis of automated systems and strategies for the Southern Federal District. *Bulletin NGIEI*. 2025. N6(169). 82-91 (In Russian). DOI: 10.24412/2227-9407-2025-6-82-91.
22. Komkov I.V., Dovlatov I.M., Yurochka S.S. et al. Substan-
- tiation of a modern temperature control system for reducing animal stress. *Agrarian Scientific Journal*. 2024. N11. 142-149 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2024i11pp142-149.
23. Colombari D., Masoero F., Della Torre A.A. CFD methodology for the modelling of animal thermal welfare in hybrid ventilated livestock buildings. *AgriEngineering*. 2024. N6. 1525-1548 (In English). DOI: 10.3390/agriengineering6020087.
24. Dovlatov I.M., Komkov I.V., Bazaev S.O. et al. Effect of heat stress, determination of temperature-humidity index. *Agrarian Science*. 2024. N10. 171-176 (In Russian). DOI: 10.32634/0869-8155-2024-387-10-171-176.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Комков И.В. – литературный обзор, обработка результатов исследования, формирование текста и визуализация;

Довлатов И.М. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, доработка текста и общих выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Komkov I.V. – literature review, processing of research results, manuscript drafting, and visualization;

Dovlatov I.M. – scientific supervision, formulation of the main research directions, manuscript revision, and development of general conclusions.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

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

04.09.2025
25.11.2025