

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-16-23>

Математическая модель очистки кожного покрова коров для повышения интенсивности теплового обмена при тепловых стрессах

Ю.Г. Иванов¹, Д.А. Понизовкин², Ж.Б. Жумагулов³, А.М. Мошонкин⁴^{1,2,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия³ Казахский национальный аграрный исследовательский университет; г. Алматы, Казахстан¹ iy.electro@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4766-9532>² ponizovkin.d@gmail.com³ zhandos.79@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1813-902X>⁴ a.moshonkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6624-4847>

Аннотация. Автоматические щёточные устройства, улучшающие санитарно-гигиеническое состояние кожного покрова животных и создающие комфортные условия, получают широкое распространение в современных молочных фермах. С целью проверки разработанной математической модели очистки кожного покрова коров на молочной ферме проведены экспериментальные исследования на 10 животных. На боковой поверхности каждого животного выбирались три зоны площадью 10×10 см²: первый участок не очищался; второй участок очищался «сухим способом» с помощью щётки; третий подвергался «влажной» очистке щёткой с моющим средством (мыльный раствор). Температура участков кожного покрова определялась в течение 15 мин бесконтактным способом с использованием пирометра. Результаты исследований подтвердили влияние очистки кожного покрова на интенсивность теплообмена животных за счёт повышения конвекции и испарения при тепловых стрессах. Установлено, что наиболее эффективна влажная очистка, при которой температура кожного покрова за счёт увеличения теплоотдачи испарением снижается на 4,1°C, тогда как после сухой очистки она составляет 0,7°C. Разработанная математическая модель очистки кожного покрова коров устанавливает соотношение между параметрами воздействия ворса щётки на загрязненную поверхность кожи, щёточного устройства и режимов очистки. Полученные зависимости позволяют определить технические требования и рациональные конструктивно-режимные параметры щёточного устройства для создания автоматической станции очистки кожного покрова коров на фермах.

Ключевые слова: математическая модель, тепловой стресс, коровы, автоматическая щётка, интенсивность теплового обмена, температура кожного покрова, очистка кожного покрова коров, влажная очистка, параметры щёточного устройства

Финансирование: Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет–2030» (Соглашение № 075-15-2023-220 от 16.02.2023).

Для цитирования: Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Жумагулов Ж.Б., Мошонкин А.М. Математическая модель очистки кожного покрова коров для повышения интенсивности теплового обмена при тепловых стрессах // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 16-23. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-16-23>.

ORIGINAL PAPER

Mathematical model of cow skin cleaning used to increase heat exchange intensity under heat stresses

Yu.G. Ivanov¹, D.A. Ponizovkin², Zh.B. Zhumagulov³, A.M. Moshonkin⁴^{1,2,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia³ Kazakh National Agrarian Research University; Almaty, Kazakhstan¹ iy.electro@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4766-9532>² ponizovkin.d@gmail.com³ zhandos.79@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1813-902X>⁴ a.moshonkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6624-4847>

Abstract. Automatic brushing devices that improve the sanitary-hygienic condition of animal skin and create comfortable conditions are becoming widespread in modern dairy farms. To verify the developed mathematical

model of cow skin cleaning, the authors carried out experimental studies on ten animals on a dairy farm. On the lateral surface of each animal three zones with the area of $10 \times 10 \text{ cm}^2$ were selected: the first area was not cleaned; the second area was cleaned “dry” with a brush; the third area was subjected to “wet” cleaning with a brush and detergent (soap solution). The temperature of the skin areas was determined for 15 minutes by the non-contact method using a pyrometer. The study results confirmed the effect of skin cleaning on the intensity of animal heat exchange due to increased convection and evaporation under heat stress. It was found that wet cleaning is the most effective method, when the skin temperature decreases by 4.1°C due to the increase in heat transfer by evaporation, while after dry cleaning it is 0.7°C . The developed mathematical model of cow skin cleaning establishes the relationship between the parameters of the brush bristle impact on the contaminated skin surface, the brush device and cleaning modes. The received dependences determine technical requirements and rational design and mode parameters of the brushing device to develop an automatic station of cow skin cleaning on farms.

Keywords: mathematical model, heat stress, cows, automatic brushing, heat exchange intensity, skin cover temperature, cleaning of cow skin, wet cleaning, brushing device parameters

Funding: The work was carried out with the funds of the University Development Programme within the framework of the Strategic Academic Leadership Programme “Priority – 2030” (Agreement No. 075-15-2023-220 dated 16.02.2023).

For citation: Ivanov Yu.G., Ponizovkin D.A., Zhumagulov Zh.B., Moshonkin A.M. Mathematical model of cow skin cleaning used to increase heat exchange intensity under heat stresses. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):16-23. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-16-23>.

Введение. Главной причиной экономических потерь в животноводстве в условиях повышенных температур является снижение адаптивных способностей организма в поддержании температурного баланса тела и толерантности к тепловому стрессу [1-4]. Установлено, что при повышении температуры с 25 до 30°C в коровнике на 400 коров потери молока по причине тепловых стрессов за один летний месяц составляют около 100 т [5].

Улучшить теплообмен животных с окружающей средой и снизить стресс позволяет применение систем местной вентиляции с управлением параметрами потока воздуха, воздействующего на кожный покров, систем мелкодисперсного распыления воды и систем дозированного опрыскивания водой кожного покрова животных [6-9]. При отлаженных режимах работы эти методы и технические средства достаточно эффективны и заслуживают широкого применения [9, 10].

Тенденция роста климатических температур^{1,2} указывает на необходимость совершенствования методов и средств с целью предотвращения тепловых стрессов.

В коровниках наряду с системами вентиляции и распыления воды снижению тепловых стрессов у животных способствует применение автоматических щеток. Массаж и сухая очистка кожного и волосяного покрова положительно влияют на кровообращение и способствуют увеличению надоев. Удаление

из шкуры вшей, клещей и других паразитов улучшает общее состояние здоровья, приводит к снижению расходов на лечение и снижению вынужденных забоев³. По данным компании DeLaval, заболевание клиническим маститом сократилось более чем на 30% среди коров второй и последующих лактаций, содержащихся в коровниках, оснащенных щётками SCB [11].

Установлено положительное влияние очистки кожного покрова на повышение теплообмена коровы с окружающей средой [5]. Учитывая, что интенсивность теплообмена является функцией площади поверхности тела животного, целесообразно очистку кожного покрова проводить на большей части поверхности тела животного. Представляет интерес организация на фермах специальной процедуры очистки кожного покрова коров на основе создания автоматической станции с применением щёточного устройства.

Цель исследований: разработка математической модели очистки кожного покрова коров щёточным устройством для автоматических станций, обеспечивающих повышение интенсивности теплоотдачи и снижение тепловых стрессов животных на фермах.

Материалы и методы. Разработка математической модели очистки кожного покрова коров позволит определить технические требования и рациональные конструктивно-режимные параметры щёточного устройства.

Экспериментальные исследования проведены на молочной ферме РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

³ Трухачев В.И., Капустин И.В., Атанов И.В. Техника и технологии в животноводстве: учебник. СПб.: Лань, 2022. 440 с.

¹ Обобщающий доклад МГЭИК по изменению климата 2023. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/press/IPCC_AR6_SYR_PressRelease_ru.pdf (дата обращения: 30.08.2023).

² Росгидромет сообщил, что в РФ климат теплеет в 2,5 раза быстрее, чем на Земле в целом. URL: <https://www.interfax.ru/russia/867184> (дата обращения: 30.08.2023).

Рассмотрим математическую модель очистки кожного покрова коров устройством, представляющим собой автоматическую щётку с приводом от электродвигателя, с контролем частоты вращения.

Эффективность ($K_э$) очистки кожного покрова от загрязнений можно представить функцией четырех групп переменных: параметров кожного покрова ($M_{кп}$); параметров щёточного устройства ($M_{щ}$); режимов очистки ($M_{ро}$); параметров загрязнения (M_3):

$$K_3 = \{M_{\text{кп}}, M_{\text{щу}}, M_{\text{ро}}, M_3\}. \quad (1)$$

При этом

$$M_{\text{кп}} = \{F_{\text{пов}}, L_{\text{вп}}, d_{\text{вп}}, S_{\text{вп}}, E_{\text{с}}, K_{\text{сф}}, K_{\text{сн}}\}, \quad (2)$$

где $F_{\text{пов}}$ – площадь очищаемой поверхности кожного покрова, м^2 ; $L_{\text{влп}}$ – длина волоса, мм ; $d_{\text{влп}}$ – диаметр волоса, мм ; $S_{\text{влп}}$ – расстояние между волосами, мм ; E_c – модуль упругости кожного покрова, кгс/мм^2 ; $K_{\text{сф}}$ – коэффициент, учитывающий форму кожного покрова; $K_{\text{сн}}$ – коэффициент, учитывающий шероховатость и неровности (складки) на поверхности кожного покрова.

$$M_{\text{шв}} = \{D_{\text{ш}}, l_{\text{в}}, d_{\text{в}}, n_{\text{н}}, B_{\text{в}}, N_{\text{пр}}, \omega\}, \quad (3)$$

где $D_{\text{щ}}$ – диаметр щётки, мм; $l_{\text{в}}$ – длина ворса, мм; $d_{\text{в}}$ – диаметр ворса щётки, мм; $n_{\text{п}}$ – количество ворсинок в пучке, шт.; $B_{\text{в}}$ – модуль относительной жёсткости пучка ворсинок, кгс·см; $N_{\text{пр}}$ – мощность привода щёточного устройства, Вт; ω – угловая скорость вращения щётки, рад/с.

$$M_{po} = \{t_c, P_{ov}, t_{co}, v_{шл}, K_{ши}, K_{пб}\}, \quad (4)$$

где t_c – продолжительность очистки поверхности кожного покрова, с; P_{oy} – окружное усилие, Н; t_{co} – продолжительность очистки ос-
нования кожного покрова, с; $v_{шд}$ –
линейная скорость щётки, см/с;
 $K_{ши}$ – коэффициент интенсивности
механических воздействий пучков
ворса на единицу длины кожного
покрова; $K_{пб}$ – коэффициент, учи-
тывающий расположение пучков
ворса на барабане щётки.

$$M_3 = \{m_3, K_{3M}, K_{3a}, K_{3II}\}, \quad (5)$$

где m_3 – масса загрязнения, г; $K_{3м}$, $K_{3а}$, $K_{3п}$ – коэффициенты, учитывающие соответственно физико-механические свойства материала загрязнения, агрегатное состояние материала загрязнения и площадь загрязнения кожного покрова.

В общем виде процесс очистки кожного покрова коров можно описать множеством параметров:

$$K_{\mathfrak{A}} = \{F_{\text{пов}}, L_{\text{вп}}, d_{\text{вп}}, S_{\text{вп}}, E_{\text{вп}}, K_{\text{сф}}, K_{\text{сн}}, D_{\text{ш}}, l_{\text{в}}, d_{\text{в}}, n_{\text{п}}, B_{\text{в}}, N_{\text{пр}}, \omega, t_{\text{с}}, P_{\text{ов}}, t_{\text{со}}, v_{\text{шл}}, K_{\text{шп}}, K_{\text{пб}}, m_3, K_{3\text{м}}, K_{3\text{а}}, K_{3\text{п}}\}. \quad (6)$$

Схема воздействия щёточного устройства на кожный покров животного представлена на рисунке 1.

Очистка кожного покрова от загрязнений происходит под воздействием пучка ворса жёсткостью B_n , связанной с жёсткостью отдельной ворсинки выражением:

$$B_n = \frac{K_n \cdot E \cdot J \cdot n_n}{\lambda_n}, \quad (7)$$

где K_n – поправочный коэффициент, определённый экспериментальным путем ($K_n = 0,92...0,98$ для пучков с числом ворсинок от 10 до 20; $K_n = 0,80...0,90$ для пучков с числом ворсинок от 20 до 40; $K_n = 0,50...0,70$ для плотных пучков с числом ворсинок от 100 и больше); E – модуль упругости материала ворса, МПа; J – момент инерции поперечного сечения ворса, см⁴; n_n – число ворсинок в пучке; λ_n – гибкость отдельной ворсинки.

$$\lambda = \frac{\mu \cdot L}{r_{min}}, \quad (8)$$

где λ – гибкость стержня; L – длина стержня, м; r_{min} – минимальный радиус инерции стержня, м; μ – коэффициент, учитывающий способ заделки стержня.

Если в зоне контакта ворса с кожей находится несколько пучков N_n , то их жёсткость B_{nn} суммируется:

$$B_{nn} = \frac{K_n \cdot E \cdot J \cdot n_n \cdot N_n}{\lambda_n}. \quad (9)$$

Воздействие ворса щёток на кожный покров коровы может быть как положительным, то есть достаточным для удаления загрязнений, так и отрицательным,

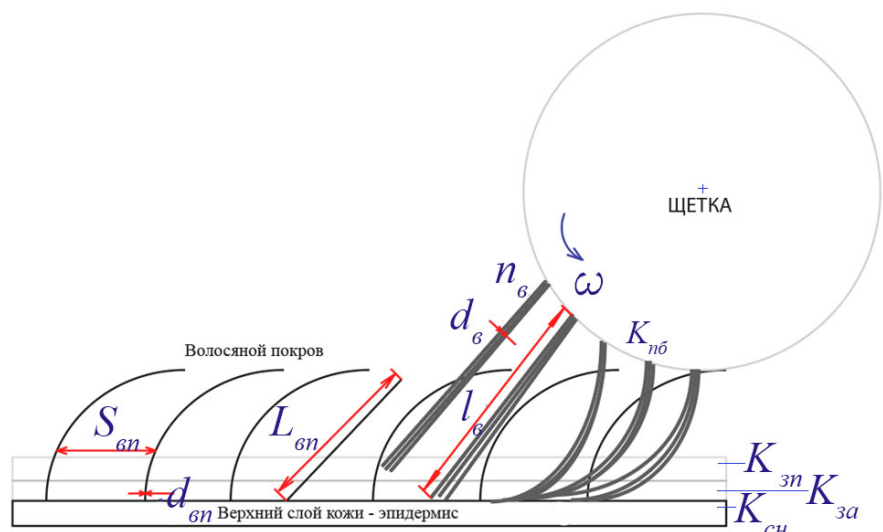


Рис. 1. Воздействие щёточного устройства на кожный покров

Fig. 1. Impact of the brushing device on the skin

вызывающим повреждение поверхности кожи и болевые ощущения.

Степень воздействия щёток на кожный покров зависит от интенсивности механических воздействий пучков ворса щётки на поверхность кожи.

Интенсивность воздействий щёток на кожный покров зависит от окружной скорости щётки (v_k), линейной скорости (v_m) перемещения щёточного устройства вдоль кожного покрова, частоты вращения щёток ($n_{щ}$), количества пучков ворса по окружности щёток (Z_0) и направления его движения.

Интенсивность механических воздействий щёток $K_{щ}$ на кожный покров можно представить как отношение окружной скорости щётки (v_k) к линейной скорости (v_m) перемещения щёточного устройства вдоль кожного покрова. С учётом того, что движение щёток вдоль тела животного может совпадать с направлением вращения пучков ворса и быть противоположным такому движению, выражение будет иметь вид:

$$K_{щ} = \frac{v_k \pm v_m}{v_m}. \quad (10)$$

С учётом параметров устройства и режимов очистки

$$K_{щ} = \frac{\left[\frac{\pi n}{30} \left(\frac{d_6}{2} + l_b \right) t_c + L_{пов} \right]}{L_{пов}}, \quad (11)$$

где d_6 – диаметр вала щётки, м; l_b – длина ворса, м; $L_{пов}$ – длина очищаемой поверхности кожного покрова, м.

Поскольку линейная скорость (v_m) щётки значительно меньше окружной скорости (v_k) и составляет 1,5...4,0%, в приближенных расчётах абсолютную скорость допустимо принимать равной окружной скорости.

За один оборот щётка столько раз воздействует на кожный покров, сколько пучков ворса размещено на ее окружности. Их количество зависит от шага пучков ($a_{щ}$), который равен расстоянию (мм) между осями кончиков двух смежных пучков ворса. За время одного оборота щётка переместится на расстояние ($\Delta L_{пов}$, мм), которое является подачей на один оборот:

$$\Delta L_{пов} = 1000 \cdot v_m \cdot t_{об} = 1000 \cdot v_m \cdot \frac{60}{n_{щ}}, \frac{\text{мм}}{\text{об}}. \quad (12)$$

где $t_{об}$ – время одного оборота щётки, мин; $n_{щ}$ – частота вращения щётки, мин.

Поскольку длина окружности щётки равна $\pi D_{щ}$, при шаге $a_{щ}$ число пучков ворса можно определить из выражения:

$$Z_0 = 2\pi \frac{\left(\frac{d_6}{2} + l_b \right)}{a_{щ}}. \quad (13)$$

Важным параметром интенсивности воздействия щётки на кожный покров животного является подача на один пучок ворса $\Delta L_{п}$, соответствующая повороту щётки на один угловой шаг пучков ворса. Подача на один пучок $\Delta L_{п}$ показывает величину перемещения центра щётки (манипулятора) за время её поворота на угол, соответствующий одному шагу $a_{щ}$. Кроме того, подача на один пучок ворса показывает, через какое расстояние (шаг) будет наноситься очередной удар пучком ворса по поверхности кожи.

Подача на пучок ворса $\Delta L_{п}$ показывает, через какое расстояние (шаг) будет наноситься очередной удар пучком ворса по эпидермису кожи:

$$\Delta L_{п} = \frac{\Delta L_{пов}}{Z_0} = \frac{6000 \cdot v_m}{a_{щ} \cdot Z_0}, \text{ мм}. \quad (14)$$

Эмпирически установлено, что для применяемой жёсткости пучков ворса $\Delta L_{п}$ должен находиться в пределах 2,0...3,0 уд/мм.

По причине воздействий соседних пучков на участке $\Delta L_{п}/2$ частота дискретизации будет увеличена в два раза.

Щёточное устройство, воздействуя на загрязнения кожи, не должно оставлять пропусков, повреждать кожный покров и забиваться загрязнениями. Пучок ворса может смачиваться жидкостью, поданной на него через форсунку. При этом нужно учитывать последующую необходимость захвата, накопления и переноса воды пучком ворса.

Шаг пучков ($b_{п}$, мм) ворса по длине барабана можно представить как

$$b_{п} = d_{п} + 2\Delta b = d_{п} + 2l_b \cdot \text{tg} \gamma. \quad (15)$$

Очевидно, что жёсткость пучка по сечению не является одинаковой. В центре плотность ворсинок и, следовательно, жёсткость, выше, а к периферии она снижается. Поэтому с целью более равномерного воздействия щётки на поверхность кожи целесообразно расстановку пучков на барабане по рядам сделать со сдвигом на полшага – так, как показано на рисунке 3.

Шаг пучков по окружности развертки барабана a_6 определяется из условия:

$$\frac{\pi D_{щ}}{a_{щ}} = \frac{\pi d_6}{a_6},$$

где $D_{щ}$ – диаметр щётки, мм. Отсюда $a_6 = \frac{a_{щ} d_6}{D_{щ}}$, мм.

Подставляя $a_{щ}$ из выражения (12), шаг пучков ворса через параметры щётки можно выразить следующим образом:

$$a_6 = 2\pi \left(\frac{d_6}{2} + l_b \right) \cdot \frac{d_6}{Z_0 D_{щ}}, \text{ мм} \quad (16)$$

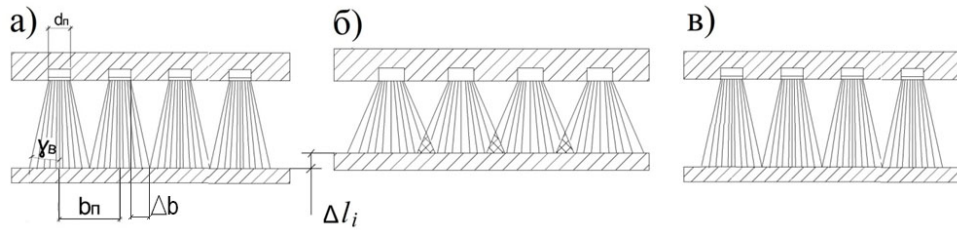


Рис. 2. Размещение пучков ворса на барабане при ударе ворса о кожу (а), движении по коже (б), отбрасывании загрязнений (в):

b_n – шаг пучков; γ_b – угол отклонения ворса; d_n – диаметр пучка в месте крепления;
 Δb – расстояние расхождения пучка; Δl_i – изменение длины пучка при движении по коже

Fig. 2. Placement of bristle bundles on the drum when the lint strikes the skin (a), moves along the skin (b), throws off contaminants (c):

b_n – bundle pitch; γ_b – angle of bristle deflection; d_n – bundle diameter at the attachment point;
 Δb – distance of bundle divergence; Δl_i – change of bundle length during its movement along the skin

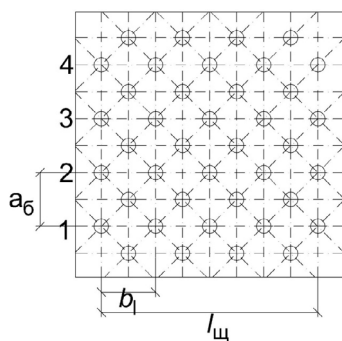


Рис. 3. Поле пучков ворса щётки

Fig. 3. Field of brush bristle bundles

При изготовлении барабана щётки отверстия для размещения пучков ворса следует высверливать по его окружности через угол $\varphi_{ш}$, равный

$$\varphi_{ш} = \frac{360^\circ}{Z_0}, \text{ град.}$$

Конвективный теплообмен между коровой и окружающей средой коровника зависит от коэффициента теплоотдачи, который в свою очередь зависит от степени загрязнения кожного покрова жирно-потовыми отложениями и загрязнениями волосяного покрова, создающими теплоизоляцию. Учитывая особенности теплообмена между животным и окружающей средой, рассмотрим Закон Ньютона-Рихмана с учётом модели теплообмена чистой кожи с окружающей средой через разделяющую сплошную стенку загрязнений, то есть

$$q = k \cdot (t_{п.к.} - t_{oc}) F_{кп}, \text{ Вт}, \quad (17)$$

где q – тепловой поток, Вт; $k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{загр}}{\lambda_{загр}}}$ или

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + R_{загр}} - \text{коэффициент теплопередачи, Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

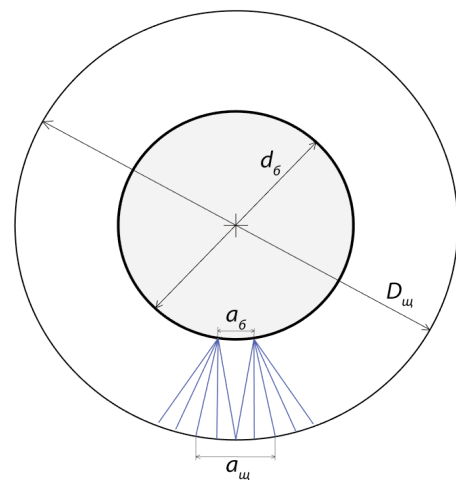


Рис. 4. Поперечный разрез щётки

Fig. 4. Cross section of the brush

α – коэффициент теплоотдачи с поверхности коровы, Вт/м²·К; $\delta_{загр}$ – толщина слоя загрязнения, м; $\lambda_{загр}$ – теплопроводность слоя загрязнения, Вт/м·К; $R_{загр}$ – коэффициент сопротивления теплопередаче, м²·К/Вт; $t_{п.к.}$ – температура поверхности кожи, °С; t_{oc} – температура окружающей среды, °С; $F_{кп}$ – площадь поверхности кожного покрова животного, м².

В предлагаемой модели сопротивление теплопередаче слоя загрязнения $R_{загр}$ выделяется в отдельный фактор.

Учитывая отсутствие или проведение очистки кожного покрова коров, а также способ очистки, можно говорить, что при тепловом обмене между коровой и окружающей средой коэффициент теплоотдачи будет различным:

$$q_{бо} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + R_{загр.бо}} \cdot (t_{п.к.} - t_{oc}); \quad (18)$$

$$q_{co} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + R_{загр.co}} \cdot (t_{п.к.} - t_{oc}) F_{кп}; \quad (19)$$

$$q_{\text{во}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + R_{\text{загр.во}}} \cdot (t_{\text{п.к.}} - t_{\text{ос}}) F_{\text{кп}}, \quad (20)$$

где $q_{\text{бо}}$, $q_{\text{со}}$, $q_{\text{во}}$ – тепловой поток, соответственно, с неочищенной поверхности кожи, после сухой и влажной очистки, Вт; $R_{\text{загр.бо}}$, $R_{\text{загр.со}}$, $R_{\text{загр.во}}$ – коэффициент сопротивления теплопередаче, соответственно, с неочищенной поверхности кожи, после сухой и влажной очистки, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Экспериментальные данные показали, что при различных способах очистки между коэффициентами теплопередачи имеется зависимость:

$$k_{\text{во}} > k_{\text{со}} > k_{\text{бо}}. \quad (21)$$

Рассматривая процесс испарения, необходимо учитывать испарение влаги с поверхности кожи, а также испарение влаги при дыхании.

Количество теплоты, которое расходуется на нагревание выдыхаемого воздуха, можно определить как

$$Q_{\text{дых}} = V_{\text{лв}} \rho_{\text{вд}} C_p (t_{\text{выдох}} - t_{\text{вдох}}), \quad (22)$$

где $V_{\text{лв}}$ – лёгочная вентиляция, $\text{м}^3/\text{с}$; $\rho_{\text{вд}}$ – плотность выдыхаемого влажного воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_p – удельная теплоёмкость выдыхаемого воздуха, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $t_{\text{выдох}}$ – температура выдыхаемого воздуха, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{вдох}}$ – температура вдыхаемого воздуха, $^\circ\text{C}$.

Количество теплоты, которое отдаётся животным в окружающую среду при испарении влаги, находящейся на поверхности кожи, определяется как

$$Q_{\text{исп}} = G_{\text{п}} r_{\text{п}} + G_{\text{ж}} r_{\text{ж}}, \quad (23)$$

где $G_{\text{п}}$ и $G_{\text{ж}}$ – количество жидкости при потоотделении и внешнем попадании жидкости на кожу животного, $\text{кг}/\text{с}$; $r_{\text{п}}$ и $r_{\text{ж}}$ – удельная теплота парообразования пота и жидкости, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Интенсивность испарения зависит от типа жидкости, её температуры, площади поверхности, с которой испаряется жидкость, скорости потока воздуха.

Можно утверждать, что теплообмен через испарение является функцией нескольких переменных:

$$q_{\text{исп}} = (G_{\text{п}} \cdot r_{\text{п}} \cdot t_{\text{п}} + G_{\text{ж}} \cdot r_{\text{ж}} \cdot t_{\text{ж}} + R_{\text{загр}} \cdot F'_{\text{кп}} \cdot v_{\text{в}}), \quad (24)$$

где $t_{\text{п}}$ – температура пота, выделяемого коровой, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{ж}}$ – температура жидкости, которая попадает при внешнем воздействии, $^\circ\text{C}$; $R_{\text{загр}}$ – термическое сопротивление загрязнения на поверхности кожного покрова, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; $F'_{\text{кп}}$ – площадь поверхности кожи, участвующая в процессе испарения, м^2 ; $v_{\text{в}}$ – скорость воздушного потока, воздействующего на площадь испарения, $\text{м}/\text{с}$.

Очистка кожного покрова коров, особенно влажная, создаёт дополнительные возможности для терморегуляции организма за счёт более интенсивного охлаждения подкожной периферийной кровеносной системы

и способствуют повышению теплоотдачи конвекцией. Вместе с тем при очистке кожного покрова освобождаются протоки потовых желез, повышается потовыделение и соответственно увеличивается испарение пота, интенсивнее охлаждается кожный покров и повышается интенсивность теплообмена животного испарением.

Повышение эффективности теплоотдачи испарением с очищенного кожного покрова коровы можно выразить математически.

Результаты и их обсуждение. Экспериментальные исследования показали, что температура кожного покрова зависит от способа его очистки.

Исследование проведено на 10 животных. На боковой поверхности каждого животного выбрано три зоны площадью $10 \times 10 \text{ см}^2$. Критерием выбора участков кожного покрова является отсутствие значительных колебаний (не более 2% – $0,7^\circ\text{C}$) температуры кожного покрова. Температура каждого участка кожного покрова наблюдалась в течение 15 мин и определялась бесконтактным способом с использованием пирометра. Промежуток в 15 мин позволяет избежать влияния водоиспарительного охлаждения с поверхности кожи при влажной очистке. До очистки кожного покрова температура на трёх участках не различалась.

Далее в трёх зонах определялась температура кожного покрова коровы при различных способах очистки: зона 1 – не очищалась; зона 2 – очищалась сухим способом с помощью щётки; зона 3 – влажная очистка щёткой с моющим средством (мыльный раствор) (рис. 5).

Исследования проводились при температуре воздуха окружающей среды $23,2^\circ\text{C}$, атмосферном давлении 746 мм. рт.ст., относительной влажности воздуха 58,4%, скорости воздуха $0,25 \text{ м}/\text{с}$.

Можно сделать вывод о том, что для улучшения теплообмена наиболее эффективной является влажная очистка кожного покрова. Зона 3 имеет

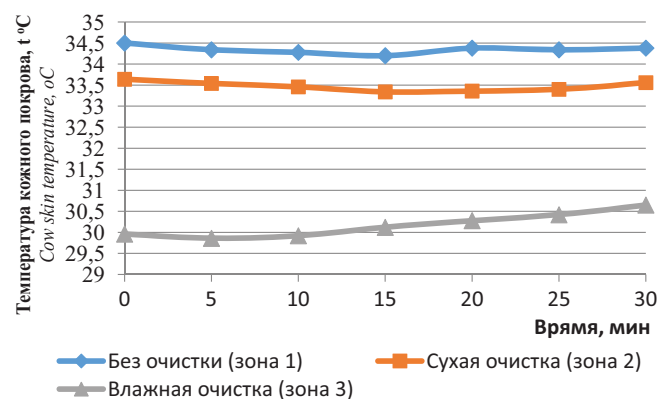


Рис. 5. Изменение температуры кожного покрова коровы при различных способах очистки

Fig. 5. Change in cow skin temperature with different cleaning methods

температуру в среднем на 4,11°C меньше, тогда как после сухой очистки разница составила 0,71°C, что подтверждает увеличение теплоотдачи испарением после влажной очистки поверхности кожи и, соответственно, пор потовых желез.

Выводы

1. Наиболее эффективной является влажная очистка кожного покрова коров. Ввиду увеличения

теплоотдачи испарением при очистке пор потовой железы температура кожного покрова снижается на 4,1°C. После сухой очистки температура снижается на 0,7°C.

2. Разработанная математическая модель очистки кожного покрова коров устанавливает зависимость между способом очистки кожного покрова коров щётчным устройством и интенсивностью теплового обмена животного с окружающей средой.

Список литературы

1. Буряков Н.П., Бурякова М.А., Алешин Д.Е. Тепловой стресс и особенности кормления молочного скота // Российский ветеринарный журнал. Сельскохозяйственные животные. 2016. № 3. С. 5-13. EDN: WITNHF.
2. Armstrong D.V. Heat stress interaction with shade and cooling. *Journal of Dairy Science*. 1994;77(7):2044-2050. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77149-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77149-6)
3. Zimbelman R.B., Collier R. Feeding strategies for high-producing dairy cows during periods of elevated heat and humidity. *Proc. 20th Annual Tri-State Dairy Nutrition Conference*. Fort Wayne, USA. 2011. April 19 and 20. Pp. 111-126.
4. St-Pierre N.R., Cobanov B., Schnitkey G. Economic losses from heat stress by US Zivestock Industires. *Journal of Dairy Science*. 2003;86: Supplement: E52-E77. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)74040-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)74040-5)
5. Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Борулько В.Г. Методы и технические средства снижения тепловых стрессов коров в теплый период года // *British Journal of Innovation in Science and Technology*. 2017. Т. 2, № 2. С. 41-52. EDN: ZBARKB.
6. Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А. Энергосберегающая система принудительной вентиляции коровника для летнего периода времени // Труды Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». 2014. Т. 3. С. 104-105. EDN: SNLZZH.
7. Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А. Обоснование параметров принудительной вентиляции на молочной ферме для летнего периода времени // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2013. № 3 (11). С. 173-175. EDN: RCKAMD.
8. Борулько В.Г., Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Шлычкова Н.А., Костомакхин Н.М. Математическое моделирование процессов теплообмена в коровнике для теплого периода // Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан. 2021. № 4 (338). С. 37-42. EDN: FPOSVQ.
9. Ivanov Yu.G., Baimukanov D.A., Borulko V.G., Ponzovkin D.A., Dzhanaabekova G.K. Influence of cow skin cleaning on physiological parameters under heat stresses in warm season. *Bulletin of National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2020;4(386):100-108. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1467.109>
10. Хлопко Ю.А., Нигматов Л.Г. Обоснование механической обработки кожного покрова крупного рогатого скота // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2013. № 3 (41). С. 99-103 EDN: QJCGKB.
11. Schukken Y.H., Young G.D. Cow comfort effects on milk production and mastitis: a field study. *International Dairy Topics*. 2009;9(1):23. <http://www.positiveaction.info/pdfs/articles/dt9.1p23.pdf>

References

1. Buryakov N.P., Buryakova M.A., Aleshin D.E. Heat stress and feeding features of the dairy cattle. *Rossiyskiy Veterinarniy Zhurnal. Selskokhozyaystvennye Zhivotnye*. 2016;3:5-13. (In Rus.)
2. Armstrong D.V. Heat stress interaction with shade and cooling. *Journal of Dairy Science*. 1994;77(7):2044-2050. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77149-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77149-6)
3. Zimbelman R.B., Collier R. Feeding strategies for high-producing dairy cows during periods of elevated heat and humidity. *Proc. 20th Annual Tri-State Dairy Nutrition Conference*, Fort Wayne, USA, April 19 and 20, 2011. P. 111-126.
4. St-Pierre N.R., Cobanov B., Schnitkey G. Economic losses from heat stress by US Zivestock Industires. *Journal of Dairy Science*. 2003;86: Supplement: E52-E77. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)74040-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)74040-5)
5. Ivanov Yu.G., Ponzovkin D.A., Borulko V.G. Methods and technical means aimed at the decrease of the heat stress of cows during the warm period. *British Journal of Innovation in Science and Technology*. 2017;2(2):41-52. (In Rus.)
6. Ivanov Yu.G., Ponzovkin D.A. Energy-saving system of forced ventilation of a cowshed for the summer period. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Energoobespechenie i Energoberezhenie v Selskom Khozyaystve"*. 2014;3:104-105. (In Rus.)
7. Ivanov Yu.G., Ponzovkin D.A. Justification of the parameters of forced ventilation on a dairy farm for the summer time. *Vestnik Vserossiyskogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Mekhanizatsii Zhivotnovodstva*. 2013;3:173-175. (In Rus.)
8. Borulko V.G., Ivanov Yu.G., Ponzovkin D.A., Shlychkova N.A., Kostomakhin N.M. Mathematical modeling of heat exchange processes in a cowshed for the warm period. *Reports of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2021;4:37-42. (In Rus.)
9. Ivanov Yu.G., Baimukanov D.A., Borulko V.G., Ponzovkin D.A., Dzhanaabekova G.K. Influence of cow skin cleaning on physiological parameters under heat stresses in warm season. *Bulletin of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2020;4(386):100-108. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1467.109>
10. Khlopko Yu.A., Nigmatov L.G. Substantiation of mechanical treatment of cattle epidermis. *Izvestiya Orenburgskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2013;3:99-103. (In Rus.)
11. Schukken Y.H., Young G.D. Cow comfort effects on milk production and mastitis: a field study. *International Dairy Topics*. 2009;9(1):23. <http://www.positiveaction.info/pdfs/articles/dt9.1p23.pdf>

Информация об авторах

Юрий Григорьевич Иванов¹, д-р техн. наук, профессор; <https://orcid.org/0000-0002-4766-9532>; iy.electro@rgau-msha.ru

Дмитрий Андреевич Понизовкин², канд. техн. наук, доцент; ponizovkin.d@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8936-7164>

Жандос Боранбаевич Жумагулов³, канд. техн. наук, ассоциированный профессор; <https://orcid.org/0000-0003-1813-902X>; Scopus AuthorID: 56242293400; zhandos.79@mail.ru

Александр Михайлович Мошонкин⁴, канд. техн. наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0002-6624-4847>; AuthorID:858451; a.moshonkin@rgau-msha.ru

^{1, 2, 4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

³ Казахский национальный аграрный исследовательский университет; 050010, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект Абая, 8

Вклад авторов

Ю.Г. Иванов – концептуализация, методология, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование

Д.А. Понизовкин – проведение исследования, создание черновика рукописи, обзор литературных источников

Ж.Б. Жумагулов – аналитика, ресурсы

А.М. Мошонкин – визуализация

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 02.08.2023, после рецензирования и доработки 12.10.2023; принята к публикации 12.10.2023

Information about the authors

Yuriy G. Ivanov¹, DSc (Eng), Professor; <https://orcid.org/0000-0002-4766-9532>; iy.electro@rgau-msha.ru

Dmitriy A. Ponizovkin², CSc (Eng), Associate Professor; ponizovkin.d@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8936-7164>

Zhandos B. Zhumagulov³, CSc (Eng), Associate Professor; <https://orcid.org/0000-0003-1813-902X>; Scopus AuthorID: 56242293400; zhandos.79@mail.ru

Aleksandr M. Moshonkin⁴, CSc (Eng), Associate Professor; <https://orcid.org/0000-0002-6624-4847>; AuthorID:858451; a.moshonkin@rgau-msha.ru

^{1, 2, 4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia

³ Kazakh National Agrarian Research University, 8, Abay Ave., Almaty, 050010; the Republic of Kazakhstan

Contribution of the authors

Yu.G. Ivanov – conceptualization, methodology, draft finalizing and editing

D.A. Ponizovkin – research, original draft preparation, literature review

Zh.B. Zhumagulov – analytics, resources

A.M. Moshonkin – visualization

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 02.08.2023; revised 12.10.2023; accepted 12.10.2023