

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

УДК 619:618.19-002-073:636.22/28

<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-156-167>

Поступила в редакцию 16.02.2024

Received 16.02.2024

Н. Г. Бакач, Е. Л. Жилич, Ю. Н. Рогальская*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по механизации сельского хозяйства, Минск, Республика Беларусь***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО УСТРОЙСТВА
БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРЕДМАСТИТНОГО СОСТОЯНИЯ
ВЫМЕНИ КОРОВ ДОЙНОГО СТАДА**

Аннотация. Представлен анализ развития молочного скотоводства в Республике Беларусь. Отмечена проблема снижения молочной продуктивности и срока хозяйственного использования коров дойного стада вследствие заболевания маститом. Отмечена важность своевременного обнаружения больных животных, а также лечения на ранних стадиях воспалительного процесса вымени. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований макетного образца устройства биометрической идентификации предмаститного состояния вымени коров дойного стада. В ходе экспериментальных исследований выявлено значительное влияние температуры окружающей среды на тепловизионную картину, на основе которой определены значения коэффициента излучения для коров. Произведена финальная корректировка ранее установленных диапазонов температурных интервалов при определении той или иной формы мастита, а именно: в пределах 32,0–36,3 °С – диапазон нормальных температур, 36,4–37,7 °С – «Субклинический мастит», 37,8–39,0 °С – «Клинический мастит». Определены наиболее значимые факторы и параметр оптимизации. За параметр оптимизации выбран процент полезной площади исследуемого объекта. На основе обработки экспериментальных данных получена математическая модель, описываемая уравнением регрессии в виде полинома второй степени. Получены рациональные параметры устройства биометрической идентификации предмаститного состояния вымени коров дойного стада, а именно: угол наклона тепловизионного модуля $\alpha_0 - 2,7^\circ$, фокусное расстояние до объекта $l - 794$ мм, высота установки тепловизионного модуля $h - 495$ мм. Также на основе проведенных исследований определены приоритетные направления и возможности для развития отечественного агропромышленного комплекса посредством создания интегрированных систем контроля физиологического состояния животных в рамках развития цифровых автоматизированных технологий «умной» фермы.

Ключевые слова: тепловизионная диагностика, мастит, молочная продуктивность, молочная железа, тепловизионный модуль, идентификация, фактор варьирования, интервал варьирования, оптимизация, отклик

Для цитирования: Бакач, Н. Г. Экспериментальные исследования дистанционного устройства биометрической идентификации предмаститного состояния вымени коров дойного стада / Н. Г. Бакач, Е. Л. Жилич, Ю. Н. Рогальская // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2024. – Т. 62, № 2. – С. 156–167. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-156-167>

Nikolay G. Bakach, Evgeny L. Zhilich, Yulia N. Rogalskaya*Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization,
Minsk, Republic of Belarus***EXPERIMENTAL STUDIES OF A REMOTE DEVICE FOR BIOMETRIC IDENTIFICATION
OF THE PRE-MASTITIS STATE OF THE UDDER OF DAIRY COWS**

Abstract. Analysis of development of dairy cattle breeding in the Republic of Belarus is presented. The problems of reducing milk productivity and the period of economic use of dairy cows as a result of mastitis disease are noted. The importance of timely detection of sick animals, as well as treatment of the inflammatory process of the udder in the early stages is noted. The results of theoretical and experimental studies of a mock-up sample of a biometric identification device for the pre-mastitis state of udder of dairy cows are presented. In the course of experimental studies, a significant influence of ambient temperature on the thermal imaging picture was revealed, based on which the values of the radiation coefficient for cows were determined. The final adjustment of the previously established temperature ranges was made when determining one or another form of mastitis, namely, within 32.0–36.3 °С – the range of normal temperatures, 36.4–37.7 °С – “Subclinical mastitis”, 37.8–39.0 °С – “Clinical mastitis”. The most significant factors and optimization parameter have been determined. The percentage of the useful area of the studied object is selected as the optimization parameter. Based on the processing of experimental data, a mathematical model is obtained, described by a regression equation in the form of a polynomial of the second degree. The rational parameters of the device for biometric identification of the pre-mastitis state of the udder of dairy cows

were obtained, namely: the angle of inclination of the thermal imaging module $\alpha_0 - 2,7^\circ$, the focal length to the object $l - 794$ mm, installation height of the thermal imaging module $h - 495$ mm. Also, based on the conducted research, priority areas and opportunities for development of the domestic agro-industrial complex through creation of integrated systems for monitoring the physiological state of animals within the framework of development of digital automated technologies of a “smart” farm have been identified.

Keywords: thermal imaging diagnostics, mastitis, milk productivity, mammary gland, thermal imaging module, identification, variation factor, variation interval, optimization, response

For citation: Bakach N. G., Zhilich E. L., Rogalskaya Yu. N. Experimental studies of a remote device for biometric identification of the pre-mastitis state of the udder of dairy cows. *Vesti Natsyunal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2024, vol. 62, no. 2, pp. 156–167 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-156-167>

Введение. Конкуренция на рынках молочной продукции, требующая постоянной интенсификации производства, за последние полвека привела к быстрому росту молочной продуктивности коров [1]. Однако воздействие внешней среды на организм животного настолько многообразно, что учесть влияние совокупности всех факторов на него затруднительно [2, 3]. К тому же в современных условиях сложно удовлетворить все биологические потребности животных, что, в свою очередь, не позволяет в полной мере реализовать их генетический потенциал [3]. Также эффективность технологии производства молока зависит от сочетания систем содержания, типов помещений и средств механизации всех производственных процессов.

Для сохранения молочной продуктивности и поддержания ее на высоком уровне необходимо осуществлять тщательный контроль всех аспектов жизнедеятельности животных и своевременно проводить профилактические мероприятия с целью сохранения их продуктивного долголетия.

Из органов, определяющих молочную продуктивность и здоровье животных, первоочередное значение имеет молочная железа [4]. Наиболее частым заболеванием молочной железы является мастит, который представляет собой воспаление, возникающее в ответ на воздействие неблагоприятных факторов внешней среды (механических, физических, химических, биологических) и чаще всего вызванное инфекцией¹. Сегодня проблема мастита, особенно его субклиническое течение, продолжает оставаться актуальной.

Ущерб от этого заболевания весьма значительный – в зависимости от тяжести воспалительного процесса и продуктивности коров удои в течение года могут снижаться до 25 %. Кроме того, у многих животных, переболевших клинической формой мастита, молочная продуктивность полностью не восстанавливается и в последующие лактации, а в 10 % и более случаев молокообразование в пораженной четверти вымени прекращается и происходит ее атрофия [5–8]. В результате этого средняя продолжительность жизни коровы не превышает 5 лет, а продуктивный период составляет от 2 до 3,5 лактации. Таким образом, от каждой такой коровы из-за перенесенного мастита недополучают минимум 3–4 теленка и удои молока за 3–4 лактации.

Также необходимо отметить, что мастит у коров несет большой экономический ущерб не только из-за снижения продуктивности, но и за счет потери качества конечного продукта ввиду его браковки.

Борьба с маститом может быть успешной лишь при его своевременном обнаружении, а также при лечении на ранних стадиях воспалительного процесса. Именно поэтому диагностика мастита коров занимает особое место при организации профилактических мероприятий данного заболевания [5].

Одним из новых методов в исследовании молочной железы крупного рогатого скота является тепловидение, основанное на регистрации видимого изображения собственного инфракрасного излучения поверхности тела с помощью специальных приборов – термографов² [9–14].

Основа термографии – изменение интенсивности инфракрасного излучения патологического очага вследствие усиления кровоснабжения, метаболических процессов или увеличения температуры. Наличие патологического процесса характеризует один из трех качественных термогра-

¹ Медведский В. А., Мазоло Н. В. Гигиенические мероприятия по профилактике маститов у коров: учеб.-метод. пособие. Витебск: ВГАВМ, 2018. 19 с.

² Тепловизионные исследования в ветеринарной медицине: практ. рук. / А. Л. Лях [и др.]. Витебск: ВГАВМ, 2021. 26 с.

фических признаков, а именно: появление аномальных зон; нарушение нормальной топографии сосудистого рисунка; изменение градиента температуры в исследуемой зоне [9, 12].

Наиболее важными термографическими критериями являются сходство и симметричность теплового рисунка, а также характер распределения температуры (термографическая картина характеризуется симметричностью распределения температур относительно средней линии тела). При обработке полученных термограмм в современных компьютерных термографах имеется возможность построения гистограмм симметрично расположенных областей, что расширяет диагностические возможности метода и повышает его информативность.

Использование термографии при диагностировании заболеваний молочной железы коров позволяет получить четкую картину температурного режима вымени, а также определить локализацию патологического очага воспалительного процесса.

Актуальность исследований связана с отсутствием автоматизированных решений при определении биометрических показателей вымени и на сегодняшний день требует больших трудозатрат [15, 16]. Для диагностирования мастита у коровы необходимо получить образцы молока, провести диагностику и только потом установить его форму. Такой подход не подразумевает ранней диагностики заболевания, так как ее проводят при появлении видимых признаков, характерных для клинической формы мастита [6].

Отсутствие своевременного реагирования на развивающийся мастит влечет за собой лечение тяжелых его форм, которое требует больших затрат, чем предотвращение его на ранней стадии. Для большей эффективности определение биометрических и температурных параметров должно быть встроено в существующие производственные технологии получения животноводческой продукции [4, 17–20].

Цель работы – определение режимов работы и параметров макетного образца устройства биометрической идентификации предмаститного состояния вымени коров дойного стада для своевременной и достоверной диагностики субклинической формы мастита.

Материалы и методы исследований. Обработка экспериментальных и графических данных выполнялась с использованием компьютерных программ STATISTICA 12, Microsoft Excel, разработанного программного обеспечения Cows Recognizer. Также в работе использована современная исследовательская оптическая и другая аппаратура: тепловизор ZK-178K, веб-камера Genius FaceCam 1000X, датчик температуры MLX90614ESF-BAА-000-TU TO394, программируемый контроллер Ваниль, Arduino Uno, на базе ATmega328P-PU, + 16 цифровых входов-выходов, модуль ESP32-DEVKITC-32D-F, ультразвуковой датчик расстояния Arduino HC-SR04, цифровой датчик освещенности TSL2561, трипод Esperanza Cedar EF108. Использование трипода обеспечивает удержание прибора, его стабилизацию в пространстве с возможностью регулирования угла наклона и угла поворота, что, в свою очередь, повышает эксплуатационные возможности устройства. Для распознавания биологических объектов использовалась наработанная ранее база данных, позволяющая идентифицировать вымя коровы в доильном зале.

Результаты исследований и их обсуждение. Экспериментальные исследования проводились на базе МТК «Дворцы» СПК «Прогресс-Вертелишки» (аг. Вертелишки, Гродненский р-н, Гродненская обл.) в период с января по июнь 2023 г. На первом этапе эксперимента определялась погрешность в постановке диагноза катаральной формы мастита путем сравнения результатов тепловизионной диагностики вымени коров с результатами использования кенотестов. В опыте было задействовано 735 гол. дойного стада.

Контроль внешних признаков катарального мастита путем проведения осмотра и подготовительных операций к доению показал, что погрешность тепловизионной диагностики опыта не превысила 2,7 % для конкретного стада. Для определения наличия в молоке соматических клеток использовали пластину для кенотестов и средство для определения соматических клеток в молоке Reagent N. Осуществлялся контроль за температурной адаптацией животного, которая должна составлять не менее 15–20 мин [6]. Также необходимым условием было отсутствие исследователя в зоне измерения, поскольку он сам является источником излучения тепла и может оказать влияние на достоверность результатов тепловизионной съемки.

В ходе исследований были отмечены значительные погрешности измерения температуры поверхности кожи в зависимости от температуры окружающей среды. Для корректировки данного параметра при обработке тепловизионных данных было принято решение о необходимости ввода температурного коэффициента с учетом изменения коэффициента излучения.

Отклонение действительной температуры от измеренной, обусловленной изменением коэффициента излучения, считают пропорциональным разности температур в точке термограммы и температуры отраженного излучения. При этом отклонение считают пропорциональным отношению отклонению коэффициента излучения и оценивают по формуле

$$\Delta T = -(T - T_0)\Delta\epsilon / \epsilon, \quad (1)$$

где T – значение действительной температуры тела, °С; T_0 – значение температуры отраженного излучения, °С; $\Delta\epsilon/\epsilon$ – относительное отклонение коэффициента излучения.

Коэффициент излучения (ϵ) – это степень способности материала излучать инфракрасное излучение. Он изменяется в зависимости от материала, свойств поверхности и температуры окружающей среды.

Значения коэффициента излучения для коров в зависимости от температуры определяли опытным путем. Итоговые результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значение изменения коэффициента излучения для коров в зависимости от температуры окружающей среды

Table 1. Value of change in radiation coefficient for cows depending on the ambient temperature

Значение изменения коэффициента излучения	Температура окружающей среды, °С							
	10–14	15–18	19–21	22–25	26–28	29–32	33–35	36–38
$\Delta\epsilon$	–0,0013	–0,0011	0,0000	0,0016	0,0040	0,0060	0,0070	0,0107

Чем ниже коэффициент излучения, тем выше уровень отраженного инфракрасного излучения и сложнее осуществить точное измерение температуры. При этом более важным фактором становится правильная настройка компенсации отраженной температуры как важнейшего параметра измеряемого объекта.

При выполнении тепловизионной диагностики коров исследуемого стада также была произведена финальная корректировка ранее установленных диапазонов температурных интервалов при определении той или иной формы мастита, в результате чего установлены следующие интервалы:

в пределах 32,0–36,3 °С – диапазон нормальных температур;

в пределах 36,4–37,7 °С – «Субклинический мастит»;

в диапазоне температур 37,8–39,0 °С – «Клинический мастит».

Необходимо отметить, что у здоровых животных считается нормой присутствие естественных очагов более высокой местной температуры поверхности тела. Наличие теплых участков тела может быть связано: 1) с отсутствием волосяного покрова; 2) более интенсивным кровоснабжением по сравнению с соседними участками (особенно характерно для высокопродуктивного молочного стада); 3) поверхностным расположением кровеносных сосудов; 4) интенсивной теплоотдачей для охлаждения организма.

Именно поэтому термограмму обязательно следует совмещать с другими методами обследования (осмотр, пальпация, сбор анамнеза). Также необходим индивидуальный подход с учетом единых качественных признаков для отдельных областей тела.

После корректировки ранее установленного диапазона температур и внесения поправочных коэффициентов для определения рациональных конструктивных параметров устройства биометрической идентификации предмаститного состояния вымени коров дойного стада был рассмотрен ряд конструктивных факторов, влияющих на получение тепловизионной картины вымени, а именно: угол наклона тепловизионного модуля α_0 ; фокусное расстояние до объекта l ; высота обзора h .

Макетный образец устройства биометрической идентификации предмаститного состояния вымени коров дойного стада представлен на рис. 1.

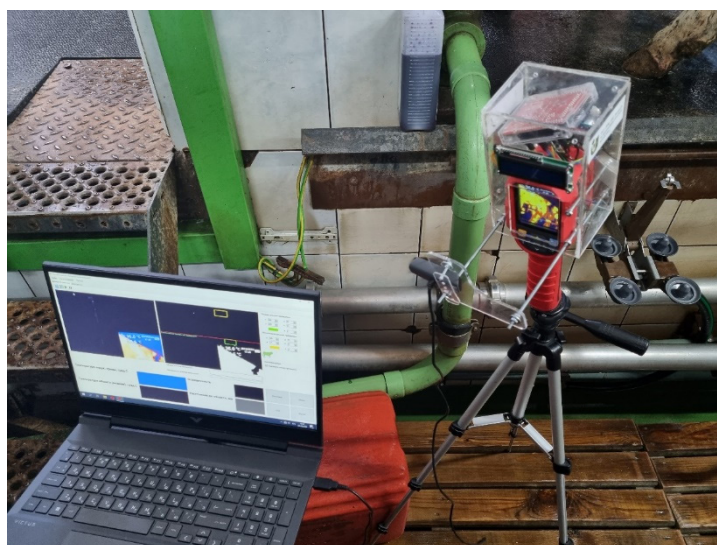


Рис. 1. Макетный образец устройства биометрической идентификации предмаститного состояния вымени коров дойного стада

Fig. 1. A mock-up sample of a biometric identification device for the pre-mastitis state of the udder of dairy cows

Для обработки экспериментальных данных было принято использовать некомпозиционный план по методу Бокса – Бенкена. Повторность опытов – трехкратная. Некомпозиционные планы для 3-факторного эксперимента требуют постановки меньшего числа опытов по сравнению с соответствующими ротатбельными центральными композиционными планами второго порядка¹ [21, 22]. Уровни варьирования факторов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Уровни варьирования факторов

Table 2. Levels of factors variation

Наименование показателя	Варьируемые факторы		
	Угол наклона α , град	Фокусное расстояние l , мм	Высота установки тепловизионного модуля h , мм
Кодовое обозначение факторов	x_1	x_2	x_3
Основные уровни ($x_i = 0$)	0	700	500
Интервалы варьирования	30	300	100
Нижние уровни ($x_i = -1$)	-30	400	400
Верхние уровни ($x_i = +1$)	30	1000	600

Уровни варьирования факторов были выбраны из следующих соображений: пределы изменения угла наклона были определены исходя из возможностей трипода. Соответственно, расстояние и высота установки ограничены апертурным углом обзора тепловизионного модуля, а также биологическими особенностями вымени коров. Далее осуществлялось кодирование факторов для перехода от натуральных значений к комплексным.

За параметр оптимизации выбран процент полезной площади S_p , определяемый как отношение площади молочной железы к общей площади снимка, являющееся одним из основных показателей качества работы устройства биометрической идентификации предмаститного состояния вымени коров стада. Оптимизация заключается в поиске максимума целевой функции.

¹ Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рошин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов: учеб. пособие. Л.: Колос, Ленингр. отд-ние, 1972. 200 с.

Основной задачей данного эксперимента является получение статистической модели объекта в виде уравнения регрессии. Многофакторное ортогонализированное уравнение регрессии второго порядка отражает зависимость параметра Y от k факторов X_r ¹ [23].

В нашем случае факторное пространство описывается уравнением регрессии в виде полинома второй степени, который имеет следующий вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (3)$$

где y – параметр оптимизации; b_0 – свободный член, равный выходу при $x_i = 0$; b_i – коэффициенты регрессии соответствующих факторов, указывающие влияние того или иного фактора на изучаемый объект; x_i, x_j – кодовое обозначение факторов; b_{ij} – коэффициент регрессии соответствующих факторов двойного взаимодействия.

Обработка результатов экспериментальных данных многофакторного эксперимента позволяет получить точную математическую формулу зависимости результирующей функции от трех выбранных наиболее значимых факторов. Построение поверхностей отклика 3D и их сечений позволит сделать подробный анализ результатов эксперимента и подготовить научные выводы по результатам экспериментальных исследований² [23].

Данные, полученные в ходе экспериментальных исследований устройства биометрической идентификации предмаститного состояния вымени коров дойного стада в зависимости от угла наклона тепловизионного модуля, расстояния до объекта и высоты установки приведены в табл. 3.

Таблица 3. Данные полезной площади исследуемого объекта в трех повторениях

Table 3. Data on the useful area of the studied object in three repetitions

Номер опыта	Критерий оптимизации, %				Дисперсия S_y^2
	y_1	y_2	y_3	$y_{\text{ср}}$	
1	9,2	9,5	9,4	9,37	0,02333
2	56,0	55,4	55,8	55,73	0,09333
3	34,7	35,1	35,3	35,03	0,09333
4	31,8	32,2	32,1	32,03	0,04333
5	19,7	20,2	20,2	20,03	0,08333
6	41,9	41,3	41,1	41,43	0,17333
7	19,0	19,1	19,5	19,20	0,07000
8	40,4	41,1	40,6	40,70	0,13000
9	87,1	87,5	87,3	87,30	0,04000
10	89,9	90,0	90,4	90,10	0,07000
11	89,9	89,5	89,9	89,77	0,05333
12	87,0	86,8	87,2	87,00	0,04000
13	91,8	92,0	92,1	91,97	0,02333
14	92,0	92,2	91,8	92,00	0,04000
15	92,0	92,2	92,2	92,13	0,01333
Σ			–		0,99000

В ходе обработки данных произведена проверка однородности дисперсий с помощью G -критерия Кохрена. Также были найдены значения коэффициентов уравнения регрессии по формулам (3)–(6) и определена их значимость³:

$$b_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{n=1}^{n_0} y_{0n}, \quad (3)$$

¹ Жарский И. М., Каледин Б. А., Кузьмицкий И. Ф. Планирование и организация эксперимента: учеб. пособие. Минск: БГТУ, 2003. 184 с.

² Там же.

³ Там же.

$$b_i = A \sum_{n=1}^N X_{in} y_n, \quad (4)$$

$$b_{ij} = D \sum_{n=1}^{n_0} X_{in} x_{jn} y_n, \quad (5)$$

$$b_{ii} = B \sum X_{in}^2 y_n + C \sum_{i=1}^k \sum_{n=1}^N X_{in}^2 y_n - \frac{\sum_{n=1}^{n_0} y_{0n}}{N_0 p}, \quad (6)$$

где N_0 – число опытов на нулевом уровне (в данном случае $N_0 = 3$); y_{0n} – значение параметра оптимизации трех опытов на нулевом уровне факторов; y_n – значение параметра оптимизации в n -й строке матрицы; X_i – кодированные уровни факторов; A, B, C, D, p – константы, зависящие от числа факторов ($A = 1/8, B = 1/4, C = 1/16, D = 1/4, p = 2$).

После нахождения коэффициентов уравнения регрессии определялась их значимость¹. Для оценки статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии применяется t -критерий Стьюдента и рассчитываются доверительные интервалы каждого из показателей. Согласно t -критерию выдвигается гипотеза о случайной природе показателей, т. е. о незначимом их отличии от нуля. Далее рассчитываются фактические значения критерия для оцениваемых коэффициентов регрессии и коэффициента корреляции путем сопоставления их значений с величиной стандартной ошибки^{2,3} [23]. Таким образом, по результатам расчета, с учетом значимости коэффициентов уравнения регрессии, было получено следующее уравнение:

$$y_{Sn} = 92,033 + 10,783x_1 + 0,250x_2 - 0,275x_3 - 12,342x_1x_2 - \\ - 1,392x_2x_3 - 58,596x_1^2 - 0,396x_2^2 - 3,096x_3^2. \quad (7)$$

Анализ полученного уравнения показывает, что на исследуемый параметр оптимизации в большей степени влияет угол наклона тепловизионного модуля, а в меньшей степени – расстояние до объекта и высота его установки.

После проверки математической модели на адекватность для получения функции отклика в зависимости от натуральных значений факторов декодировали уравнение регрессии (7). Для этого находили натуральные значения факторов⁴. Функция отклика в натуральных показателях имеет следующий вид:

$$S_{II} = -4,329 + 1,318\alpha_0 + 0,032l + 0,324h - 0,00137\alpha_0 l - \\ - 0,00005lh - 0,065\alpha_0^2 - 0,000044l^2 - 0,00031h^2. \quad (8)$$

Оценка адекватности уравнения осуществлялась с помощью дисперсионного F -критерия Фишера. Адекватность уравнения в кодированном виде при уровне значимости 0,05 % говорит о том, что погрешность вычислений при реализации полученной модели на практике в установленном диапазоне варьирования факторов не превысит 5 %.

В ходе обработки экспериментальных данных получены и проанализированы графические зависимости. Для аппроксимации экспериментальных данных использована компьютерная программа STATISTICA 12.

На рис. 2 представлены поверхности отклика, характеризующие зависимость процента полезной площади от значимых факторов. Для определения оптимальных значений величины угла наклона тепловизионного модуля, фокусного расстояния до объекта и высоты установки тепловизионного модуля в исследуемом интервале проведен анализ поверхностей отклика и построены двумерные сечения (рис. 3). Двумерные сечения позволяют получить представление

¹ Жарский И. М., Каледин Б. А., Кузьмицкий И. Ф. Планирование и организация эксперимента: учеб. пособие.

² Там же.

³ Леонов А. Н., Дечко М. М., Ловкис В. Б. Основы моделирования: учеб.-метод. пособие. Минск: БГАТУ, 2020. 160 с.

⁴ Там же.

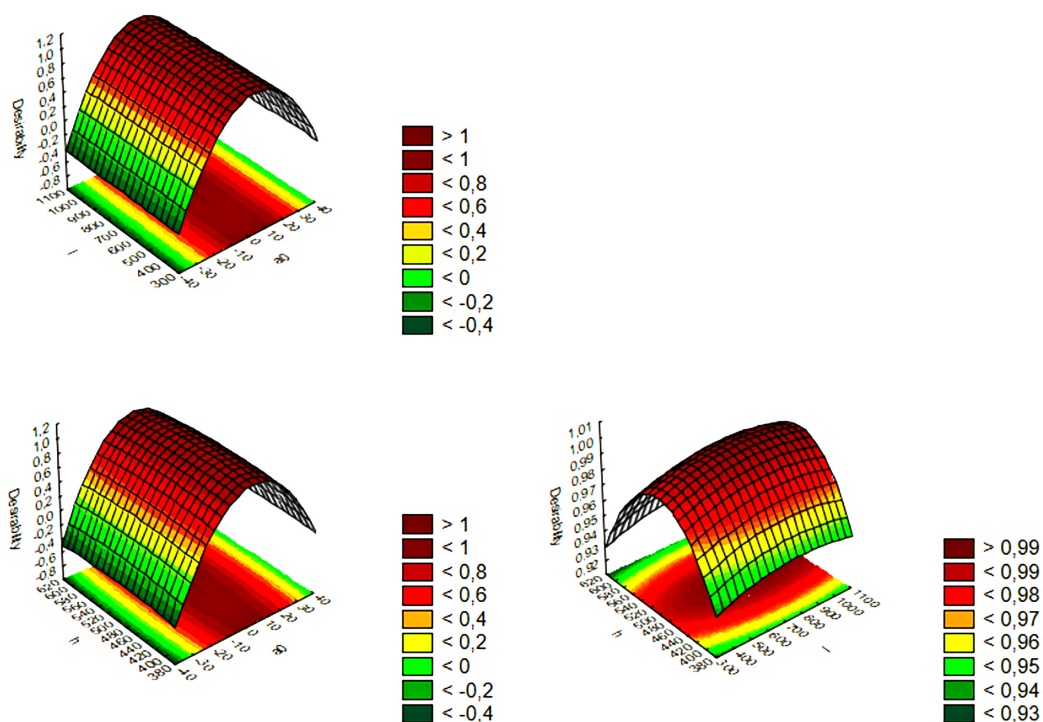


Рис. 2. Поверхности отклика

Fig. 2. Response surfaces

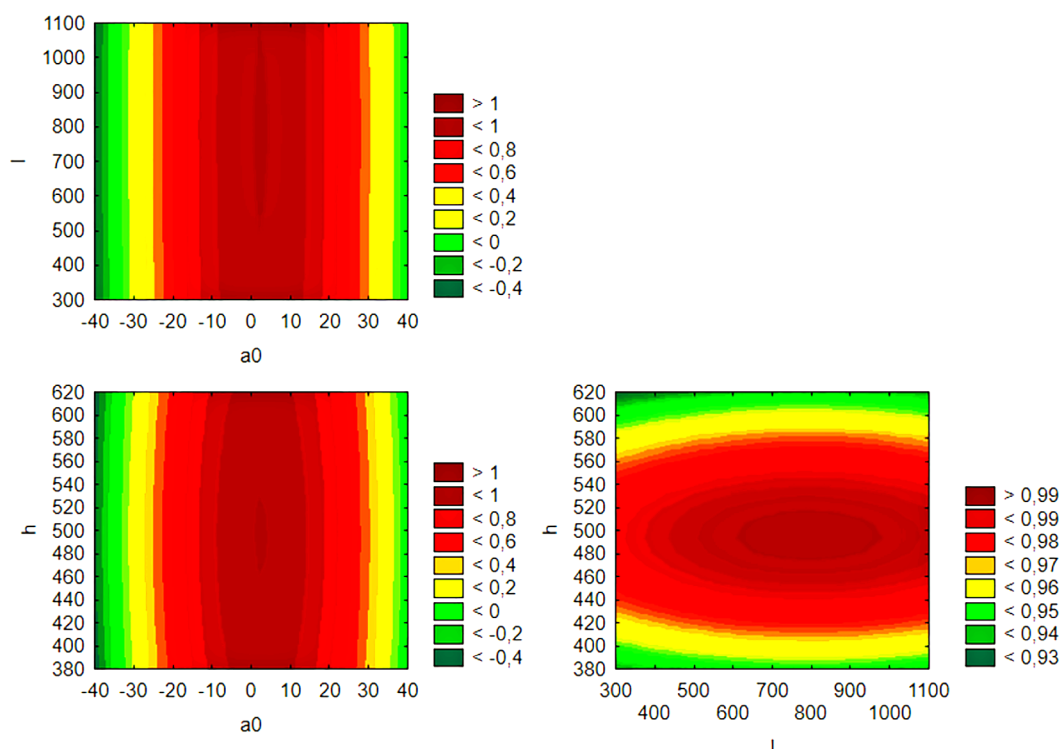


Рис. 3. Двумерные сечения

Fig. 3. Two-dimensional sections

о влиянии каждой пары факторов на параметр оптимизации¹ [22, 23]. Исходное уравнение регрессии в этом случае сводят к уравнению с двумя факторами, стабилизируя другие на соответствующих уровнях.

Вытянутость эллипса (см. рис. 3) показывает преобладание одного фактора над другим, а также степень его влияния на показатель неравномерности параметра оптимизации.

При анализе двумерных сечений можно сделать вывод, что центры эксперимента находятся в исследуемой зоне, а расчетные данные согласуются с экспериментальными, что позволяет установить оптимальные параметры для различных сочетаний факторов.

Согласно проведенному анализу рациональными параметрами устройства биометрической идентификации предмаститного состояния вымени коров дойного стада, при которых обеспечивается оптимальная работа в заданном интервале величин, являются следующие значения: угол наклона тепловизионного модуля $\alpha_0 - 2,7^\circ$, фокусное расстояния до объекта $l - 794$ мм, высота установки тепловизионного модуля $h - 495$ мм.

Профили прогнозируемых значений и желательности в оптимальном режиме работы представлены на рис. 4.

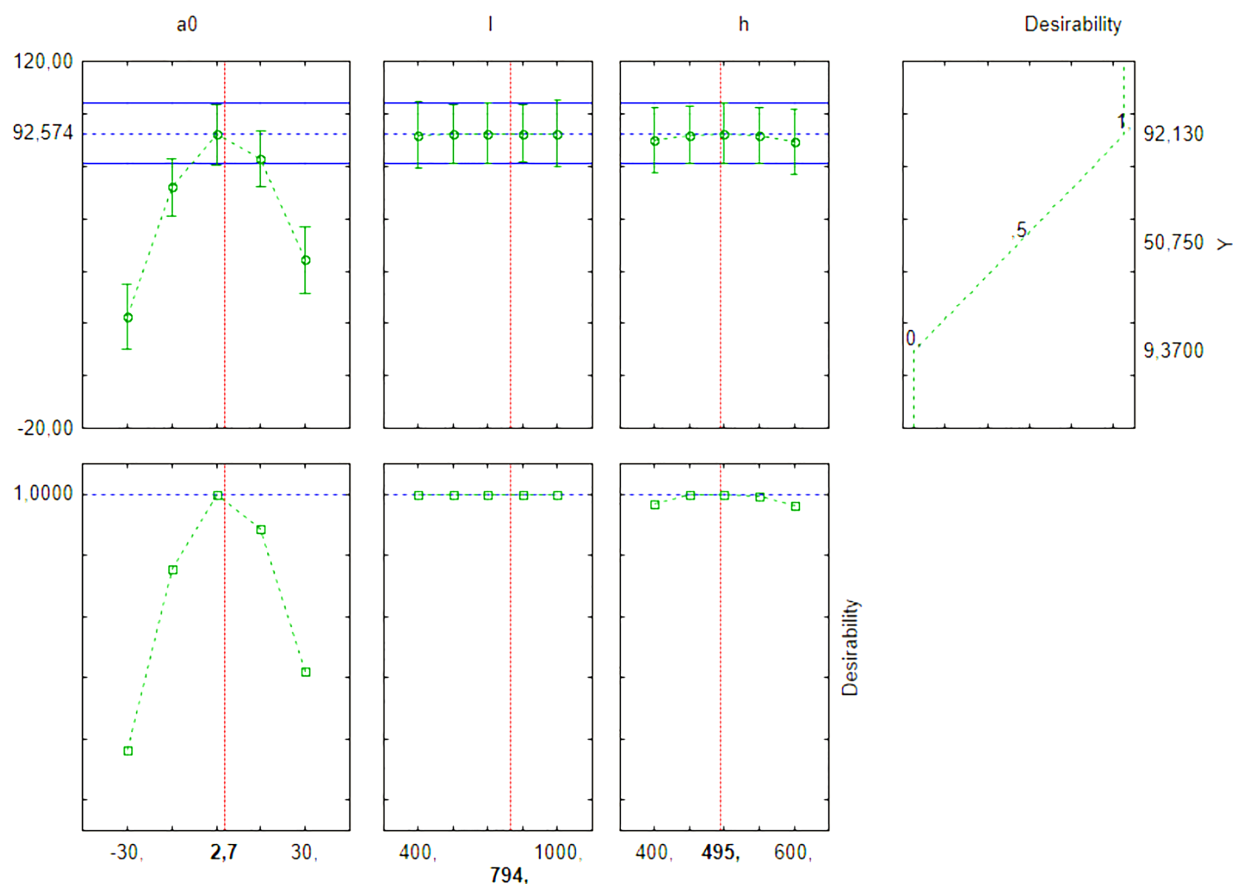


Рис. 4. Профили прогнозируемых значений и желательности в оптимальном режиме работы

Fig. 4. Profiles of predicted values and desirability in optimal operation mode

Профили желательности являются эффективным средством оптимизации технологических процессов. Основная цель научного исследования такого рода в том, чтобы выявить эффекты воздействия определенного фактора на изучаемую зависимую переменную.

Рис. 4 состоит из двух линий графиков. Графики в верхней линии кроме функции желательности отображают срезы подогнанной функции зависимости S_{Π} от соответствующей зависимой

¹ Леонов А. Н., Дечко М. М., Ловкис В. Б. Основы моделирования: учеб.-метод. пособие.

переменной при фиксации остальных переменных на их оптимальных уровнях. Оптимальные уровни независимых переменных отображены на графиках красными линиями. График в правом верхнем углу отображает функцию желательности. В нижней серии графиков изображены изменения функции желательности при вариации соответствующих независимых переменных.

В результате анализа рисунка оптимального профиля мы получаем значение $S_{\text{п}} = 92,574$, значение желательности равно 1,0. На практике для удобства показатели компонент округляют до целых значений. Данные параметры и режим работы устройства биометрической идентификации предмаститного состояния вымени коров дойного стада обеспечивают выполнение тепловизионной диагностики.

Заключение. В результате проведенных исследований макетного образца устройства биометрической идентификации предмаститного состояния вымени коров дойного стада получены следующие результаты.

1) Определены значения коэффициента излучения для коров в зависимости от температуры окружающей среды. Отмечена важность адаптации животного к температуре окружающей среды, которая должна составлять не менее 15–20 мин.

2) Произведена финальная корректировка ранее установленных диапазонов температурных интервалов при определении той или иной формы мастита, а именно: в пределах 32,0–36,3 °С – диапазон нормальных температур, 36,4–37,7 °С – «Субклинический мастит», 37,8–39,0 °С – «Клинический мастит».

3) Получена математическая модель, описываемая уравнением регрессии в виде полинома второй степени для описания зависимости процента полезной площади от факторов варьирования.

4) Установлены рациональные параметры устройства биометрической идентификации предмаститного состояния вымени коров дойного стада, а именно: угол наклона тепловизионного модуля $\alpha_0 - 2,7^\circ$, фокусное расстояние до объекта $l - 794$ мм, высота установки тепловизионного модуля $h - 495$ мм.

Благодарности. Работа выполнялась при поддержке фонда фундаментальных исследований в рамках ГПНИ «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Механизация агропроцессов и “точное” сельское хозяйство».

Acknowledgments. The work was carried out with the support of the Fundamental Research Fund within the framework of the State Public Research Institute “Agricultural Technologies and Food Security” for 2021–2025, subprogram “Mechanization of Agricultural Processes and Precision Agriculture”.

Список использованных источников

1. Казакевич, П. П. Технологическая концепция «умной» молочной фермы / П. П. Казакевич, В. Н. Тимошенко, А. А. Музыка. – Жодино: Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по животноводству, 2021. – 244 с.
2. Суровцев, В. Н. Освоение цифровых технологий как основа стратегии развития молочного скотоводства / В. Н. Суровцев // АПК: экономика, упр. – 2018. – № 9. – С. 108–117.
3. VIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях», посвященной 100-летию со дня рождения Цирицкого Георгия Абрамовича, доцента, кандидата технических наук, заведующего кафедрой начертательной геометрии Омского СХИ (с 1962 по 1989 гг.), 22 ноября 2022 г. / Ом. гос. аграр. ун-т [и др.]. – Омск: Ом. гос. аграр. ун-т, 2022. – 833 с.
4. Жилич, Е. Л. Экспериментальные исследования устройства биометрической идентификации заболеваний вымени дойного стада / Е. Л. Жилич, Ю. Н. Рогальская, В. В. Никончук // Техника и технологии в животноводстве. – 2023. – № 2 (50). – С. 11–16. <https://doi.org/10.22314/27132064-2023-2-11>
5. Лучко, И. Т. Воспаление молочной железы у коров (этиология, патогенез, диагностика, лечение и профилактика) / И. Т. Лучко. – Гродно: ГГАУ, 2019. – 183 с.
6. Юрочка, С. С. Разработка методов определения биометрических и температурных параметров вымени лактирующих животных на основе оптических технологий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С. С. Юрочка. – М., 2022. – 24 с.
7. Артемова, Е. И. Цифровизация как инструмент инновационного развития молочного скотоводства / Е. И. Артемова, Н. М. Шпак // Вестн. Акад. знаний. – 2019. – № 31 (2). – С. 15–19.
8. Цифровизация в селекции как инструмент прогнозирования продуктивности в молочном скотоводстве / Т. В. Лепехина [и др.] // Зоотехния. – 2023. – № 12. – С. 10–13. – <https://doi.org/10.25708/ZT.2023.59.33.004>
9. Жилич, Е. Л. Применение метода термографии для идентификации заболевания молочной железы коров / Е. Л. Жилич, Ю. Н. Рогальская, Д. Н. Колоско // Техника и технологии в животноводстве. – 2022. – № 2 (46) – С. 108–112. <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-2-108>

10. Байдан, Д. В. Использование тепловизионного оборудования в животноводстве / Д. В. Байдан // *Вопр. устойчивого развития о-ва*. – 2020. – № 4–2. – С. 613–614. <https://doi.org/10.34755/IROK.2020.58.97.253>
11. Veterinary applications of infrared thermography / S. I. Rekant [et al.] // *Am. J. Vet. Res.* – 2016. – Vol. 77, № 1. – P. 98–107. <https://doi.org/10.2460/ajvr.77.1.98>
12. Non-invasive cattle body temperature measurement using infrared thermography and auxiliary sensors / F. K. Wang [et al.] // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, № 7. – Art. 2425. <https://doi.org/10.3390/s21072425>
13. Infrared thermography for measuring elevated body temperature: clinical accuracy, calibration, and evaluation / Q. Wang [et al.] // *Sensors*. – 2021. – Vol. 22, № 1. – Art. 215. <https://doi.org/10.3390/s22010215>
14. Chiu, Y. J. Integrated infrared thermography and accelerometer-based behavior logger as a hoof lesion identification tool in dairy cows with various foot diseases under subtropical climates / Y. J. Chiu, J. T. Hsu // *J. Anim. Sci.* – 2022. – Vol. 100, № 10. – Skac271. <https://doi.org/10.1093/jas/skac271>
15. Любимов, В. Е. Технично-технологические особенности решения проблемы лечения маститов коров в условиях современной молочно-товарной фермы / В. Е. Любимов, Д. В. Романов, Н. Н. Кучин // *Вестн. НГИЭИ*. – 2020. – № 9 (112). – С. 17–30. <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10081>
16. Любимов, В. Е. Физиологическая оценка состояния сосков молочной железы коров при воздействии ЭМП УВЧ в процессе машинного доения / В. Е. Любимов // *Техника и технологии в животноводстве*. – 2021. – № 4 (44). – С. 27–32. <https://doi.org/10.51794/27132064-2021-4-27>
17. Липчинская, А. К. Роль патологии сосков молочной железы в развитии маститов у коров при машинном доении: автореф. дис. ... канд. ветеринар. наук: 06.02.06 / А. К. Липчинская; Урал. гос. с.-х. акад. – М., 2010. – 21 с.
18. Определение методом инфракрасной термографии заболеваний вымени коров маститом и их влияния на продуктивность / В. В. Кирсанов [и др.] // *Агроинженерия*. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 4–9. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-4-9>
19. Комаров, В. Ю. Ветеринарно-санитарное и зооигиеническое обоснование изыскания и применения новых средств и способов диагностики, терапии и профилактики мастита у коров: дис. ... канд. ветеринар. наук: 06.02.05 / В. Ю. Комаров. – Орел, 2016. – 157 л.
20. Дятлов, Н. В. Разработка пробиотического средства для обработки сосков вымени у коров: дис. ... канд. ветеринар. наук: 06.02.03 / Н. В. Дятлов. – Краснодар, 2021. – 136 л.
21. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
22. Хайлис, Г. А. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г. А. Хайлис, М. М. Ковалев. – М.: Колос, 1994. – 169 с.
23. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

References

1. Kazakevich P. P., Timoshenko V. N., Muzyka A. A. *Technological concept of a “smart” dairy farm*. Zhodino, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry, 2021. 244 p. (in Russian).
2. Surovtsev V. Development of digital technologies is as a basis of the strategy of dairy cattle breeding development. *APK: ekonomika, upravlenie = AIC: Economics, Management*, 2018, no. 9, pp. 108–117 (in Russian).
3. *VIII International scientific-practical conference “Innovative technologies in agro-industrial complex as a factor of science development in modern conditions” dedicated to the 100th anniversary of Tsirinsky Nyonya Abramovich, associate professor, candidate of technical sciences, head of the department of descriptive geometry of the Omsk Agricultural Institute (from 1962 to 1989), November 22, 2022*. Omsk, Omsk State Agrarian University, 2022. 833 p. (in Russian).
4. Zhilich E. L., Rogalskaya Yu. N., Nikonchuk V. V. The experimental studies of udder diseases biometric identification device in milking herd. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve = Machinery and Technologies in Livestock*, 2023, no. 2 (50), pp. 11–16 (in Russian). <https://doi.org/10.22314/27132064-2023-2-11>
5. Luchko I. T. *Inflammation of the mammary gland in cows (etiology, pathogenesis, diagnosis, treatment and prevention)*. Grodno, Grodno State Agrarian University, 2019. 183 p. (in Russian).
6. Yurochka S. S. *Development of methods for determination of biometric and temperature parameters of udder of lactating animals on the basis of optical technologies*. Moscow, 2022. 24 p. (in Russian).
7. Artemova E. I., Shpak N. M. Digitalization as a tool for innovative development of dairy cattle breeding. *Vestnik Akademii znaniy* [Bulletin of the Academy of Knowledge], 2019, no. 31 (2), pp. 15–19 (in Russian).
8. Lepekhina T. V., Yurochka S. S., Khakimov A. R., Pavkin D. Yu., Vasiliev A. A. Digitalization in breeding as a tool for predicting productivity in dairy cattle breeding. *Zootekhniya*, 2023, no. 12, pp. 10–13 (in Russian). <https://doi.org/10.25708/ZT.2023.59.33.004>
9. Zhilich E. L., Rogalskaya Yu. N., Kolosko D. N. Application of the thermography method for cows mammary glands' disease to identify. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve = Machinery and Technologies in Livestock*, 2022, no. 2 (46), pp. 108–112 (in Russian). <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-2-108>
10. Baidan D. V. Use of thermal imaging equipment in animal husbandry. *Voprosy ustoichivogo razvitiya obshchestva* [Issues of Sustainable Development of Society], 2020, no. 4–2, pp. 613–614 (in Russian). <https://doi.org/10.34755/IROK.2020.58.97.253>
11. Rekant S. I., Lyons M. A., Pacheco J. M., Arzt J., Rodriguez L. L. Veterinary applications of infrared thermography. *American Journal of Veterinary Research*, 2016, vol. 77, no. 1, pp. 98–107. <https://doi.org/10.2460/ajvr.77.1.98>

12. Wang F. K., Shih J. Y., Juan P. H., Su Y. C., Wang Y. C. Non-invasive cattle body temperature measurement using infrared thermography and auxiliary sensors. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 7, art. 2425. <https://doi.org/10.3390/s21072425>
13. Wang Q., Zhou Y., Ghassemi P., McBride D., Casamento J. P., Pfefer T. J. Infrared thermography for measuring elevated body temperature: clinical accuracy, calibration, and evaluation. *Sensors*, 2021, vol. 22, no. 1, art. 215. <https://doi.org/10.3390/s22010215>
14. Chiu Y. J., Hsu J. T. Integrated infrared thermography and accelerometer-based behavior logger as a hoof lesion identification tool in dairy cows with various foot diseases under subtropical climates. *Journal of Animal Science*, 2022, vol. 100, no. 10, skac271. <https://doi.org/10.1093/jas/skac271>
15. Lyubimov V. E., Romanov D. V., Kuchin N. N. Technical and technological engineering solutions in new autonomous electromechanical device for treatment mastitis of cows at industrial milking farm. *Vestnik NGIEI = Bulletin NGIEI*, 2020, no. 9 (112), pp. 17–30 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10081>
16. Lyubimov V. E. Physiological assessment of the cows milk gland condition nipples at machine milking process's EMP UWCH exposed. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve = Machinery and Technologies in Livestock*, 2021, no. 4 (44), pp. 27–32 (in Russian). <https://doi.org/10.51794/27132064-2021-4-27>
17. Lipchinskaya A. K. *The role of mammary gland nipple pathology in the development of mastitis in cows during machine milking*. Moscow, 2010. 21 p. (in Russian).
18. Kirsanov V. V., Pavkin D. Yu., Dovlatov I. M., Yurochka S. S., Khakimov A. R. Using infrared thermography to determine udder mastitis and its influence on cow productivity. *Agroinzheneriya = Agricultural Engineering*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 4–9 (in Russian). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-4-9>
19. Komarov V. Yu. *Veterinary, sanitary and zoohygienic substantiation of research and application of new means and methods of diagnostics, therapy and prevention of mastitis in cows*. Orel, 2016. 157 p. (in Russian).
20. Dyatlov N. V. *Development of a probiotic agent for treating udder teats in cows*. Krasnodar, 2021. 136 p. (in Russian).
21. Nalimov V. V., Chernova N. A. *Statistical methods for planning extreme experiments*. Moscow, Nauka Publ., 1965. 340 p. (in Russian).
22. Khailis G. A., Kovalev M. M. *Research of agricultural machinery and processing of experimental data*. Moscow, Kolos Publ., 1994. 169 p. (in Russian).
23. Spiridonov A. A. *Planning an experiment in the study of technological processes*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p. (in Russian).

Информация об авторах

Бакач Николай Георгиевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора по научной работе, Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-5491-9229>. E-mail: bakachng@yandex.ru

Жилич Евгений Леонидович – заведующий лабораторией механизации процессов производства молока и говядины, Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zhilich1987@mail.ru

Рогальская Юлия Николаевна – научный сотрудник лаборатории механизации процессов производства молока и говядины, Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-4107-3121>. E-mail: rogalskaya.juliya@yandex.ru.

Information about the authors

Nikolay G. Bakach – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Deputy General Director for Research, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization (1, Knorin Str., Minsk, 220049, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-5491-9229>. E-mail: bakachng@yandex.ru

Evgeny L. Zhilich – Head of the Laboratory of Mechanization of Milk and Beef Production Processes, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization (1, Knorin Str., Minsk, 220049, Republic of Belarus). E-mail: zhilich1987@mail.ru

Yulia N. Rogalskaya – Research Associate of the Laboratory of Mechanization of Milk and Beef Production Processes, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization (1, Knorin Str., Minsk, 220049, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-4107-3121>. E-mail: rogalskaya.juliya@yandex.ru