

Е. Л. Жилич, Д. И. Комлач, Ю. Н. Рогальская

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: npc_mol@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ДОЕНИЯ КОРОВ

Аннотация. В статье приведены основные технические характеристики роботов и метод обнаружения сосков при разработке отечественных роботизированных систем доения.

Ключевые слова: промышленная технология, роботизированное доение, система позиционирования, вымя, дойное стадо, 3D-камера, доильная установка, программно-аппаратный комплекс, манипулятор, критерий роста, критерий остановки.

E. L. Zhilich, D. I. Komlach, Yu. N. Rogalskaya

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: npc_mol@mail.ru

CREATION OF FUNDAMENTAL PREREQUISITES FOR THE DEVELOPMENT AND OPTIMAL USE OF ROBOTIC SYSTEMS IN INDUSTRIAL COW MILKING TECHNOLOGIES

Abstract. The main technical characteristics of robots and the method of detecting teats in the development of domestic robotic milking systems are presented.

Keywords: industrial technology, robotic milking, positioning system, udder, milking herd, 3D camera, milking unit, hardware and software system, manipulator, growth criterion, stopping criterion.

Введение

Благодаря эффективной экономической политике, принятой руководством страны в отношении модернизации аграрной отрасли, в первой четверти XXI в. производство молока в Республике Беларусь динамично развивается и к настоящему времени достигло впечатляющих результатов: 4-е место в мире по удельному производству молока на душу населения, или более 850 кг/чел/год [1, 2]. Это послужило основой для развития молочной перерабатывающей промышленности страны и выхода на передовые позиции на мировом рынке, где у нас также 4-е место по экспорту молока и молочных продуктов, что в ценовом исчислении превышает 2 млрд долл. США/год [3].

Вместе с тем, учитывая жесткую конкуренцию на мировых рынках, актуальным остается вопрос повышения рентабельности и конкурентоспособности промышленного производства молока. Несмотря на высокие количественные показатели, отечественная молочная отрасль пока еще характеризуется относительно высоким уровнем удельных затрат, т. е. производственных затрат на тонну молока нормативного качества [4].

Наряду с правильным кормлением, условиями содержания животных и зооветеринарной профилактикой, процесс машинного доения играет ключевую роль в повышении молочной продуктивности: если процесс машинного доения и доильное оборудование не эффективны, то генетический потенциал, кормление и условия преддоильного содержания коров не имеют решающего значения [5, 6].

Анализ мировых технологий промышленного производства молока и лучших отечественных практик позволил определить тенденции и сформулировать главные направления развития

производства отечественного доильного оборудования – обеспечение качества процесса доения и физиологичности, т. е. учета биологических особенностей процессов молокообразования и молоковыведения у лактирующих коров [7–9].

В настоящее время в стране накоплен значительный опыт применения автоматизированного доильного оборудования, сформированы научные заделы, освоено производство элементной базы и выпуск полнокомплектных доильных залов [10–12].

Следует отметить, что повышение уровня автоматизации доильного оборудования, способного обеспечить полное замещение трудозатрат и учет индивидуальных особенностей каждого животного при выборе режимов доения, связано с применением автоматических линий доения и роботов.

Основная часть

Начиная с 1999 г., в европейских странах с наиболее развитым молочным животноводством (Нидерланды, Германия, Швеция, Дания, Великобритания) стали широко использоваться специальные доильные роботы [13–15]. Основные особенности доильных роботов как отдельного направления в общей классификации способов содержания и доения коров, отличающие их от существующих систем автоматизированного доения, связаны с возможностью добровольного выбора животным времени доения, а также автоматизированным надеванием доильных стаканов на соски и индивидуальным режимом доения каждой четверти вымени.

Результаты анализа информации из открытых источников, в основном производителей оборудования, о технико-технологических характеристиках роботов представлены в таблице.

Выделяются два варианта технологической адаптации роботизированных систем:

- роботизированные поточные линии, ярким примером которых является робот-карусель (рисунок 1);

- однокорпусные (с двумя или несколькими корпусами) отдельные доильные роботы (рисунок 2), применение которых вполне отвечает принципу «добровольного доения» и не ставит целью создание высокопроизводительных поточных линий доения.

В настоящее время в Республике Беларусь на промышленных молочно-товарных фермах и комплексах применяются, как правило, однокорпусные доильные роботы, заблокированные в одной или нескольких зонах коровника с беспривязным содержанием [16–18].

К хозяйствам, в которых применяются доильные роботы, можно отнести СПК «Соколовщина», УПП «Ужича-Агро», СХП «Мазоловогаз», УП «Короли» филиала «Весна-энерго», филиал «Тепличный» РУП «Витебскэнерго», филиал «Весна-энерго», ОАО «Хотилы-Агро» в Витебской области; ОАО «Косино» и СХК «Великополье» КУП «Минсктранс» в Минской области; ОАО «Моисеевка» в Гомельской области; СПК «Коммунар Агро» и ПКУП совхоз «Сморгонский» в Гродненской области; ОАО «Александрийское» в Могилевской области. Роботы-карусели используются в РПУП «Устье» Оршанского района Витебской области (GEA DairyProQ на 40 доильных мест) и ОАО «Беловежский» Каменецкого района Брестской области (AMR DeLaval на 40 доильных мест).

Комплексный научный анализ роботизированных доильных систем, включая опыт их эксплуатации в хозяйствах республики, с участием специалистов в области инженерии, зоотехнии и ветеринарии – все это позволило приступить к формированию научно-практических заделов для создания отечественных образцов роботизированного доильного оборудования [19–21].

Анализ показал, что основой оборудования нового поколения должны стать созданные в предыдущие годы отечественные автоматизированные модули управления доением [22, 23] и серийно выпускаемые узлы и системы из отечественной элементной базы для механизированного доения.

Было принято решение разработать комплекс программно-аппаратный роботизированной системы доения, предназначенный для позиционирования доильного оборудования на вымени коровы при роботизированной технологии доения, которая является унифицированной составляющей для обоих вариантов роботизированных систем доения – корпусных и поточных (рисунки 1, 2).

Основные технические характеристики роботов

Наименование показателя	Бокс-площадка			Дубль-бокс		Полибокс	
	VMS («Де Лаваль», Швеция)	Merlin (Fullwood, Англия)	Astronaut (Lely, Нидерланды)	Galaxy (SAC, Дания)	Titan (RMS, Нидерланды)	AMS Liberty (Prolion, Нидерланды)	Leonardo («Вестфалия», Германия)
Число обслуживаемых животных	60	60	60–70	80–90	80–90	3 бокса – 120 4 бокса – 150	3 бокса – 130 4 бокса – 170
Способ предварительного позиционирования	Передвижной кормушкой	Без ограничения движения животных	Ограничителем в задней части бокса	Передвижной кормушкой			
Позиционирование манипулятора	Лазер, видеокамера	Лазер	Лазер	Лазер, оптическая система, ультразвук	Ультразвук, оптическая система		
Сдаивание первых струек молока	Одновременно с мойкой сосков вымени	Каждый сосок вымени отдельно		Каждый сосок вымени отдельно		Одновременно с мойкой сосков вымени	Каждый сосок отдельно
Надевание доильных стаканов на соски вымени коровы	На каждый сосок отдельно						
Снятие доильных стаканов	Последовательно с каждого соска без руки робота			Все доильные стаканы одновременно без руки робота		Последовательно с каждого соска без руки робота	
Основная циркуляционная мойка оборудования	В течение 12–30 мин 3 раза в сутки с моечным или дезраствором			По необходимости (30 мин), не менее 2 раз в сутки			
Контролируемые компьютером параметры	Частота посещений бокса, надой, электропроводимость молока, количество комбикорма, интервалы между доениями, регистрация активности животных						

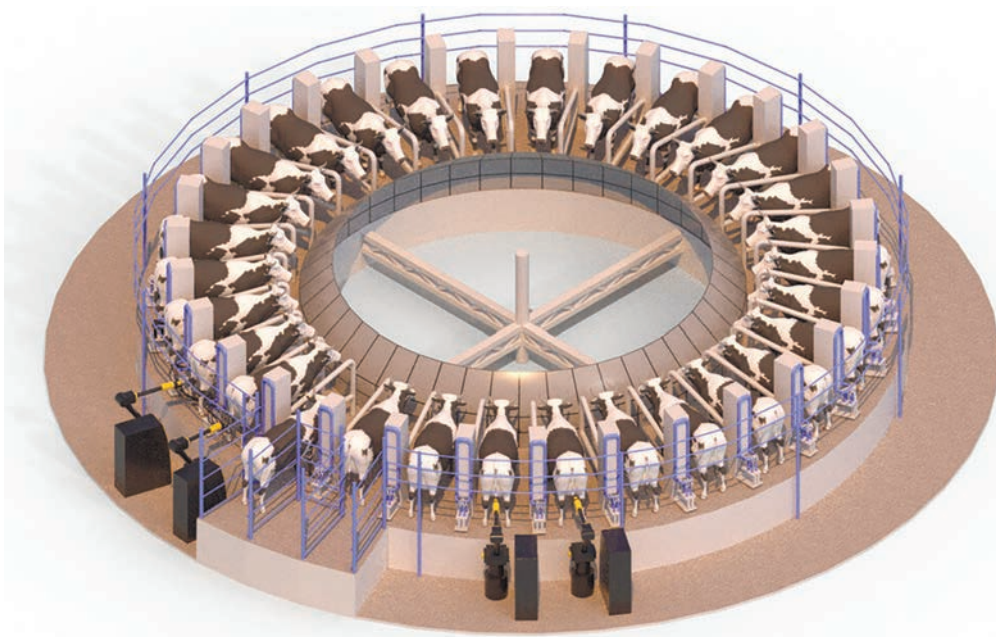


Рисунок 1 – Роботизированная доильная установка «Карусель»



Рисунок 2 – Роботизированная доильная установка «Дубль-бокс»

Принятый алгоритм использует в качестве входных данных трехмерный набор данных с 3D-камеры, а также информацию о положении и ориентации камеры, полученную от роботизированного манипулятора, на котором установлена камера. В результате обработки входных данных алгоритм генерирует набор обнаруженных сосков, включая их положение, размер и ориентацию.

В разрабатываемом программно-аппаратном комплексе используется 3D-камера O3D314. Еще одним вариантом технического зрения является использование стереопары (вид стереоизображения, представленный парой плоских перспективных изображений объекта, сделанных с помощью камер, которые получили из двух разных точек зрения, расположенных между собой

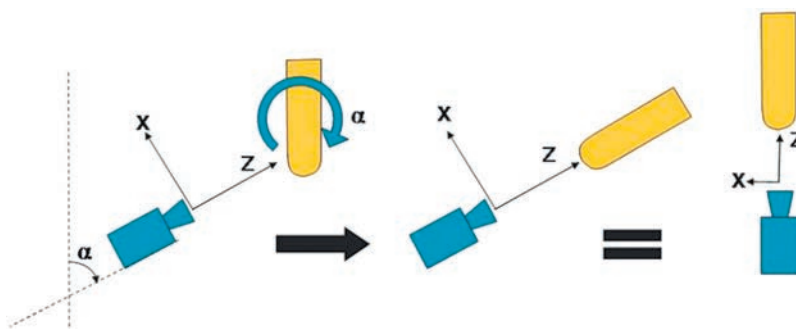


Рисунок 3 – Нормализация угла обзора

на расстоянии, соответствующем межзрачковому расстоянию у человека. Данное решение эффективно применяется в робототехнике при внедрении простых, но эффективных систем получения 3D-изображений, однако является более затратным [24–26].

3D-камера использует технологию визуализации дальности, которая включает триангуляцию и методы интерферометрии. В ней используется модулированный источник света для расчета глубины и измеряется время отраженного импульса, тем самым определяя расстояние до объекта. Простота вычисления расстояния позволяет реализовать их непосредственно в камере и на промышленный контроллер передавать уже готовые к анализу данные [27].

С точки зрения обработки изображения установлено оптимальное расположение камеры (прямо под выменем коровы), смотрящей вверх на сосок. Это обеспечивает обзор всего вымени и возможность измерения точек данных со всех сторон. Однако из-за особенностей расположения роботизированной руки и физиологии коровы, расположение камеры обоснованно принимается позади коровы, с углом отклонения от вертикали α . Исследование рабочего параметра – компенсация угла α (нормализация угла обзора), представлено на рисунке 3 [28].

Поворот на α градусов вокруг оси x с последующим поворотом на β градусов вокруг оси y вычисляется с помощью матрицы вращения R .

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha)\sin(\beta) & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha)\cos(\beta) \\ -\cos(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\alpha) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

С помощью XYZ-представления точек данных применяется вращение:

$$XYZ_{\text{вращ}} = XYZ \cdot R. \quad (2)$$

Для получения исходного набора данных определяется обратное вращение путем интегрирования исходной матрицы:

$$XYZ = XYZ_{\text{вращ}} \cdot R^{-1}. \quad (3)$$

На обнаружение сосков влияют помехи при видеонаблюдении (шумы). Для удаления шума из изображений используется низкочастотная фильтрация. Шум имеет гораздо более высокую частоту, чем основные характеристики изображения.

Для устранения размытости усредняющего фильтра используется алгоритм сглаживания каналов. В начале работы алгоритма каждый пиксель рассматривается с равной вероятностью как содержащий сосок или кончик соска. В первую очередь определяются точки интереса в наборе данных – места, которые с большой вероятностью могут быть кончиками сосков. Поиск точек интересов осуществляется путем поиска точек локального минимума в данных (рисунок 4).

На основе научного обоснования теоретических и экспериментальных исследований, создан образец комплекса программно-аппаратной роботизированной системы доения КПРД, предназначенный для позиционирования доильного оборудования на вымени коровы при роботизированной технологии доения (рисунок 5).

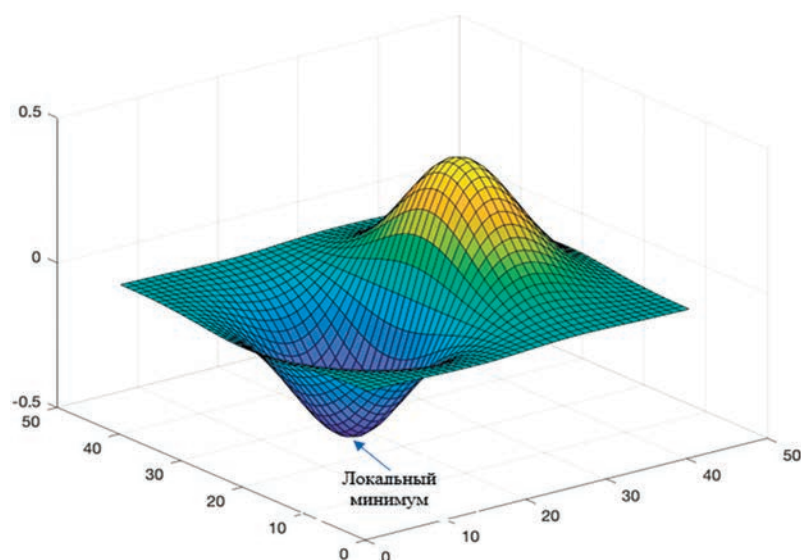


Рисунок 4 – Поиск локальных минимумов

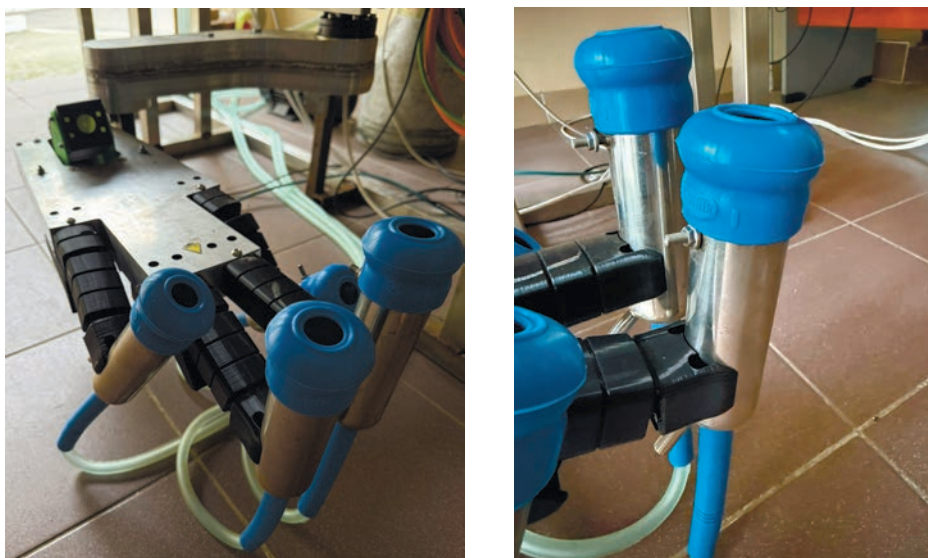


Рисунок 5 – Комплекс программно-аппаратный роботизированной системы доения КПРД

За прототип трехмерного манипулятора принято техническое решение фирмы GEA Farm Technologies Mlone, так как оно имеет возможность интеграции не только в боксовые системы доения, но и применимо в доильных залах типа «Карусель» и «Параллель», обладает высокой степенью надежности конструкции.

Заключение

В целом к базовым условиям для разработки и эффективного использования роботизированных средств в промышленных технологиях доения коров относятся: адаптация к биологическим особенностям животных (роботы должны учитывать индивидуальные анатомические и физиологические особенности каждой коровы, обеспечение комфортного и безболезненного процесса доения для снижения стресса у животных); высокая точность и надежность оборудования (точное позиционирование доильных аппаратов с использованием сенсоров и камер, надежность работы без сбоев и минимальное техническое обслуживание для предотвращения простоев); интеграция с системой управления фермой (возможность сбора и анализа данных о продуктив-

ности, состоянии здоровья и поведении коров, автоматическая регистрация объема и качества молока с последующей обработкой информации для принятия решений); гигиена и санитария (автоматическая очистка и дезинфекция доильных компонентов для предотвращения инфекций, использование материалов, устойчивых к коррозии и легко моющихся); обеспечение безопасности (защита животных и персонала от травм при работе с роботами, наличие систем аварийного отключения и сигнализации); экономическая эффективность (снижение затрат на ручной труд и повышение производительности фермы, быстрая окупаемость инвестиций за счет повышения качества и количества молока); гибкость и масштабируемость (возможность адаптации робота под разные размеры и типы ферм, легкое обновление программного обеспечения и модернизация оборудования); обучение и техническая поддержка персонала (проведение обучения операторов по использованию и обслуживанию роботов, наличие сервисной поддержки и оперативного ремонта) и др.

По результатам проведенных исследований необходимо отметить, что функциональность существующих систем роботизированного доения выглядит несколько избыточной для отечественного рынка, что влечет за собой удорожание оборудования.

Список использованных источников

1. Федченко: Беларусь вошла в пятерку мировых лидеров по производству молока на душу населения / SB.BY. Беларусь сегодня. – URL: <https://www.sb.by/articles/belarus-voshla-v-pyaterku-mirovykh-liderov-po-proizvodstvu-moloka-na-dushu-naseleniya-fedchenko.html/> (дата обращения: 01.09.2025).
2. Комментарий: качество решает. Как развивается молочная отрасль в Беларуси / БЕЛТА. – URL: <https://belta.by/economics/view/kommentarij-kachestvo-reshaet-kak-razvivaetsja-molochnaja-otrasl-v-belarusi-624630-2024> (дата обращения: 01.09.2025).
3. Беларусь: ключевые цифры молочного экспорта 2023 года // Belarus International. – URL: <https://belarus-expo.com/belarusy-kluchevye-tsifry-molochnogo-ek/> (дата обращения: 01.09.2025).
4. Китиков, В. О. Концепция создания физиологически щадящего процесса машинного доения коров / В. О. Китиков // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 1. – С. 126–131.
5. Иванова, Т. В. Влияние условий машинного доения на состояние вымени и продуктивность коров / Т. В. Иванова, А. С. Петров // Ветеринария и зоотехния. – 2018. – № 12 (4). – С. 45–52.
6. Смирнов, В. И. Мастит у коров: причины, профилактика и влияние на иммунитет и продуктивность / В. И. Смирнов, Е. Н. Кузнецова // Журнал сельскохозяйственной науки. – 2020. – № 7 (2). – С. 112–119.
7. Захаров, В. И. Современные тенденции развития автоматизированных доильных комплексов в России / В. И. Захаров, С. А. Михайлова // Агропромышленный комплекс России. – 2018. – № 12 (3). – С. 15–22.
8. Кузьмина, Т. В. Научные основы и практика использования автоматизированных систем доения в России / Т. В. Кузьмина, М. Ю. Орлов // Труды Всероссийского научно-исследовательского института животноводства. – 2021. – № 56. – С. 45–53.
9. Ларионов, Е. В. Инновационные разработки в области автоматизации доения крупного рогатого скота / Е. В. Ларионов, Т. К. Сидорова // Научный вестник сельского хозяйства. – 2022. – № 10 (1). – С. 55–62.
10. Петров, А. С. Развитие технологий автоматизированного доения в молочном животноводстве России / А. С. Петров, Н. П. Иванова, В. В. Кузнецов // Вестник аграрной науки. – 2019. – № 45 (6). – С. 12–20.
11. Смирнов, Д. Н. Производство и внедрение полнокомплектных доильных залов отечественного производства / Д. Н. Смирнов, Е. А. Лебедева // Журнал сельскохозяйственной техники и технологий. – 2020. – № 78 (4). – С. 30–37.
12. Беляев, А. Н. Технические решения и опыт эксплуатации отечественных доильных залов / А. Н. Беляев, В. П. Громов // Журнал сельскохозяйственной техники и технологий. – 2017. – № 65 (2). – С. 40–47.
13. Палкин, Г. Г. Роботы на молочных фермах / Г. Г. Палкин // Сельскохозяйственный вестник. Беларусь – Россия. – 2001. – № 8. – С. 16–18.
14. Тенденции развития сельскохозяйственной техники за рубежом / под ред. В. Ф. Федоренко [и др.] – М. : Росинформагротех, 2004. – 144 с.
15. Schleitzer, G. Melkorganisation in grossen Milchviehherden / G. Schleitzer // NeueLandwirtsch, 2009. – № 7. – Р. 60–62.
16. Иванов, П. В. Применение однокорковых доильных роботов в молочных комплексах с беспривязным содержанием коров / П. В. Иванов, Е. Л. Смирнова, А. Н. Кузнецов // Вестник животноводства. – 2021. – № 45 (2). – С. 23–30.
17. Петров, С. М. Автоматизация доения на промышленных молочных фермах: опыт внедрения однокорковых роботов / С. М. Петров, Н. А. Лебедева // Журнал сельскохозяйственной техники и технологий. – 2019. – № 11 (4). – С. 56–63.
18. Скворцова, Е. Г. Влияние технологии доения коров на эффективность производства молока / Е. Г. Скворцова, О. В. Чепуштанова, А. С. Гусев // Агропродовольственная политика России. – 2023. – № 3. – С. 44–49.
19. Казакевич, П. П. Технологическая концепция «умной» молочной фермы : монография / П. П. Казакевич, В. Н. Тимошенко, А. А. Музыка. – Жодино : Науч.-практ. центр НАН Беларуси по животноводству, 2021. – 245 с.

20. Попков, Н. А. Технологические рекомендации по организации производства молока на новых и реконструируемых молочно-товарных фермах / Н. А. Попков [и др.] ; НАН Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по животноводству. – Жодино, 2018. – 138 с.
21. Komlach, D. I. Technological principles of robotic milking development / D. I. Komlach, D. N. Kolosko, E. L. Zhilich [et al.] // Mechanization and electrification of agriculture. – 2022. – Issue 55. – P. 26–29.
22. Китиков, В. О. Ресурсоэффективные технологии производства молока / В. О. Китиков. – Мн. : НППЦ НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва, 2011. – 233 с.
23. Perednja, V. I. Reequiptment of dairy farms on a base of the machine lowexpeditured technologies / V. I. Perednja, V. O. Kitikov // The 4th research and development conference of central and eastern European institutes of agricultural engineering (CEEAgEng), Moscow, May 12–13, 2005 / VIESH. – М., 2005. – P. 219–224.
24. Направления исследований при создании автоматизированных и роботизированных модулей доения коров / Ю. А. Иванов, Л. П. Кормановский, Ю. А. Цой, В. В. Кирсанов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2018. – № 3 (31). – С. 15–19.
25. Терентьев, С. С. Применение средств цифровой трансформации в молочном скотоводстве и их роль в повышении популяционного здоровья и продуктивности животных / С. С. Терентьев, А. В. Пашкин, Е. И. Бурова // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2024. – № 3 (72). – С. 277–286.
26. Подготовка изображения, получаемого с 3D ToF камеры для автоматического обнаружения сосков коровы / В. В. Кирсанов, Д. Ю. Павкин, С. С. Юрочка [и др.] // Инновации в сельском хозяйстве. – 2019. – № 3 (32). – С. 340–346.
27. Применение сверточной нейронной сети для определения границ сосков вымени коровы / С. С. Юрочка, А. Р. Хакимов, Д. Ю. Павкин [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2022. – Т. 69. – № 3 (48). – С. 82–88.
28. Teat Pose Estimation via RGBD Segmentation for Automated Milking / N. Borla, F. Kuster, J. Langenegger, J. Ribera, M. Honegger, G. Toffetti // Cornell University. – DOI: 10.48550/arXiv.2105.09843 (date of access: 01.09.2025).