

На правах рукописи



**Барabanов Дмитрий Владимирович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАШИННОГО ДОЕНИЯ КОРОВ ЗА СЧЕТ  
РАЗРАБОТКИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ПРЕДДОИЛЬНОЙ  
ПОДГОТОВКИ ВЫМЕНИ**

Специальность: 4.3.1. – Технологии, машины и оборудование  
для агропромышленного комплекса

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург-Пушкин – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет».

**Научный руководитель:** **Керимов Мухтар Ахмиевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технических систем в агробизнесе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный аграрный университет"

**Официальные оппоненты:** **Герасимова Ольга Александровна**, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой механизации животноводства и применения электрической энергии в сельском хозяйстве федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Великолукская государственная сельскохозяйственная академия»

**Павкин Дмитрий Юрьевич**, кандидат технических наук, руководитель научного направления «Механизация животноводства» Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ"

**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится 06 декабря 2024 г. в 12<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета 35.2.033.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» по адресу: 196601, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2, лит. А. ауд. 2113. Тел: 8(812)470-04-22, e-mail: ds431\_2@spbgau.ru.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 196601, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2. лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://spbgau.ru> ФГБОУ ВО СПбГАУ. Объявление о защите и автореферат размещены на сайтах <https://spbgau.ru> ФГБОУ ВО СПбГАУ и <https://vak.minobrnauki.gov.ru> ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью Вашего учреждения, просим направлять в двух экземплярах по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 35.2.033.02  
доктор технических наук, профессор

**Огнев  
Олег Геннадьевич**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Молоко и молочные продукты играют большую роль в пищевом рационе россиян и в структуре продовольственной корзины составляют порядка 20...30 %. В результате экономического кризиса 90-х годов производство и потребление молочных продуктов, снизилось более чем на 40%. В настоящее время уровень потребления молочных продуктов составляет 241 кг/чел/год, что ниже установленной министерством здравоохранения нормы в 322 кг на человека в год. Поэтому развитие молочного животноводства является одним из приоритетных целей министерства сельского хозяйства Российской Федерации.

Одним из факторов, способствующих росту эффективности производства молочных продуктов является улучшение технологической оснащенности хозяйств, а также разработка и внедрение современных автоматизированных и роботизированных систем, которые в том числе позволяют решить проблему дефицита квалифицированных кадров, возникшую из-за низкой привлекательности сельскохозяйственных специальностей и миграционного оттока жителей сельских территорий.

Затраты труда при доении коров с применением традиционных доильных установок составляют порядка 40...65% от всех трудовых затрат по обслуживанию дойного стада. Исключить ручной труд при доении коров позволяют доильные роботы, однако на пути их массового внедрения возникает препятствие в виде высокой стоимости.

Наиболее трудозатратной операцией при доении коров является подготовка вымени к доению – выполнение подмыва и массажа вымени. Поэтому достаточно актуальной проблемой является разработка роботизированных систем, позволяющих роботизировать выполнение отдельных технологических операций, в частности подмыва и массажа вымени. Такие роботизированные системы могут иметь более простую конструкцию, что позволит снизить их стоимость и доступность для хозяйств.

**Цель работы:** повышение эффективности машинного доения коров за счет обоснования конструктивных и режимных параметров роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров и её системы позиционирования рабочего органа.

### **Задачи исследования:**

- 1) на основе анализа существующих способов и технических средств для осуществления операции подмыва и массажа вымени разработать функциональную схему и обосновать конструктивные параметры и режимы работы роботизированной установки преддоильной подготовки вымени;
- 2) усовершенствовать технологию машинного доения коров на конвейерно-кольцевых доильных установках типа «Карусель» путём использования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени;
- 3) разработать и обосновать систему позиционирования рабочего органа роботизированной установки преддоильной подготовки вымени;
- 4) разработать программу и методику исследования машинного зрения системы позиционирования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени;
- 5) провести испытания машинного зрения системы позиционирования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени в лабораторных и производственных условиях;
- 6) провести технико-экономическую оценку эффективности применения технологии машинного доения коров на конвейерно-кольцевых доильных установках типа «Карусель» с использованием роботизированной установки преддоильной подготовки вымени;

**Объект исследования:** роботизированная установка преддоильной подготовки вымени коров.

**Предмет исследования:** точность определения координат сосков вымени коров машинным зрением системы позиционирования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени.

**Методика исследования.** В исследовании использованы методы математической статистики и теории планирования эксперимента. Их использование основано на применении современных технических средств и измерительных приборов. Теоретические исследования проведены с использованием законов геометрической оптики, векторной алгебры и аналитической геометрии. Обработка результатов экспериментальных исследований осуществлялась при помощи ПК с использованием компьютерных программ MS Excel, Statistika 6.0, Mathcad 14, Advanced Grapher. Для разработки программного обеспечения и программирования микроконтроллера были использованы Microsoft Visual Studio 2019 и Arduino IDE. При создании лабораторной установки была использована система автоматизированного проектирования КОМПАС-3D, а также программы для 3D печати Repiter-Host и лазерной резки RDWorks.

**Научная новизна работы заключается:**

- 1) в получении аналитических выражений, определяющих координаты сосков вымени по смещению их контуров относительно центра изображений, получаемых с двух 2D видеокамер.
- 2) в разработке методики двухуровневого определения координат сосков вымени машинным зрением, содержащей математические модели в виде уравнений регрессии, полученных на основе экспериментальных данных и описывающих распределение величины поправки на угол разворота камер в пространстве, и позволяющих повысить точность определения координат сосков вымени.

**Теоретическая и практическая значимость работы заключается:**

- 1) в разработке математической модели способа определения координат сосков вымени коров машинным зрением на основе двух 2D видеокамер;
- 2) в разработке функциональной схемы роботизированной установки преддоильной подготовки вымени и технологии машинного доения коров на конвейерно-кольцевых доильных установках типа «Карусель» с её использованием;
- 3) в определении конструктивных параметров и режимов работы роботизированной установки преддоильной подготовки вымени: размеров станка, длины рычагов манипулятора, местоположения манипулятора и камер машинного зрения системы позиционирования рабочего органа относительно станка, времени рабочего цикла и пропускной способности роботизированной установки преддоильной подготовки вымени в зависимости от числа станков доильной установки;
- 4) в разработке программного обеспечения для управления системой позиционирования рабочего органа роботизированной установки преддоильной подготовки вымени;
- 5) в полученных на основе экспериментальных исследований математических моделей, описывающих распределение величины поправки на угол разворота камер в пространстве и позволяющих повысить точность определения координат сосков вымени.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) функциональная схема роботизированной установки преддоильной подготовки вымени и технология машинного доения коров на конвейерно-кольцевых доильных установках типа «Карусель» с её использованием;
- 2) конструктивные параметры и режимы работы роботизированной установки преддоильной подготовки вымени;
- 3) математическая модель способа определения координат сосков вымени коров машинным зрением на основе двух 2D видеокамер;

4) методика двухуровневого определения координат сосков вымени машинным зрением, содержащей математические модели в виде уравнений регрессии, полученных на основе экспериментальных данных, описывающих распределение величины поправки на угол разворота камер в пространстве и позволяющих повысить точность определения координат сосков вымени.

5) технико-экономические показатели эффективности применения технологии машинного доения коров на конвейерно-кольцевых доильных установках типа «Карусель» с использованием роботизированной установки преддоильной подготовки вымени.

**Апробации результатов работы.** Основные положения диссертационного исследования доложены, обсуждены и получили положительную оценку на всероссийских научно-методических конференциях в ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА в 2016, 2017, 2018 и 2022 годах, на национальной научно-практической конференции в ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ в 2023 году, на международных научно-практических конференциях в ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА в 2016 году, ФГБОУ ВО СПбГАУ, проводимых в 2018, 2019 и 2023 годах, Институте механизации животноводства (филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), ФГБОУ ВО Чувашский ГАУ и "AgroSMART - Smart solutions for agriculture", состоявшихся в 2018 году, на конференциях, проводимых в рамках международной агропромышленной выставки "Агрорусь" в 2016, 2018, 2022 и 2023 годах, а также представлены на IX Всероссийском робототехническом фестивале «Робофест-2017», Всероссийском инженерном конкурсе, проведенном на базе Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева в 2017 году и 20-ой Российской агропромышленной выставке «Золотая осень» в 2018 году.

**Публикации.** По материалам диссертационного исследования опубликовано 29 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных журналов, утвержденных ВАК Министерства науки и высшего образования, 3 патента на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и одиннадцати приложений. Работа изложена на 242 страницах печатного текста, который содержит 80 рисунков и 20 таблиц. Список литературы содержит 166 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен анализ технических средств, автоматизированных и роботизированных систем для осуществления преддоильной подготовки вымени коров.

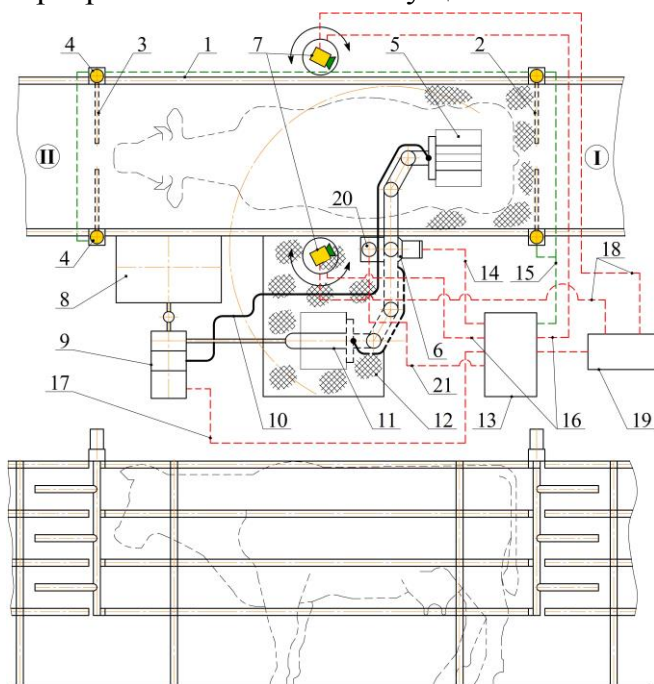
Изучению и разработке автоматизированных и роботизированных систем для доения коров посвящены труды учёных Федерального научного агроинженерного центра ВИМ В.В. Кирсанова, Ю.А. Цоя, Л.П. Кормановского, Д.Ю. Павкина, А.С. Дорохова, С.С. Юрочки и др., учёных Белгородского государственного аграрного университета имени В.Я. Горина: В.Ф. Ужика, А.П. Слободюка, А.Г. Свиридова, Д.Б. Клименкова, учёных Российского государственного аграрного университета - МСХА имени К.А. Тимирязева: Ю.Г. Иванова и А.Г. Лапкина. Также исследованиям в данной области занимаются учёные Оренбургского государственного аграрного университета, Ставропольского государственного аграрного университета, Верхневолжского государственного агробиотехнологического университета и др. Помимо научных исследований ведется и практическая работа. Компании ООО "ПРОМТЕХНИКА-ПРИВОЛЖЬЕ" удалось наладить выпуск доильных роботов «ВОЛШЕБНИК». Кроме того, активные работы по

созданию Российского доильного робота ведутся компанией R-SEPT под руководством А.В. Хахунова. Известен также проект доильного робота, которым руководит А.И. Цюк.

За рубежом разработкой роботизированных систем для доения коров занимаются инженеры компаний GEA Farm Technologie (Германия), DeLaval (Швеция), Lely (Нидерланды), SAC (Дания), Fullwood (Великобритания), BouMatic (США), а также учёные Kim W., Lee D. W., Chengjun Wang, Fan Ding, Liuyi Ling, Shaoqiang Li, Kyoo Jae Shin, Akanksha Rastogi, Abhishesh Pal, Beom-Sahng Ryuh, Aymen Ben Azouz, Harry Esmonde, Brian Corcoran, Eddie O'Callaghan, D. Schillingmann, T.T. Mottram и др.

Анализ научной литературы, патентов и Интернет-ресурсов показал, что перспективным является разработка роботизированной установки, осуществляющей подмыв и массаж вымени коров и работающей совместно с доильной установкой типа «Карусель». Литературный обзор позволил определить цель и задачи исследования.

**Во второй главе** приведена функциональная схема роботизированной установки преддоильной подготовки вымени. Её основу составляет проходной станок, оснащенный входной и выходной дверцами. Обработка вымени перед доением осуществляется при помощи рабочего органа, перемещение которого в рабочую область осуществляется системой позиционирования. Данная система включает в себя манипулятор и две 2D видео камеры с поворотным механизмом, которые образуют машинное зрение установки. Камеры располагаются на несущих элементах станка (рисунок 1).

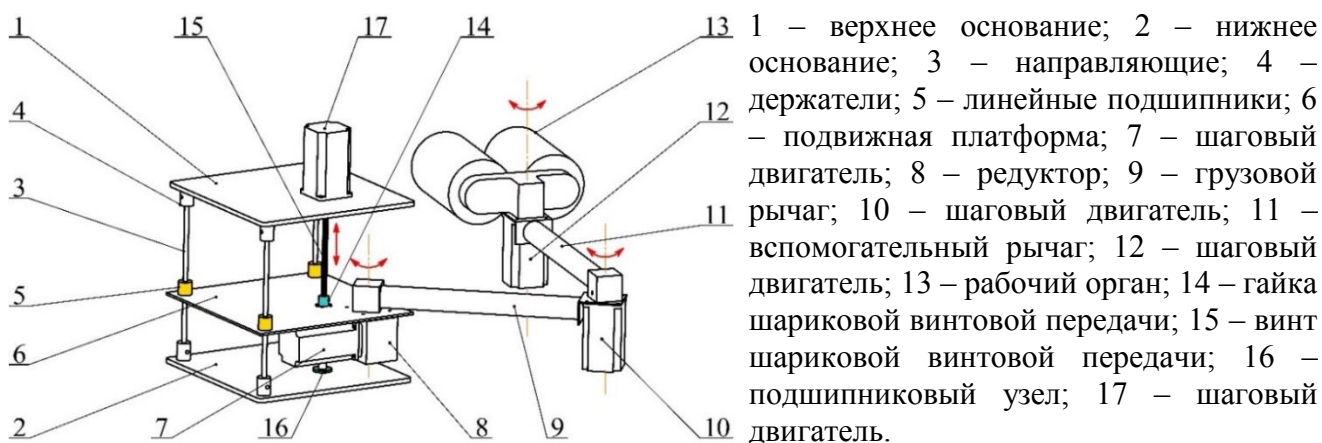


I – преддоильный накопитель; II – площадка входа на платформу доильной установки; 1 – станок, 2 – входная дверца; 3 – выходная дверца; 4 – электропривод дверец; 5 – рабочий орган; 6 – манипулятор; 7 – видеокамеры; 8 – бак с подогревателем; 9 – насос; 10 – шланги; 11 – душ; 12 – канализационная решетка; 13 – блок управления; 14 – линия управления манипулятором; 15 – линия управления дверцами; 16 – линия управления поворотным механизмом камер; 17 – линия управления насосом; 18 – линия передачи данных с камер; 19 – ЭВМ; 20 – привод щёток, 21 – линия управления приводом щёток.

**Рисунок 1 – Функциональная схема роботизированной установки**

Управление приводом манипулятора, входной и выходной дверцами, поворотным механизмом камер и вспомогательными системами осуществляется блоком управления. Обработка графического материала, поступающего с камер машинного зрения роботизированной установки и расчёт координат сосков вымени осуществляется ЭВМ.

Манипулятор роботизированной установки представляет собой механическую «руку» с тремя поворотными и одной линейной осями (рисунок 2). Управление манипулятором осуществляется посредством электроприводов, в качестве которых выступают шаговые моторы. Рабочий орган роботизированной установки преддоильной подготовки вымени образуют две роликовые щётки большого радиуса, которые позволяют обрабатывать все соски вымени коровы одновременно (рисунок 2).



1 – верхнее основание; 2 – нижнее основание; 3 – направляющие; 4 – держатели; 5 – линейные подшипники; 6 – подвижная платформа; 7 – шаговый двигатель; 8 – редуктор; 9 – грузовой рычаг; 10 – шаговый двигатель; 11 – вспомогательный рычаг; 12 – шаговый двигатель; 13 – рабочий орган; 14 – гайка шариковой винтовой передачи; 15 – винт шариковой винтовой передачи; 16 – подшипниковый узел; 17 – шаговый двигатель.

**Рисунок 2 – Манипулятор роботизированной установки**

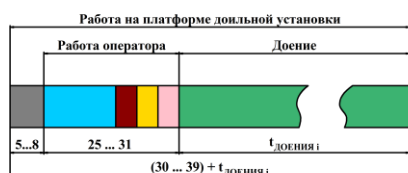
В доильном зале роботизированная установка располагается между преддоильным накопителем и площадкой выхода коров на платформу доильной установки.

Продолжительность доения коров на конвейерно-кольцевой доильной установке типа «Карусель» была исследована при помощи циклограмм, которые были построены для двух случаев: подмыв и массаж вымени осуществляется вручную и при помощи робота (рисунок 3). Циклограммы наглядно показывают снижение времени работ оператора, а также времени работ на платформе доильной установке в целом. Это способствует повышению её производительности.

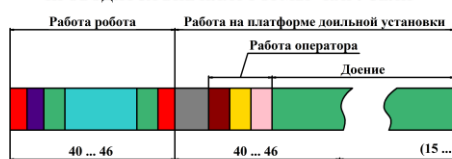
Увеличение пропускной способности доильной установки зависит от продолжительности доения  $t_{\text{ДОЕНИЯ}}$  и продолжительности выполнения роботом отдельных операций  $\Delta t = (15 - 24 \text{ с})$  и определяется формулой:

$$W(t_{\text{ДОЕНИЯ}}, \Delta t) = \left( 1 - \frac{\Delta t + t_{\text{ДОЕНИЯ}}}{\Delta t + 15 + t_{\text{ДОЕНИЯ}}} \right) \cdot 100\%. \quad (1)$$

ПОДМЫВ И МАССАЖ ПРОВОДИТСЯ ВРУЧНУЮ НА ПЛАТФОРМЕ "КАРУСЕЛИ"



ПОДМЫВ И МАССАЖ РОБОТИЗИРОВАН И ПРОВОДИТСЯ ВНЕ ПЛАТФОРМЫ "КАРУСЕЛИ"



- 1 Вход(выход) в установку
- 2 Работа системы машинного зрения
- 3 Подведение (отведение) рабочего органа
- 4 Обработка вымени
- 5 Выход на карусель
- 6 Движение до оператора
- 7 Обтирание вымени и сдвигание первых струек молока
- 8 Подключение доильных стаканов
- 9
- 10

Расчёты показывают, что пропускная способность доильной установки повышается на 1,5 – 4,5 %.

Анализ циклограмм показал, что для соблюдения правил машинного доения и согласованной работы робота с доильной установкой рабочий цикл роботизированной установки должен составлять 40 – 46 с. При сокращении времени работы системы позиционирования робота его рабочий цикл может быть уменьшен до 34 с.

**Рисунок 3 - Циклограмма технологических операций на доильной установке типа «Карусель»**

При помощи кинематического исследования определены длины рычагов манипулятора, его расположение относительно станка, а также размеры самого станка. Исходя из статистических данных о средних размерах коров, сделан вывод о том, что оптимальные размеры станка – 2500 мм в длину и 900 мм в ширину.

Для определения длин грузового и вспомогательного рычагов были рассмотрены три варианта их исполнения: 530 мм и 480 мм; 630 мм и 480 мм; 750 мм и 260 мм.

Графическим методом рассмотрены перемещения рычагов относительно различных положений коровы в станке (рисунок 4). Третий вариант не имеет критических углов, при которых вспомогательный рычаг пересекается с ногой коровы. У первого варианта такие углы наблюдаются для трёх положений коровы, а у второго – для двух. Угол поворота грузового рычага 2-ого варианта превышает аналогичный угол для грузового рычага 1-ого варианта на 32,9% только для 4-ого положения коровы. В остальных случаях данный показатель не превышает 13,6%. Углы поворота грузового рычага 3-го варианта превышают углы поворота грузового рычага 1-ого варианта на величину вдвое большую, чем для грузового рычага 2-ого варианта. Аналогичная картина наблюдается и для вспомогательного рычага. Причем углы поворота вспомогательного рычага по 2-ому варианту не превышают углы поворота аналогичного рычага по 1-ому варианту не более чем на 5,4%. Таким образом, оптимальными являются длины рычагов 630 мм и 380 мм. Положение манипулятора определяется расстоянием от боковой и передней стенки станка, которые оказались равными 200 мм и 690 мм соответственно.

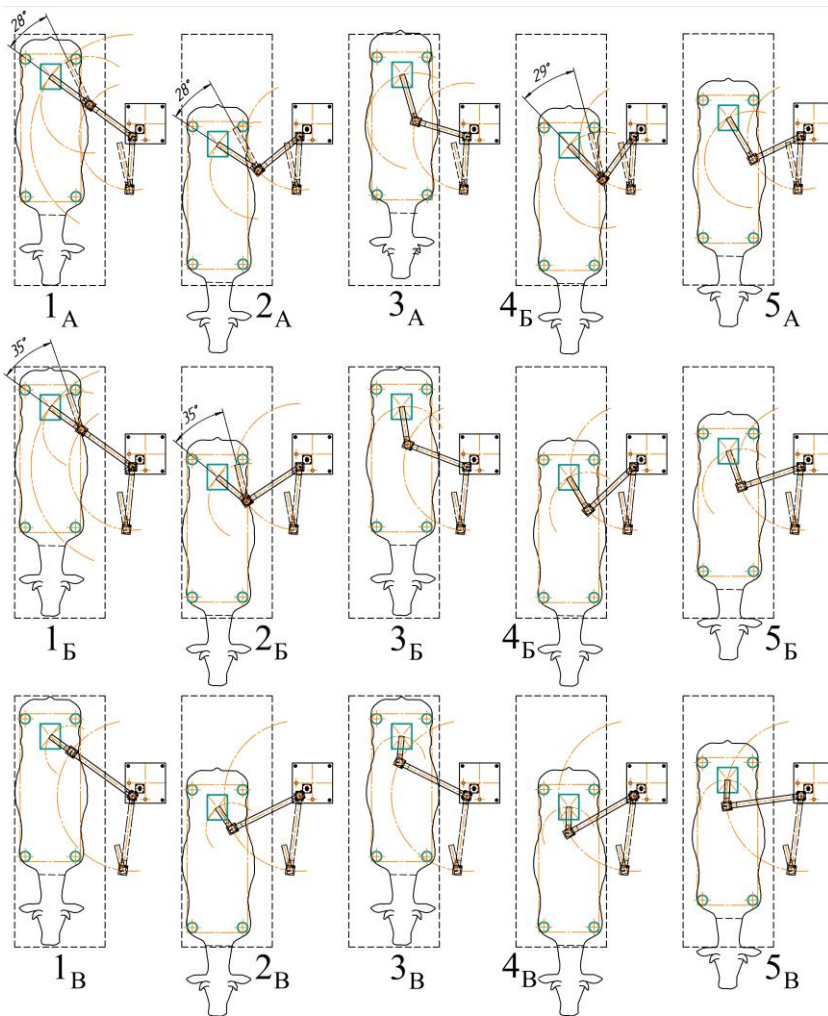


Рисунок 4 – Кинематическое исследование

$$\begin{cases} x_{O1} = \frac{x_0 \cdot (\operatorname{tg}(\alpha) + \operatorname{tg}(\beta)) - d - 2 \cdot d_0}{\operatorname{tg}(\alpha) + \operatorname{tg}(\beta)}, \\ y_{O1} = \frac{\operatorname{tg}(\beta) \cdot (d + d_0) - d_0 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\operatorname{tg}(\alpha) + \operatorname{tg}(\beta)}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $d$  – ширина станка,  $d_0$  – расстояние от боковой стенки станка до оптического центра камер,  $x_0$  – координата оптического центра камер относительно оси  $x$  (рисунок 5).

Координаты сосков вымени определяются по их смещению относительно центра изображений, получаемых с камер машинного зрения.

Анализ формирования изображения на матрице камер позволил получить систему уравнений для расчёта координат сосков.

Положение объекта съёмки в системе координат, связанной со станком роботизированной установки, определяется суммой координат векторов  $\vec{r}$  и  $\vec{r}_1$  (рисунок 5):

$$\begin{cases} x_{OB} = x_{O1} + x_{r1}, \\ y_{OB} = y_{O1} + y_{r1}. \end{cases} \quad (2)$$

Координаты вектора  $\vec{r}$  совпадают с координатами точки  $O_1$ , которая является точкой пересечения прямых  $x_1$  и  $y_1$ . Эти прямые проходят через плоскость матриц камер  $K_1$  и  $K_2$ , а их положение определяется разворотом камер на углы  $\alpha$  и  $\beta$ :

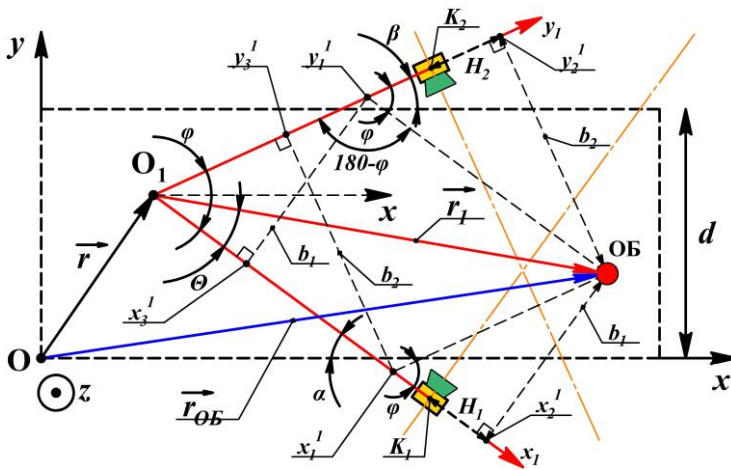


Рисунок 5 – К расчёту координат объекта съёмки

треугольника, образованного вектором  $\vec{r}_1$ , а также отрезками  $O_1y_1^1$  и  $y_1^1OB$  или  $O_1x_1^1$  и  $x_1^1OB$ :

$$|\vec{r}_1| = \sqrt{(O_1y_1^1)^2 + (y_1^1OB)^2 + 2 \cdot (O_1y_1^1) \cdot (y_1^1OB) \cdot \cos(\varphi)}. \quad (5)$$

Длины отрезков  $O_1y_1^1$ ,  $y_1^1OB$ ,  $O_1x_1^1$  и  $x_1^1OB$  могут быть найдены при помощи тригонометрических соотношений для треугольников, построенных на отрезках  $y_1^1y_2^1$ ,  $y_1^1OB$ ,  $y_2^1OB$  и  $x_1^1x_2^1$ ,  $x_1^1OB$ ,  $x_2^1OB$ :

$$y_1^1OB = O_1x_1^1 = \frac{b_2}{\sin(\varphi)}; \quad x_1^1OB = O_1y_1^1 = \frac{b_1}{\sin(\varphi)}. \quad (6)$$

Отрезки  $b_1$  и  $b_2$  определяют расстояние от объекта съёмки до оптического центра объектива камер. Их величина определяется горизонтальным смещением объекта съёмки на изображениях, получаемых с камер. Анализ формирования изображения объекта съёмки на матрице камер с точки зрения формулы тонкой линзы, примененной к обеим камерам, показал, что величина отрезков  $b_1$  и  $b_2$  определяется следующими выражениями:

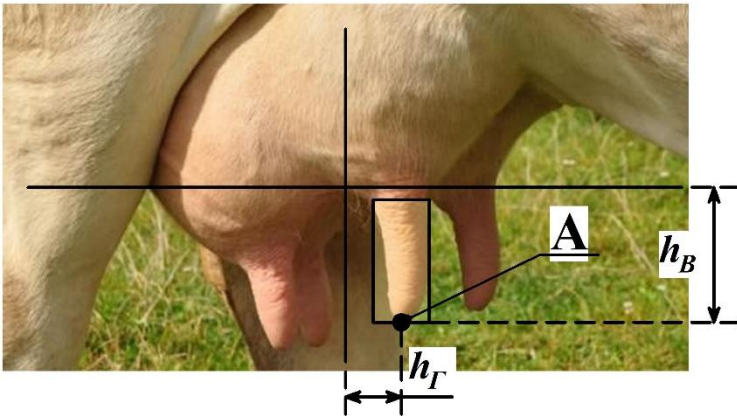


Рисунок 6 – Смещение сосков относительно центра изображения

Отрезки  $d_1$  и  $d_2$  равны расстоянию от точки  $O_1$  до точек, в которых расположен оптический центр камеры  $K_1$  и  $K_2$ , то есть соответствуют отрезкам  $O_1K_1$  и  $O_1K_2$  и могут быть вычислены исходя из положения камер относительно станка установки и ранее вычисленных координат точки  $O_1$ :

$$O_1K_1 = d_1 = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (-d_0 - y_1)^2}, \quad O_1K_2 = d_2 = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (d + d_0 - y_1)^2}. \quad (8)$$

Согласно построениям координаты вектора  $\vec{r}_1$  равны:

$$\begin{cases} x_{r1} = |\vec{r}_1| \cdot \cos\left(\alpha - \arcsin\left(\frac{b_1}{|\vec{r}_1|}\right)\right), \\ y_{r1} = -|\vec{r}_1| \cdot \sin\left(\alpha - \arcsin\left(\frac{b_1}{|\vec{r}_1|}\right)\right), \end{cases} \quad (4)$$

где  $|\vec{r}_1|$  – модуль вектора  $\vec{r}_1$ ,  $b_1$  – расстояние от объекта съёмки до плоскости, в которой расположена камера  $K_1$ .

Модуль вектора  $\vec{r}_1$  определяется теоремой косинусов из

треугольника, образованного векторами  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$  и отрезком  $O_1H_1$ :

$$|\vec{r}_1| = \sqrt{|\vec{r}_2|^2 + O_1H_1^2 - 2 \cdot |\vec{r}_2| \cdot O_1H_1 \cdot \cos(\beta)}. \quad (5)$$

Длины отрезков  $O_1y_1^1$ ,  $y_1^1OB$ ,  $O_1x_1^1$  и  $x_1^1OB$  могут быть найдены при помощи тригонометрических соотношений для треугольников, построенных на отрезках  $y_1^1y_2^1$ ,  $y_1^1OB$ ,  $y_2^1OB$  и  $x_1^1x_2^1$ ,  $x_1^1OB$ ,  $x_2^1OB$ :

$$y_1^1OB = O_1x_1^1 = \frac{b_2}{\sin(\varphi)}; \quad x_1^1OB = O_1y_1^1 = \frac{b_1}{\sin(\varphi)}. \quad (6)$$

Отрезки  $b_1$  и  $b_2$  определяют расстояние от объекта съёмки до оптического центра объектива камер. Их величина определяется горизонтальным смещением объекта съёмки на изображениях, получаемых с камер. Анализ формирования изображения объекта съёмки на матрице камер с точки зрения формулы тонкой линзы, примененной к обеим камерам, показал, что величина отрезков  $b_1$  и  $b_2$  определяется следующими выражениями:

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{C \cdot (h_1 - d_1) + A \cdot (h_2 - d_2)}{B \cdot C - A^2}, \\ b_2 &= \frac{B \cdot (h_2 - d_2) + A \cdot (h_1 - d_1)}{B \cdot C - A^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

где  $A = \frac{1}{\sin(\varphi)}$ ,  $B = \frac{h_1}{F} - \frac{1}{\operatorname{tg}(\varphi)}$ ,  $C = \frac{h_2}{F} - \frac{1}{\operatorname{tg}(\varphi)}$  – коэффициенты, введенные для

упрощения преобразований и расчётов,  $h_1$  и  $h_2$  – горизонтальное смещение объекта съёмки на изображениях, получаемых с первой и второй камер соответственно (рисунок 6).

Отрезки  $d_1$  и  $d_2$  равны расстоянию от точки  $O_1$  до точек, в которых расположен оптический центр камеры  $K_1$  и  $K_2$ , то есть соответствуют отрезкам  $O_1K_1$  и  $O_1K_2$  и могут быть вычислены исходя из положения камер относительно станка установки и ранее вычисленных координат точки  $O_1$ :

$$O_1K_1 = d_1 = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (-d_0 - y_1)^2}, \quad O_1K_2 = d_2 = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (d + d_0 - y_1)^2}. \quad (8)$$

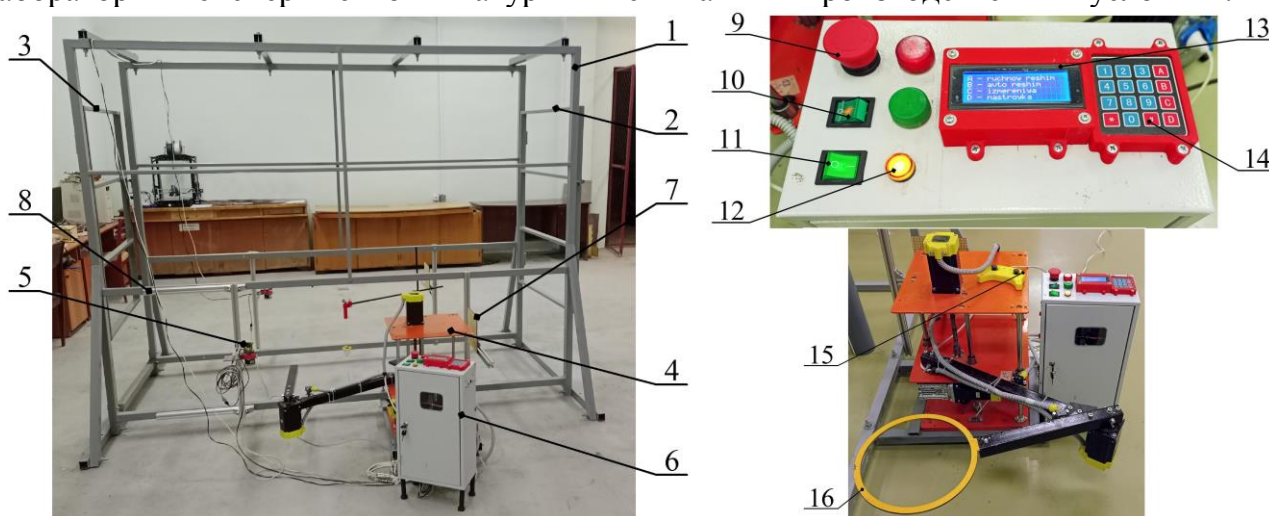
Данные о расстоянии от объекта съёмки до оптического центра камер  $b_1$  и  $b_2$  используются для расчёта координаты  $z$ . На основе формулы тонкой линзы получены формулы, которые можно использовать для расчёта координаты  $z$  по отношению к первой или второй камере:

$$z_{\text{Об}} = z_{\text{К}} \pm \frac{h_{\text{В1}}}{F} \cdot (b_1 - F) \text{ или } z_{\text{Об}} = z_{\text{К}} \pm \frac{h_{\text{В2}}}{F} \cdot (b_2 - F), \quad (9)$$

где  $F$  – фокусное расстояние объектива камеры,  $h_{\text{В1}}$  и  $h_{\text{В2}}$  – вертикальное смещение объекта съёмки на изображениях, получаемых с первой и второй камер соответственно,  $z_{\text{К}}$  – положение оптического центра камер относительно оси  $z$ .

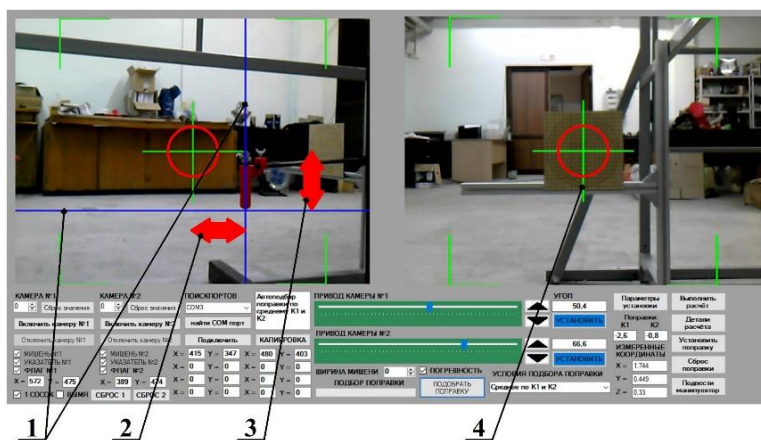
Уравнения (2–9) позволяют вычислять координаты сосков вымени коровы. Они были использованы при разработке программного обеспечения лабораторной установки.

В третьей главе представлена программа исследований; приведено описание экспериментальной установки (рисунок 7); представлены методики проведения лабораторных экспериментов и натурных испытаний в производственных условиях.



1 – станок; 2 – входная дверца; 3 – выходная дверца; 4 – манипулятор; 5 – камера; 6 – блок управления; 7 – экран калибровки; 8 – алюминиевый профиль; 9 – аварийный выключатель; 10 – кнопка управления питанием электропривода манипулятора; 11 – кнопка управления питанием поворотного механизма; 12 – лампы индикации питания; 13 – LCD дисплей; 14 – клавиатурный модуль; 15 – пульт для ручного управления; 16 – габаритный макет рабочего органа.

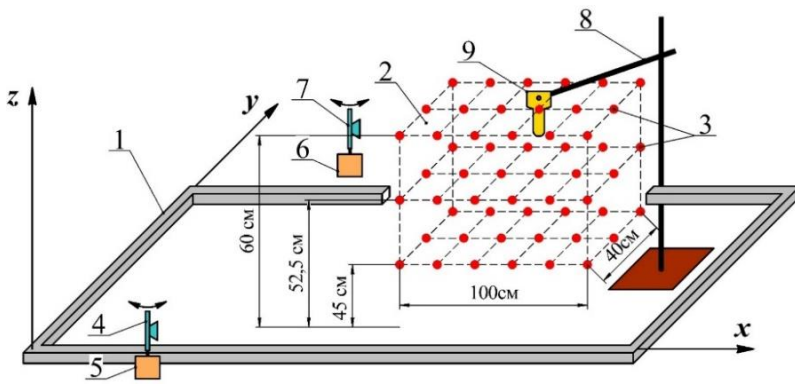
**Рисунок 7 – Лабораторная установка**



1 – указатели, отмечающие положение соска, 2 – горизонтальное смещение соска; 3 – вертикальное смещение соска; 4 – мишень для калибровки.

**Рисунок 8 – Интерфейс программного обеспечения**

Лабораторная установка состоит из станка и манипулятора. Размеры станка и длины рычагов манипулятора соответствуют результатам кинематического исследования. К боковым стенкам станка закреплены камеры машинного зрения с поворотным механизмом и экраны калибровки. Управление камерами и манипулятором осуществляется блоком управления с контроллером АТМЕГА 2560 и ЭВМ при помощи разработанного программного обеспечения (рисунок 8). В качестве камер были использованы модули NBV-1615.



1 – границы станка, 2 – рабочая область, 3 – точки, в которые помещался макет соска; 4 – камера K1; 5 – шаговый двигатель камеры K1; 6 – шаговый двигатель камеры K2; 7 – камера K2; 8 – штатив; 9 – макет соска.

**Рисунок 9 – Положение и размеры рабочей области**

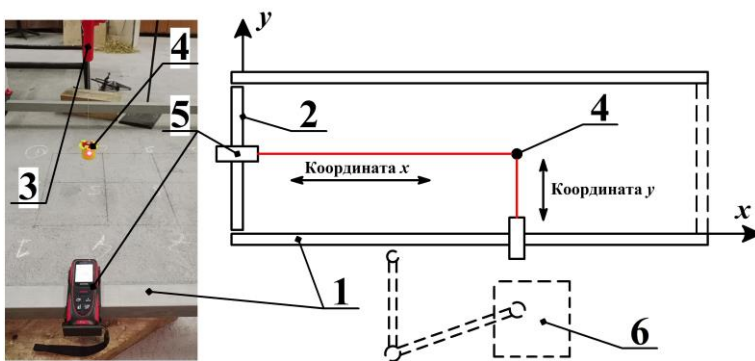
повторностью, а положение макета соска на изображениях, получаемых с камер, устанавливалось вручную при помощи указателей (рисунок 8).

Погрешность  $\Delta_r$  определяется как расстояние между двумя точками. Координаты первой точки, вычислены машинным зрением, а второй – соответствуют фактическим координатам, которые измерялись при помощи лазерного дальномера (рисунок 10):

$$\Delta_r = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}, \quad (10)$$

где  $x_1, y_1, z_1$  – координаты макета соска, вычисленные при помощи машинного зрения лабораторной установки, (м);  $x_2, y_2, z_2$  – фактические координаты макета соска, (м).

Данные о фактических и вычисленных машинным зрением координатах позволяют вычислить погрешности по отдельным координатам и погрешности определения координат в плоскости при помощи формул:



1 – нижняя перекладина боковой стенки, 2 – съёмная перекладина; 3 – макет соска; 4 – груз отвеса; 5 – лазерный дальномер; 6 – манипулятор.

**Рисунок 10 – Измерение фактических координат**

обеих камер определялось среднее значение погрешности  $\Delta_{ZCP}$  как среднее арифметическое. С учётом данных о расстоянии от объекта съёмки до оптического центра камер  $b$  в каждом измерении по отношению к обеим камерам оценивалась относительная ошибка определения координат машинным зрением  $\varepsilon_{\Delta_r}$  при помощи формулы:

$$\varepsilon_{\Delta_r} = \frac{\Delta_r}{b} \cdot 100\%. \quad (12)$$

На основе кинематического исследования и характеристик камер установлено их положение относительно станка лабораторной установки, при котором не образуется слепых зон. Также были определены размеры рабочей области, которая была разбита на 54 точки, в каждую из которых помещался муляж соска и проводились измерения погрешности (рисунок 9). В каждой точке измерения погрешности проводились с пятикратной

$$\begin{aligned} \Delta_X &= |x_1 - x_2|, \\ \Delta_Y &= |y_1 - y_2|, \\ \Delta_{ZK1} &= |z_{K1} - z_2|, \\ \Delta_{ZK2} &= |z_{K2} - z_2|, \end{aligned} \quad (11)$$

$\Delta_{XOY} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ , где  $\Delta_X$  – погрешность координаты  $x$ , (м);  $\Delta_Y$  – погрешность координаты  $y$ , (м);  $\Delta_{ZK1}, \Delta_{ZK2}$  – погрешность координаты  $z$ , для первой и второй камеры, (м),  $\Delta_{XOY}$  – ошибка расчёта координат в плоскости  $xOy$ , (м).

На основе данных о погрешности координаты  $z$  для обеих камер определялось среднее значение погрешности  $\Delta_{ZCP}$  как среднее арифметическое. С учётом данных о расстоянии от объекта съёмки до оптического центра камер  $b$  в каждом измерении по отношению к обеим камерам оценивалась относительная ошибка определения координат машинным зрением  $\varepsilon_{\Delta_r}$  при помощи формулы:

Уравнения (2–9) включают углы поворота камер  $\alpha$  и  $\beta$ . Точность их установки влияет на величину погрешности  $\Delta_r$ . Неточности в работе поворотного механизма камер могут быть компенсированы введением в расчёт угловых поправок  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$ . Для их расчёта был разработан алгоритм (рисунок 11). Экспериментально установлено, что угловые поправки значительно снижают погрешность  $\Delta_r$ , а их величина зависит от положения объекта съёмки в пределах рабочей области. Поэтому их распределение можно представить в виде функций  $\Delta\alpha = f_1(x, y, z)$  и  $\Delta\beta = f_2(x, y, z)$ . Для поиска явного вида этих функций была рассмотрена задача оптимизации (рисунок 12).

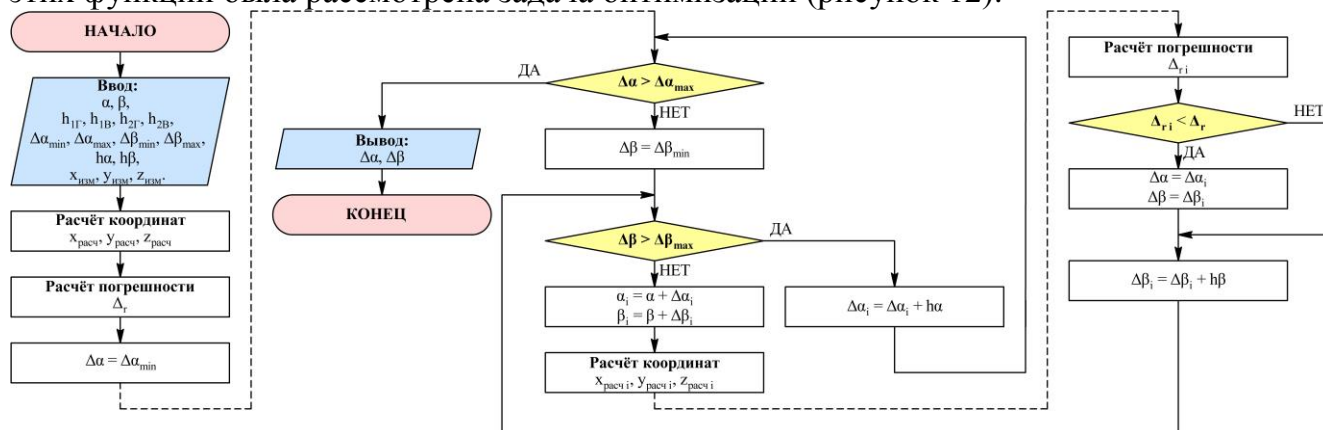


Рисунок 11 – Блок-схема алгоритма подбора угловых поправок

Факторами, определяющими величину угловой поправки являются, координаты  $x$ ,  $y$  и  $z$  точек рабочей области, а уровни их варьирования (таблица 1) определены исходя из размеров и положения рабочей области. Возмущающими являются факторы, связанные с точностью измерений, установки камер и макета соска:  $\delta_k$  – погрешность установки камер, (м);  $\delta_{изм}$  – погрешность при установке макета соска в точку, определяемую планом эксперимента, (м);  $\delta_h$  – погрешность установки флага, отмечающего положение макета соска на изображениях получаемых с камер, (пкс).

Таблица 1 - Уровни варьирования факторов.

Факторы	Кодированное обозначение	Уровни варьирования факторов		
		-1	0	+1
$x$	X1	1,244 (м)	1,744 (м)	2,244 (м)
$y$	X2	0,249 (м)	0,449 (м)	0,694 (м)
$z$	X3	0,255 (м)	0,330 (м)	0,405 (м)

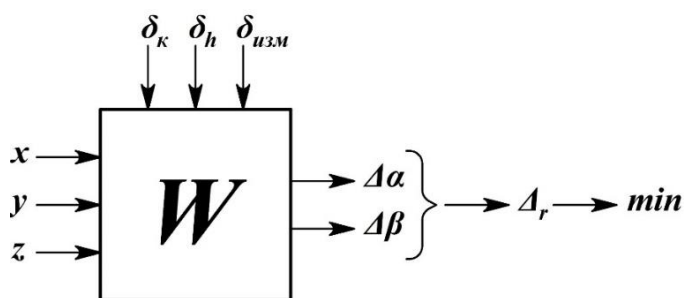


Рисунок 12 – Информационная модель факторного эксперимента

Натурные испытания проведены в АО Учхоз «Чернореченский», расположенном в с. Чернореченский Ивановского района Ивановской области и в с/х предприятии ООО «Бычок-1», находящемся в д. Михеево Комсомольского района Ивановской области (рисунок 13).

В АО Учхоз «Чернореченский» апробированы результаты кинематического исследования. Для этого в коровнике двора №3 был смонтирован станок и установлен манипулятор. Для проведения испытаний было отобрано 5 коров, которые по очереди помещались в станок и при помощи ручного управления механическая рука манипулятора подводилась в область, где располагается вымя коровы. При этом оценивалась возможность манипулятора дотянуться до вымени при различных положениях коровы в станке.



АО Учхоз «Чернореченский»



ООО «Бычок-1»

1 – станок; 2 – манипулятор; 3 – блок управления; 4 – пульт для ручного управления.

**Рисунок 13 – Проведение натуральных испытаний в производственных условиях**

В ООО «Бычок-1» проведены испытания машинного зрения. Для этого предварительно были проведены аналогичные лабораторные испытания с габаритным макетом коровы и габаритным макетом рабочего органа в виде кольца (рисунок 7). В обоих случаях при помощи машинного зрения лабораторной установки определялись координаты четырёх сосков, после чего осуществлялся расчёт координат точки, при подведении в которую габаритного макета рабочего органа все соски оказывались во внутренней области его кольца.

При проведении лабораторных испытаний было рассмотрено 18 различных положений макета коровы, а расчёт точки подведения и подведение габаритного макета рабочего органа осуществлялись с пятикратной повторностью. В ООО «Бычок-1» испытания проведены для трёх коров. Расчёт координат и подведение габаритного макета рабочего органа осуществлялось с трёхкратной повторностью.

**Четвертая глава** посвящена результатам экспериментальных исследований и натуральных испытаний в производственных условиях.

**Таблица 2 - Результаты измерения погрешности с учётом поправки и без неё.**

Параметр	Без поправки	С учётом поправки	Двухуровневый расчёт
Погрешность, $\Delta_r$ , (м)	0,014	0,0036	0,0073
Погрешность координаты $x$ , $\Delta_x$ , (м)	0,011	0,0010	0,0046
Погрешность координаты $y$ , $\Delta_y$ , (м)	0,0058	0,0010	0,0031
Погрешность координаты $z$ , $\Delta_{zK1}$ , (м)	0,0060	0,0059	0,0042
Погрешность координаты $z$ , $\Delta_{zK2}$ , (м)	0,0032	0,0036	0,0036
Погрешность координаты $z$ , $\Delta_{zCP}$ , (м)	0,0032	0,0032	0,0030
Погрешность определения координат в плоскости $XOY$ , $\Delta_{XOY}$ , (м)	0,013	0,0015	0,0061

Проведенные исследования подтвердили справедливость уравнений (2 – 9). Среднее значение погрешности  $\Delta_r$  по всем точкам рабочей области составило 0,014 м (таблица 2). Для точек рабочей области с координатой  $x$  от 1,244 м до 1,644 м среднее значение погрешности не превышает 0,01 мм. На рисунке 14 приведен график зависимости величины погрешности  $\Delta_r$  от угла  $\varphi$ , который является суммой углов разворота обеих камер  $\alpha$  и  $\beta$ . Из графика следует, что минимум погрешности приходится на угол  $70^\circ$ , что соответствует углу разворота камер в  $32^\circ \dots 34^\circ$ . С увеличением угла  $\varphi$  положение камер приближается к классической стереопаре, однако этом случае погрешность  $\Delta_r$  увеличивается.

Среднее значение относительной погрешности  $\varepsilon_{\Delta r}$  без использования поправок на

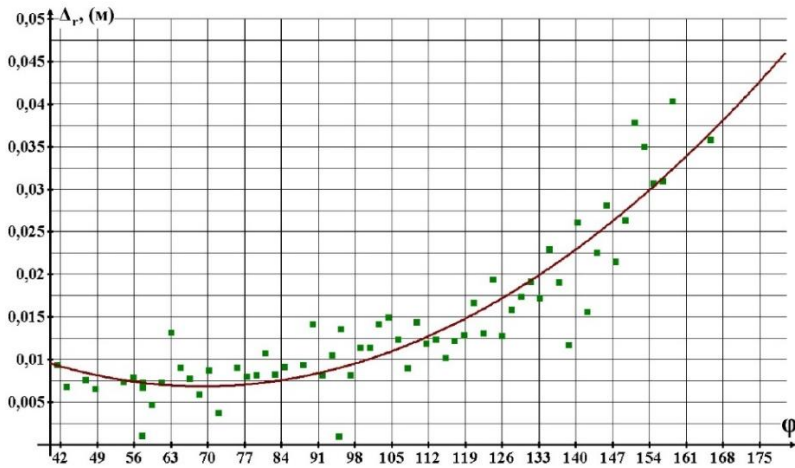


Рисунок 14 – Графики зависимости  $\Delta_r = f(\varphi)$

угол поворота камер составляет 1,1 %, при этом максимальное значение относительной погрешности не превышает 3,2 %.

Среднее значение погрешности при расчёте координат с использованием угловых поправок, определенных для каждой точки при помощи разработанного алгоритма (рисунок 11), составило 0,0036 м, что в 3,8 раза меньше среднего значения погрешности, полученного без использования угловых поправок.

Значительно снижаются и ошибки в определении отдельных координат (таблица 2). На рисунке 15 представлено распределение среднего значения погрешности по точкам рабочей области. Из графиков видно, что погрешность в определении координат не превышает 0,01 м практически во всех точках рабочей области. В 90 % измерений величина погрешности не превышала 0,007 м, а её максимальное значение среди всех 270 измерений составило 0,02 м. Это значение меньше аналогичного показателя, полученного при расчёте погрешности без учёта поправок, более чем в два раза.

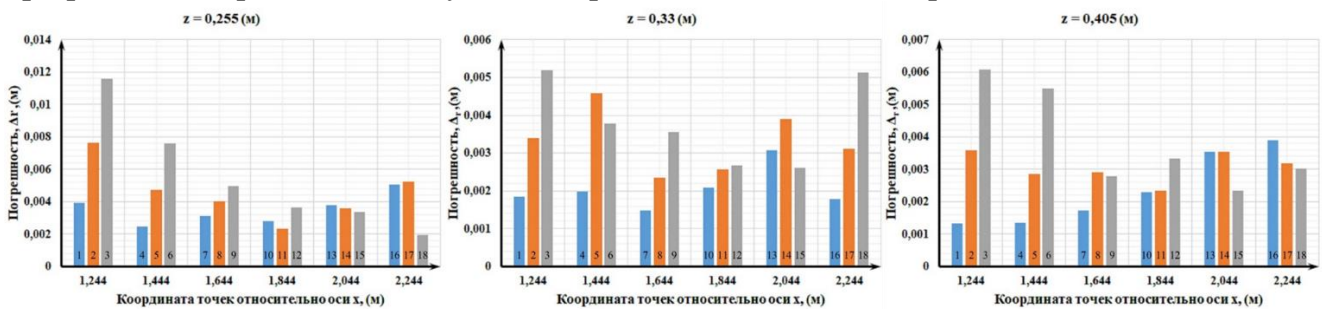


Рисунок 15 - Среднее значение погрешности в различных точках рабочей области с учётом поправок на угол поворота камер

Величина угловой поправки для первой камеры, в зависимости от исследуемой точки рабочей области, находилась в пределах  $[-1,7^0; 0,6^0]$ , а для второй –  $[-0,9^0; 0,4^0]$ . Данные значения не превышают величины одного шага шагового двигателя, применяемого для разворота камер, который равен  $1,8^0$ .

Практически в два раза снизилась и относительная ошибка  $\varepsilon_{\Delta r}$ , среднее значение которой, вычисленное по результатам всех измерений, не превышает 0,5%. Её максимальное значение в отдельных измерениях составило 2,3 %.

В результате статистической обработки экспериментальных данных трёхфакторного трёхуровневого эксперимента получены математические модели  $\Delta\alpha = f_1(x, y, z)$  и  $\Delta\beta = f_2(x, y, z)$ , адекватно описывающие распределение угловых поправок в пределах рабочей области:

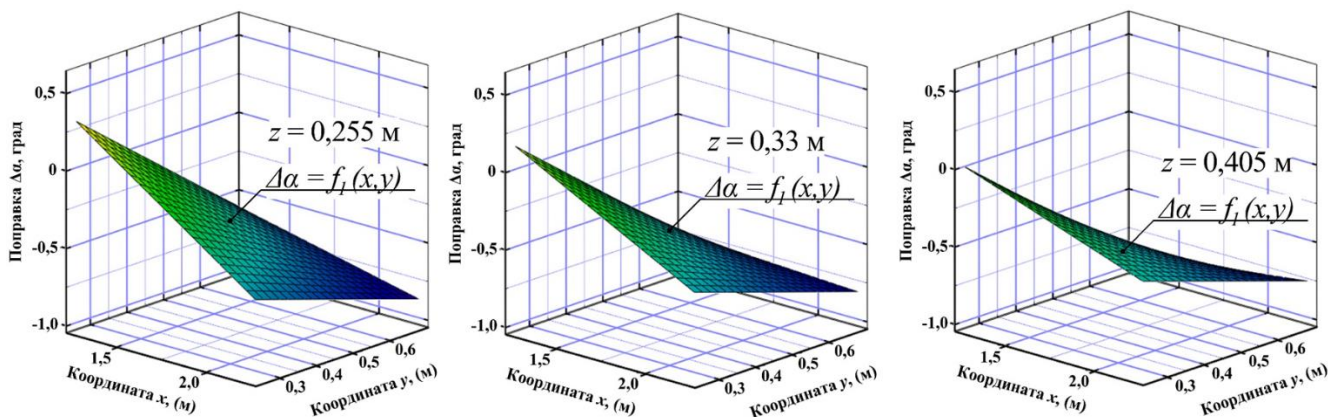
$$\Delta\alpha = 3,63 - 1,84 \cdot x - 3,60 \cdot y - 5,45 \cdot z + 1,25 \cdot x \cdot y + 2,76 \cdot x \cdot z, \quad (13)$$

$$\Delta\beta = -0,56 + 0,088 \cdot x + 1,04 \cdot y + 0,61 \cdot x \cdot y - 2,68 \cdot y^2, \quad (14)$$

где  $x, y, z$  – координаты точек рабочей области, м.

Из уравнений (13) и (14) следует, что для угловой поправки второй камеры  $\Delta\beta$  отсутствует зависимость по отношению к координате  $z$ , в отличие от поправки на угол поворота первой камеры  $\Delta\alpha$ .

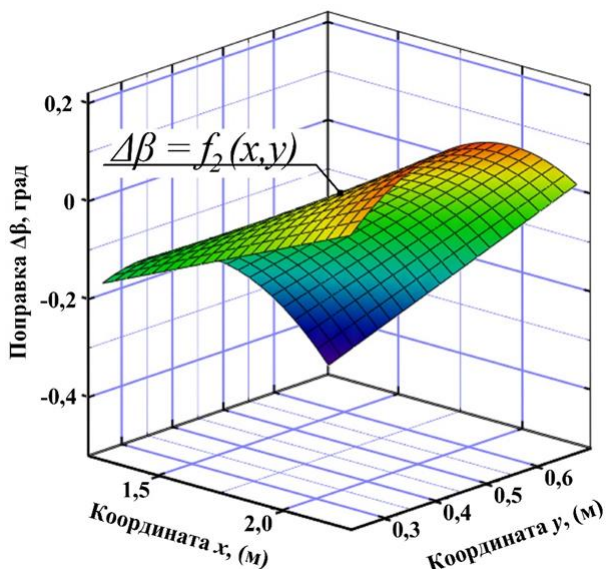
На рисунке 16 приведены поверхности отклика уравнения (13) для различных значений координаты  $z$ . Как видно из рисунка, все поверхности отражают схожий характер распределения поправки  $\Delta\alpha$ . Однако с ростом  $z$  поверхности становятся более пологими.



**Рисунок 16 – Характер распределение угловой поправки  $\Delta\alpha$  первой камеры**

В пределах координат рабочей области угловая поправка первой камеры  $\Delta\alpha$  изменяется от положительных значений до отрицательных. Причём с увеличением координат  $x$  и  $y$  рабочей области, что соответствует удалению объекта съёмки от первой камеры значение поправки увеличивается в сторону отрицательных значений до  $-1^0$ . С увеличением координаты  $z$ , угловая поправка  $\Delta\alpha$  первой камеры стремится к отрицательным значениям. Так, при  $z = 0,405$  м практически все значения  $\Delta\alpha$  находятся в отрицательной области с пределом изменения от  $0^0$  до  $-0,7^0$ .

На рисунке 17 приведена поверхность отклика для зависимости (14). Как видно из рисунка большинство точек поверхности  $\Delta\beta = f_2(x, y)$  находятся в отрицательной области, то есть поправки имеют отрицательное значения.



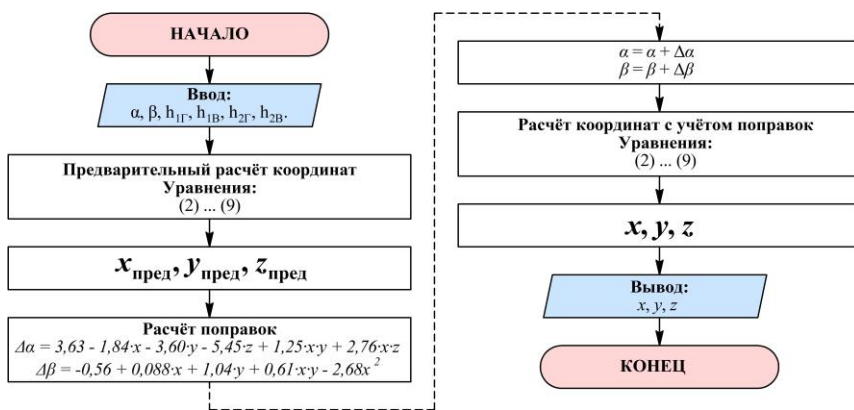
**Рисунок 17 – Характер распределение угловой поправки  $\Delta\beta$  второй камеры**

Наибольшее значение угловая поправка  $\Delta\beta$  имеет в отрицательной области для точки с координатами (1,244; 0,694). Эта точка наиболее приближена ко второй камере, а поправка в ней равна  $-0,5^0$ . Положительные значения угловая поправка  $\Delta\beta$  имеет в точках, наиболее удаленных от второй камеры, для которых координата  $x$  равна 2,244 м. Здесь угловая поправка не превышает  $0,1^0$ . Таким образом, для угловой поправки  $\Delta\beta$  существует тренд, согласно которому при удалении точек рабочей области угловая поправка изменяется от отрицательных значений к положительным.

Уравнения (13) и (14) были добавлены в программное обеспечение, и на их основе предложена методика двухступенчатого расчёта координат. Блок схема данного

алгоритма приведена на рисунке 18.

На первом этапе данного алгоритма при помощи соотношений (2 – 9) вычисляются предварительные координаты объекта съёмки  $x_{\text{ПРЕД}}$ ,  $y_{\text{ПРЕД}}$ ,  $z_{\text{ПРЕД}}$ , после чего осуществляется расчёт угловых поправок при помощи соотношений (13) и (14). На втором этапе производится повторный расчёт координат с учётом поправок.



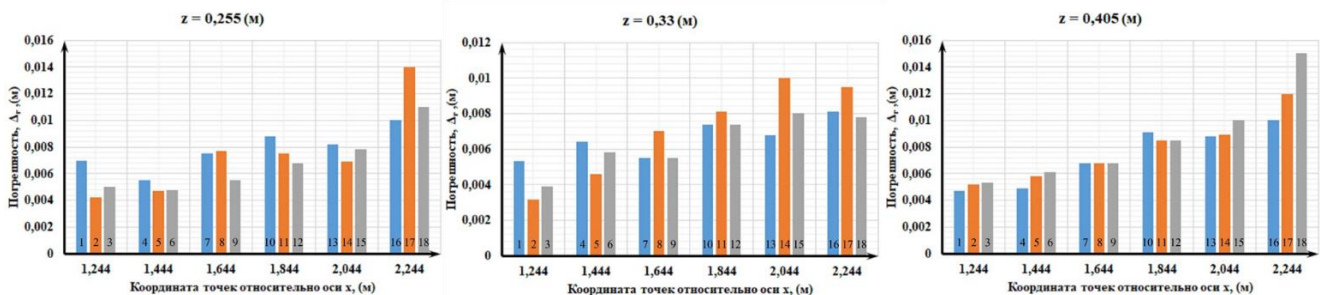
**Рисунок 18 – Блок схема алгоритма двухступенчатого расчёта координат**

При использовании данного алгоритма среднее значение погрешности  $\Delta_r$  снизилось практически в два раза и составило 0,0073 м (таблица 2). Также в два раза снизились погрешности определения отдельных координат. Среднее значение относительной ошибки  $\varepsilon_{\Delta r}$  при использовании двухуровневого расчёта составило 0,6 %, что также в

два раза меньше аналогичной величины, полученной при расчёте координат без использования угловых поправок.

На рисунке 19 приведены графики, отражающие распределение погрешности в различных точках рабочей области при использовании двухуровневого расчёта координат. Как видно из рисунка 19, точки, в которых погрешность  $\Delta_r$  не превышает 1 см, расположены в пределах  $1,244 < x < 2,044$ . Только в точках последнего ряда рабочей области среднее значение погрешности превышало значение в 1 см. При этом во всех точках плоскости с координатой  $z$ , равной 0,33 м, погрешность в определении координат не превышает 1 см.

Таким образом размеры области, в пределах которой среднее значение погрешности не превышает 1 см, также увеличиваются в два раза. Такая погрешность сравнима с радиусом соска и в роботизированной установке преддоильной подготовки вымени и может быть нивелирована рабочим органом с двумя роликовыми щётками большого радиуса.



**Рисунок 19 - Среднее значение погрешности в различных точках рабочей области при двухуровневом расчёте координат**

Испытания, проведенные в АО Учхоз «Чернореченский», позволили сделать вывод о том, что определенные размеры станка позволяют разместиться в нём достаточно крупным животным. Коровы могут перемещаться в станке, прижимаясь к задней, передней и боковым стенкам станка согласно пяти схемам, рассмотренным при проведении кинематического исследования (рисунок 4). При проведении испытаний во всех случаях длины рычагов позволили беспрепятственно подводить механическую руку манипулятора в рабочую область.

Лабораторные и натурные испытания машинного зрения показали, что предложенный способ определения координат сосков вымени на базе двух видеокамер может быть использован в работе, осуществляющем подмыв и массаж вымени коров перед доением. В испытаниях с макетом коровы было осуществлено 90 измерений, из которых удачными были признаны 87. Таким образом, успешность верного определения

рабочей области составила 97%. При проведении аналогичных испытаний в условиях сельскохозяйственного предприятия ООО «Бычок-1» данный показатель оказался ниже и составил 78%. Неудачные попытки подведения габаритного макета рабочего органа, в первую очередь, были связаны с непрекращающимися перемещениями животного в станке, обусловленного несовершенством его конструкции и отсутствием продолжительного периода приучения животного к роботу.

**В пятом разделе** выполнен сравнительный экономический анализ доильной установки типа «Карусель», включающей 32 станка и обслуживающей 800 дойных коров при помощи 3-х операторов, с аналогичной доильной установкой, оснащенной роботом для осуществления подготовительных операций.

Экономический эффект роботизированной установки определяется сокращением числа операторов, обслуживающих доильную установку, и повышением её пропускной способности. Годовой экономический эффект от снижения затрат ручного труда составляет 962 тыс. рублей, а срок окупаемости равен 3,1 года.

### **Заключение**

1) Разработана функциональная схема роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров (патент РФ №176985). На основе кинематического исследования определены размеры станка установки – 2500 x 900 мм, оптимальные длины рычагов манипулятора – 630 мм и 380 мм и его положение относительно станка установки. Анализ согласованной работы конвейерно-кольцевой доильной установки типа «Карусель» с роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени позволил установить продолжительность рабочего цикла роботизированной установки –  $T_{ц\text{руппв}} = 40 - 46$  с. При оптимизации продолжительности отдельных операций –  $T_{ц\text{руппв}} = 34$  с.

2) Усовершенствована технология доения коров на конвейерно-кольцевых доильных установках типа «Карусель» путём использования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени, которая в автоматическом режиме выполняет подмыв и массаж вымени перед выходом коровы на платформу доильной установки. Оптимально использовать роботизированную установку преддоильной подготовки вымени с доильными установками, на платформе которых установлено до 40 станков. Применение роботизированной установки преддоильной подготовки вымени позволяет повысить пропускную способность доильной установки на 1,5...4,5 %, за счёт выноса подготовительных операций за пределы вращающейся платформы.

3) Разработана система позиционирования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени (патенты РФ №185290, №218509). Получены аналитические выражения, позволяющие определить координаты сосков вымени в системе координат, связанной со станком роботизированной установки, по смещению их контуров относительно центра изображений, получаемых с камер. Получена система уравнений, связывающих количество шагов, которые должны совершить шаговые двигатели для наведения в точку с заданными координатами.

4) Разработаны программа экспериментальных исследований, а также: методика измерения погрешности определения координат сосков вымени машинным зрением; методика подбора угловых поправок; методики лабораторных и натуральных испытаний, позволяющих оценить возможность применения предложенного способа определения положения сосков вымени в пространстве для вычисления координат всех сосков вымени.

5) Среднее значение погрешности в определении координат  $\Delta_r$  составляет 0,014 м. Среднее значение относительной ошибки  $\varepsilon_{\Delta r}$  оказалось равным 1,1 %. Для точек рабочей области с координатой  $x$ , равной 1,244...1,644 м, среднее значение погрешности не

превышает 1 см. На основе экспериментальных данных получены математические модели  $\Delta\alpha = f_1(x, y, z)$  и  $\Delta\beta = f_2(x, y, z)$ , адекватно описывающие распределение величины угловой поправки для точек рассматриваемой рабочей области. На основе данных уравнений построен алгоритм двухступенчатого определения координат. Среднее значение погрешности при расчёте координат  $\Delta_r$  с использованием двухступенчатого алгоритма составило 0,0073 м, а величина относительной ошибки  $\varepsilon_{\Delta r}$  оказалась равной 0,6 %, что в два раза меньше, чем при прямом расчёте координат без использования угловых поправок. В 80% измерений погрешность не превышала 1 см. Также в два раза увеличились размеры области, в пределах которой погрешность  $\Delta_r$  не превышает 1 см. Этому условию удовлетворяют точки, координата  $x$  которых находится в пределах 1,244...2,044 м. Процент успешных подведений манипулятором габаритного макета рабочего органа в расчётную точку в лабораторных условиях составил 97 %, а при проведении натуральных испытаний – 78 %.

б) Годовая экономическая эффективность при использовании роботизированной установки преддоильной подготовки вымени достигается за счёт снижения затрат труда и составляет 962244 руб., а её срок окупаемости равен 3,1 года.

#### **Рекомендации производству**

Использовать роботизированную установку преддоильной подготовки вымени коров для осуществления подмыва и массажа вымени на конвейерно-кольцевых доильных установках типа «Карусель» в хозяйствах, основным направлением деятельности которых является производство молока, что позволит снизить затраты труда при доении коров и повысить пропускную способность доильной установки. Для создания роботизированной установки использовать систему позиционирования согласно патенту №185290, которая является достаточно дешёвым и простым с точки зрения электроники решением, обеспечивающим достаточную точность для выполнения подготовительных операций перед доением.

#### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Для дальнейшего развития данной темы необходимо: разработать конструкцию станка, обеспечивающего минимальные перемещения животного в процессе преддоильной подготовки; разработать конструкцию рабочего органа и исследовать влияние его параметров на качество выполнения подготовительных операций; разработать алгоритмы, в том числе на основе нейронных сетей, позволяющих определять положение сосков на изображениях, получаемых с камер, и исследовать их влияние на точность в определении координат.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

*Рецензируемые издания, рекомендованные ВАК РФ:*

1. Роботизированная установка преддоильной подготовки вымени / Н. В. Муханов, А. В. Крупин, Д. В. Барабанов, Н. Н. Сафонова // Аграрный вестник Верхневолжья. – 2016. – № 3. – С. 100-104. – EDN WMUEMT.

2. Кинематическое исследование манипулятора роботизированной установки преддоильной подготовки вымени / А. М. Абалихин, Н. В. Муханов, А. В. Крупин [и др.] // Аграрный вестник Верхневолжья. – 2018. – № 4(25). – С. 99-108. – EDN VQCWTY.

3. Анализ работы и разработка требований к роботизированным доильным системам на примере хозяйства Ивановской области / Л. В. Гуркина, Н. В. Муханов, Д. В. Барабанов, А. В. Крупин // Аграрный вестник Верхневолжья. – 2019. – № 4(29). – С. 102-111. – DOI 10.35523/2307-5872-2019-29-4-102-111. – EDN ZAGZFF.

4. Исследование режимов работы манипулятора роботизированной установки преддоильной подготовки вымени / Н. В. Муханов, В. А. Смелик, Д. В. Барабанов, Л. В.

Гуркина // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 56. – С. 158-166. – DOI 10.24411/2078-1318-2019-13158. – EDN BDDLQY.

5. Барабанов, Д. В. Исследование системы машинного зрения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров / М. А. Керимов, Н. В. Муханов, Д. В. Барабанов // АгроЭкоИнженерия. – 2024. – № 1(118). – С. 118-135. – DOI 10.24412/2713-2641-2024-1118-118-135.

*Патенты:*

6. Патент на полезную модель № 176985 U1 Российская Федерация, МПК А01J 7/04. Установка преддоильной подготовки вымени : № 2017109989 : заявл. 24.03.2017 : опубл. 05.02.2018 / Д. В. Барабанов, Н. Н. Сафонова, Н. В. Муханов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановская государственная сельскохозяйственная академия имени Д.К. Беляева". – EDN GYUODM.

7. Патент на полезную модель № 185290 U1 Российская Федерация, МПК А01J 5/00, А01J 7/04. Устройство для позиционирования манипулятора роботизированных установок преддоильной подготовки вымени и доения : № 2017130401 : заявл. 28.08.2017 : опубл. 29.11.2018 / Д. В. Барабанов, Н. Н. Сафонова, Н. В. Муханов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановская государственная сельскохозяйственная академия имени Д.К. Беляева". – EDN UKAUDT.

8. Патент на полезную модель № 218509 U1 Российская Федерация, МПК А01J 7/04. Манипулятор установки преддоильной подготовки вымени : № 2023107673 : заявл. 29.03.2023 : опубл. 29.05.2023 / М. А. Керимов, Д. В. Барабанов, Н. В. Муханов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный аграрный университет". – EDN SWVQHG.

*Прочие издания:*

9. Theoretical detection of udder coordinates under optical method of manipulator positioning / N. V. Mukhanov, D. V. Barabanov, A. V. Krupin [et al.] // International scientific and practical conference "Agro-SMART - Smart solutions for agriculture" (Agro-SMART 2018), Tyumen, 16–20 июля 2018 года. Vol. 151. – Tyumen: Atlantis Press, 2018. – P. 504-509. – EDN UXUJDB.

10. Алгоритм работы блока управления роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени / Д. В. Барабанов, А. В. Крупин, Н. В. Муханов, А. М. Абалихин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2019. – № 1(33). – С. 90-95. – EDN WQPULV.

11. Керимов, М. А. Оптимизация технологии доения коров за счет совершенствования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени / М. А. Керимов, Д. В. Барабанов, И. Я. Г. Нам // АгроЗооТехника. – 2023. – Т. 6, № 1. – DOI 10.15838/alt.2023.6.1.6. – EDN MATJGC.