

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"

На правах рукописи



Барабанов 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

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Научный руководитель:**  
доктор технических наук, профессор  
Керимов Мухтар Ахмиевич

Санкт-Петербург-Пушкин – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                                                                          | 4   |
| ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ<br>ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКИ ВЫМЕНИ КОРОВ К ДОЕНИЮ.....                                                                               | 14  |
| 1.1. Роль и значение преддоильной подготовки вымени коров в технологии машинного<br>доения .....                                                                                        | 14  |
| 1.2. Анализ затрат труда и технических средств применяемых для преддоильной<br>подготовки при различных способах содержания коров .....                                                 | 18  |
| 1.3. Анализ автоматизированных и роботизированных систем для подготовки вымени<br>к доению .....                                                                                        | 33  |
| 1.4. Анализ систем позиционирования автоматизированных систем для доения коров<br>.....                                                                                                 | 49  |
| 1.5. Выводы по главе .....                                                                                                                                                              | 61  |
| 1.6. Цель и задачи исследования .....                                                                                                                                                   | 62  |
| ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ<br>ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ РОБОТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ<br>ПРЕДДОИЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ВЫМЕНИ КОРОВ И СИСТЕМЫ<br>ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ..... | 64  |
| 2.1. Функциональная схема роботизированной установки преддоильной подготовки<br>вымени коров .....                                                                                      | 64  |
| 2.2. Согласованная работа роботизированной установки преддоильной подготовки<br>вымени и доильной установки «Карусель» .....                                                            | 73  |
| 2.3. Кинематическое исследование .....                                                                                                                                                  | 87  |
| 2.4. Теоретическое исследование перемещения рычагов манипулятора лабораторной<br>установки .....                                                                                        | 96  |
| 2.5. Машинное зрение на основе двух 2D камер.....                                                                                                                                       | 104 |
| 2.6. Выводы по главе .....                                                                                                                                                              | 113 |
| ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ И .....                                                                                                                                      | 115 |
| НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....                                                                                                                                                             | 115 |
| 3.1 Программа и методика лабораторных и натурных исследований .....                                                                                                                     | 115 |

|                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2. Лабораторная установка .....                                                                                                       | 116 |
| 3.3. Программное обеспечение ЭВМ.....                                                                                                   | 123 |
| 3.4. Методика измерения погрешности.....                                                                                                | 127 |
| 3.5. Методика расчёта угловых поправок, и методика двухступенчатого расчёта координат.....                                              | 133 |
| 3.6. Аprobация результатов кинематического исследования .....                                                                           | 136 |
| 3.7. Испытания машинного зрения в лабораторных и производственных условиях                                                              | 138 |
| 3.8. Выводы по главе .....                                                                                                              | 142 |
| ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....                                                                                                   | 143 |
| 4.1. Результаты экспериментальных исследований величины погрешности в различных точках рабочей области .....                            | 143 |
| 4.2. Результаты экспериментальных исследований влияния угловых поправок на величину погрешности в различных точках рабочей области..... | 146 |
| 4.3. Результаты исследования двухуровневого расчёта координат .....                                                                     | 149 |
| 4.4. Результаты апробации кинематического анализа .....                                                                                 | 156 |
| 4.5. Результаты лабораторных испытаний машинного зрения .....                                                                           | 158 |
| 4.6. Результаты натурных испытаний машинного зрения.....                                                                                | 161 |
| 4.7. Выводы по главе .....                                                                                                              | 164 |
| РАЗДЕЛ 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ПРЕДДОИЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ВЫМЕНИ КОРОВ .....           | 166 |
| 5.1. Исходные данные для расчета экономической эффективности применения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени ..... | 166 |
| 5.2. Методика расчёта экономической эффективности применения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени .....            | 169 |
| 5.3. Результаты расчета экономической эффективности применения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени.....           | 174 |
| 5.4. Выводы по главе .....                                                                                                              | 175 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....                                                                                                                         | 176 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....                                                                                                                  | 179 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ .....                                                                                                                        | 203 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Большое значение в пищевом рационе россиян имеют молоко и молочные продукты. Их использование очень важно для сбалансированного питания человека. В настоящее время доля молочной продукции в структуре продовольственной корзины (в денежном выражении) в различных регионах страны составляет порядка 20 – 30% [1, 2, 3].

За последние три десятилетия объём потребления молочной продукции претерпел сильные изменения и в настоящее время имеет довольно низкое значение (рисунок 1). Так, по данным федеральной службы государственной статистики, в 1990 году средний уровень потребления молочной продукции составлял 387 кг на человека в год, а уже к 1995 году этот показатель снизился до 254 кг на человека в год, т.е. на 34,4%. В последующие пять лет динамика также оказалась отрицательной: к 2000 году общее падение потребления молочной продукции составило 44,4% по отношению к 1990 году. В 2000-е годы величина потребления молочных продуктов также менялась, однако это изменение в процентном отношении не столь значительно, как в 90-е годы, что можно видеть на рисунке 1. [4, 5, 6]

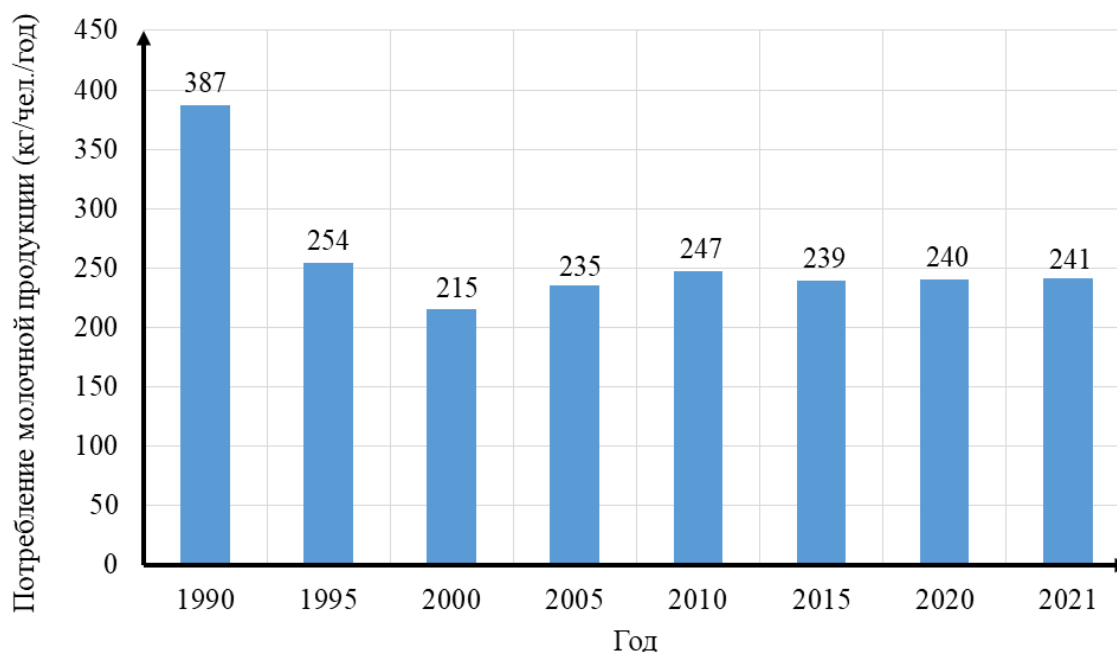


Рисунок 1 – Динамика изменения потребления молочных продуктов за период 1990 – 2021 годов (кг/чел./год).

Как видно из рисунка 1, к 2021 году показатель потребления молочных продуктов составляет всего 241 кг/чел/год. При этом в 2016 году Приказом №614 Министерства здравоохранения Российской Федерации установлена норма потребления молочных продуктов, отвечающая современным требованиям здорового питания – 322 кг на человека в год (с учетом поправок, внесённых в 2022 году). [7]

В этом аспекте показательна динамика изменения показателей производства молока сельхозпроизводителями в тех же временных рамках, основанная на данных федеральной службы государственной статистики (рисунок 2) [4, 5, 6].

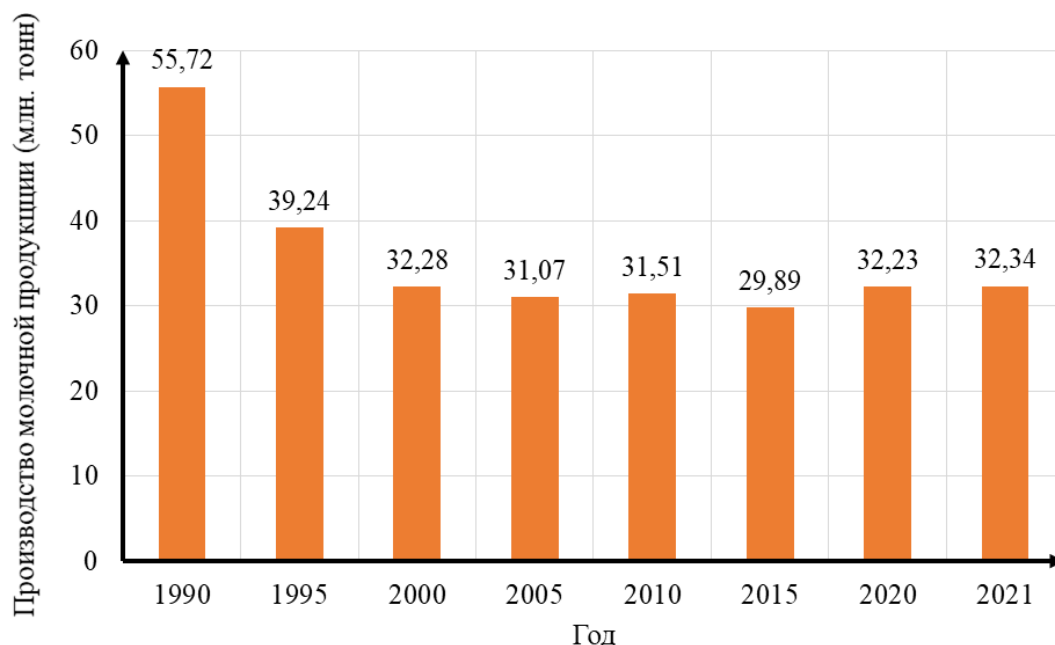


Рисунок 2 – Динамика производства молочной продукции всеми категориями хозяйств за период 1990 – 2021 годов (млн. тонн).

Как следует из рисунка 2, максимальный спад на 42 % также приходится на 1990 – 2000 годы. В следующие периоды падение производства сменялось ростом, однако на незначительные величины, и в целом, как и потребление, оставалось примерно на одинаковом уровне. По состоянию на 2021 год производство молока в России всеми категориями хозяйств составляет 3,2 млн. тонн в год, что свидетельствует о попытках сельхозпроизводителей страны нарастить производство молока. [4, 5, 6]

Схожий характер диаграмм производства и потребления молочной продукции говорит о зависимости величины годового потребления молочной продукции от величины её производства. Поэтому развитие молочного животноводства является приоритетным для Министерства сельского хозяйства Российской Федерации. Для этих целей разработан комплекс мер государственной поддержки молочного животноводства.

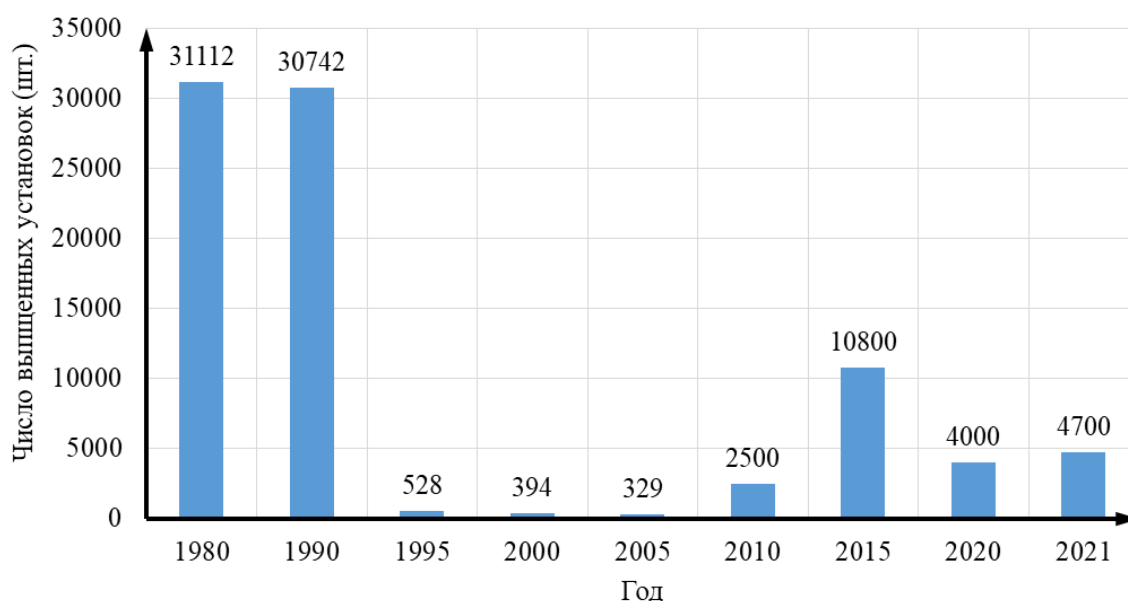


Рисунок 3 – Динамика производства доильных установок за период 1980 – 2021 годов.

Одним из ключевых факторов, способствующих росту эффективности производства молочных продуктов, является улучшение технологической оснащённости хозяйств, а также разработка и внедрение современных автоматизированных и роботизированных систем. К 1990 году отечественные специализированные машиностроительные предприятия выпускали серийное оборудование: доильные установки, кормораздатчики, резервуары-охладители, навозоуборочную технику и т.д. Однако в период экономического кризиса 90-х годов объёмы производства данного оборудования существенно снизились, о чём красноречиво говорят данные статистики по производству доильного оборудования (рисунок 3). Это привело к отставанию в разработке нового

оборудования и моральному устареванию прежде выпускаемого оборудования, что вызвало увеличение поставок импортного оборудования. Немаловажную роль здесь также сыграло полное разрушение системы технического сервиса и обслуживания отечественного оборудования [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Разработка и применение роботизированных систем в аграрной отрасли тоже имеет важное социальное значение. В настоящее время сельское хозяйство испытывает дефицит квалифицированных кадров, который возник из-за низкой привлекательности сельскохозяйственных специальностей. Этому способствовал и миграционный отток жителей сельских территорий. [16, 17, 18]

Затраты труда при машинном доении коров с применением традиционных доильных установок составляют порядка 40 – 65% от всех трудовых затрат по обслуживанию дойного стада [19]. Снизить эти затраты позволяют доильные роботы. Кроме того, данные системы способствуют повышению качества молока и сохранению здоровья животных. Эти системы способны автономно выполнять все необходимые операции, предусмотренные технологией машинного доения [14, 15, 20, 21, 22, 23, 24, 25]

Тем не менее на пути массового внедрения роботов в молочном производстве возникает препятствие в виде высокой стоимости данного оборудования, которое в основном представлено импортными производителями. Только в последние годы в России удалось наладить собственное производство доильных роботов. [15, 20, 21, 26, 27]

При этом наиболее трудозатратной операцией при доении коров является подготовка вымени к доению, а именно выполнение подмыва и массажа вымени. Поэтому достаточно актуальной задачей является разработка роботизированных систем, позволяющих автоматизировать выполнение отдельных технологических операций, в том числе подмыв и массаж вымени. Такие роботизированные системы могут иметь более простую конструкцию, что позволит снизить их стоимость и доступность для хозяйств. Кроме того, данные системы могут быть интегрированы в уже существующие доильные залы с традиционными доильными установками, в

частности с конвейерно-кольцевыми доильными установками типа «Карусель». Это позволит повысить эффективность их применения.

**Цель исследования** – 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**

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 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.

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

**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, описывающих распределение величины поправки на угол разворота камер в пространстве и позволяющих повысить точность определения координат сосков вымени.

**Теоретическая и практическая значимость 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 получении на основе экспериментальных исследований математических моделей, описывающих распределение величины поправки на угол разворота камер в пространстве и позволяющих повысить точность определения координат сосков вымени.

### **Методология и методы исследования.**

При проведении исследования были использованы методы математического моделирования с применением математической статистики и теории планирования эксперимента. 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 MSExcel, Statistika 6.0, Mathcad 14, Advanced Grapher. Для разработки программного обеспечения, применяемого при проведении исследований в лабораторных и производственных условиях была использована среда разработки Microsoft Visual Studio 2019 с применением языка программирования C++, а также среда разработки Arduino IDE для программирования микроконтроллеров.

При создании лабораторной установки были использованы: система автоматизированного проектирования КОМПАС-3D, программы для 3D печати Repiter-Host и лазерной резки RDWorks.

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательской работы ФГБОУ ВО СПбГАУ по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности функционирования сельскохозяйственных машин и оборудования в условиях глобального изменения климата за счёт применения цифровых систем мониторинга состояния и управления технологическими процессами, совершенствования конструкции, повышения износостойкости»; раздел «Повышение эффективности функционирования измельчительных и кормоприготовительных технологий в животноводстве на основе биоэнергетической концепции, системного подхода к исследованию машин и их рабочих процессов, разработки оптимальных схмотехнических решений,

применения информационно-цифрового инструментария при управлении и контроле».

### **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 видео камер;
- 4) методика двухуровневого определения координат сосков вымени машинным зрением, содержащая 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.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертационного исследования доложены, обсуждены и получили положительную оценку на научных конференциях:

- 1) Всероссийская научно-методическая конференция с международным участием «Наука и молодежь: новые идеи и решения в АПК» (2016 г., ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА, г. Иваново);
- 2) Международный конгресс "Сельское хозяйство - драйвер российской экономики (для обсуждения и выработки решений)" в рамках международной агропромышленной выставки-ярмарки "Агрорусь-2016" (2016 г., ФГБОУ ВО СПбГАУ, г. Санкт-Петербург);

- 3)** Международная научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава «Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения» (2016 г. ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА, г. Иваново);
- 4)** Всероссийская научно-методическая конференция с международным участием, посвященная 100-летию академика Д.К. Беляева (2017 г., ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА, г. Иваново);
- 5)** IX Всероссийский робототехнический фестиваль «Робофест – 2017» (2017 г., ВДНХА, г. Москва);
- 6)** Всероссийский инженерный конкурс (2017 г., Самарский университет, г. Самара);
- 7)** Российская агропромышленная выставка «Золотая осень» (2018 г., г. Москва);
- 8)** XXVII международная агропромышленная выставка «Агрорусь - 2018» (2018 г., ФГБОУ ВО СПбГАУ, г. Санкт-Петербург);
- 9)** Всероссийская научно-методическая конференция с международным участием, посвященной 100-летию высшего аграрного образования в Ивановской области (2018 г., ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА, г. Иваново);
- 10)** International scientific and practical conference "AgroSMART - Smart solutions for agriculture" (AgroSMART 2018) (2018 г., г. Томск);
- 11)** Международная научно-практическая конференция, посвященная 20-летию первого выпуска технологов сельскохозяйственного производства «Научно-образовательные и прикладные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции» (2018 г., ФГБОУ ВО Чувашский ГАУ, г. Чебоксары);
- 12)** Международная научно-практическая конференция «Наука и образование как основа устойчивого развития агропромышленного комплекса» (2018 г., ФГБОУ ВО СПбГАУ, г. Санкт-Петербург);
- 13)** Международная научно-техническая конференция «Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства» (2018 г., Институт механизации животноводства - филиал ФНАЦ ВИМ, г. Москва);

- 14)** Международная научно-практическая конференция «Развитие агропромышленного комплекса на основе современных научных достижений и цифровых технологий» (2019 г., ФГБОУ ВО СПбГАУ, г. Санкт-Петербург);
- 15)** Научно-практическая конференция «Повышение эффективности и техническая модернизация технологических процессов, машин, энергетического оборудования при производстве и переработке сельскохозяйственной продукции» (2022 г., 31-ая Международная агропромышленная выставка-ярмарка «Агрорусь», ФГБОУ ВО СПбГАУ, г. Санкт-Петербург);
- 16)** Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Совершенствование инженерно-технического обеспечения производственных процессов и технологических систем» (2023 г., ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ, г. Оренбург);
- 17)** Научно-практическая конференция «Повышение эффективности и техническая модернизация технологических процессов, машин, энергетического оборудования при производстве и переработке сельскохозяйственной продукции» (2023 г., 32-ая Международная агропромышленная выставка-ярмарка «Агрорусь», ФГБОУ ВО СПбГАУ, г. Санкт-Петербург)

### **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.

# **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКИ ВЫМЕНИ КОРОВ К ДОЕНИЮ**

## **1.1. Роль и значение преддоильной подготовки вымени коров в технологии машинного доения**

При машинном доении коров операторы доильных установок руководствуются правилами машинного доения. Соблюдение этих правил, в первую очередь, продиктовано учётом особенностей физиологии животных, а также имеет под собой нормативную основу.

Так, 29 сентября 1986 года в рамках ветеринарного законодательства СССР государственным агропромышленным комитетом были утверждены «Санитарные и ветеринарные правила для молочных ферм колхозов, совхозов и подсобных хозяйств». Эти правила содержат общие положения, где указывается, что требования, излагаемые в них, обязательны для молочных ферм колхозов, совхозов и подсобных хозяйств. Кроме того, данный документ содержит ветеринарно-санитарные требования, согласно которым при организации машинного доения необходимо руководствоваться «Правилами машинного доения коров», утвержденными Министерством сельского хозяйства СССР 1982 г [28].

В 2007 году было опубликовано письмо Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 0100/4962-07-32 «О действующих нормативных и методических документах по гигиене питания», согласно которому признавались действующими санитарные и ветеринарные правила для молочных ферм, колхозов, совхозов и подсобных хозяйств [29].

Таким образом, данные правила были действительными вплоть до 16 ноября 2020 года, когда вышло Постановление правительства Российской Федерации №1850 «О признании не действующими на территории Российской Федерации актов и отдельных положений актов, изданных центральными органами государственного управления РСФСР и СССР». В перечень недействительных в том числе попали санитарные и ветеринарные правила для молочных ферм, колхозов, совхозов и подсобных хозяйств [30].

Однако сразу после этого опубликован Приказ министерства труда и социальной защиты России от 27 октября 2020 №746н "Об утверждении Правил по охране труда в сельском хозяйстве", который действует до 31 декабря 2025 года. В этом Приказе, согласно пункту 567, работники, эксплуатирующие и обслуживающие доильную установку, должны соблюдать правила доения и инструкцию по её эксплуатации. При этом в документе нет указаний на конкретную версию правил доения [31].

Тем не менее правила машинного доения различных изданий имеют схожую структуру ввиду того, что в их основе лежат физиологические особенности животных. В правилах машинного доения приведен алгоритм действий, который строго должен быть выполнен дояркой (оператором машинного доения) перед началом доения [32, 33, 34, 35, 36].

Независимо от вида доильной установки технология машинного доения коров предусматривает последовательное выполнение следующих операций:

- 1) создание вакуума в воздушной системе доильной установки;
- 2) выполнение преддоильной подготовки вымени;
- 3) одевание доильных стаканов на соски;
- 4) доение и транспортировка молока в накопительную емкость;
- 5) машинное додаивание;
- 6) снятие стаканов с сосков;
- 7) обработка сосков после доения [32, 33, 34, 35, 36, 37].

При этом операция преддоильной подготовки вымени коров перед доением заключается в выполнении оператором доильной установки следующих действий:

- 1) подмыв вымени;
- 2) массаж вымени;
- 3) вытирание вымени;
- 4) сдаивание первых струек молока [32, 33, 34, 35, 36, 37].

Целью подмыва вымени является удаление загрязнений и снижение бактериальной обсеменённости наружных тканей. Подмыв производится чистой тёплой водой с температурой порядка 40 – 45 °С. Это немаловажно, так как при

этом расширяются кровеносные сосуды, в результате чего ускоряется процесс образования и отдачи молока. Применение холодной воды ведет к стрессовым ситуациям, задержке выработки окситоцина и, как следствие, резкому снижению интенсивности молокоотдачи [32, 33, 34, 35, 36, 37].

Массаж вымени коров – это комплекс механических раздражителей: манипуляций, направленных на раздражение нервных окончаний сосков и кожи вымени. Массаж проводится быстрыми энергичными движениями. Цель массажа заключается в достижении полноценного рефлекса молокоотдачи за счёт выделения в крови животного гормона окситоцина. Это способствует более полному и быстрому перемещению молока в молочные цистерны и увеличению интенсивности доения, обеспечивая быстрое и полное выдаивание коровы [32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39].

Массаж вымени играет важную роль не только в стимуляции рефлекса молокоотдачи, но и в последующем образовании молока. Связано это с тем, что массаж улучшает кровоснабжение вымени, а это, в свою очередь, увеличивает доставку питательных веществ к альвеолам и тем самым создает благоприятные условия для нового периода молокообразования в промежутках между доениями. Так, например, при постоянном массаже вымени на протяжении 15 – 20 секунд, продуктивность коров за лактацию увеличивается на 6 – 7% [28, 29, 30, 31, 32, 38].

Таким образом качественно проведенные операции преддоильной подготовки способствуют отдаче за одну дойку на 400 – 500 г молока больше, чем в случае неудовлетворительной обработки. Также увеличение длительности подготовки вымени к доению на 10 – 15 секунд способствует сокращению доения. В некоторых случаях это сокращение достигает 1 минуты [40].

Полезный эффект проведения массажа заключается и в предохранении вымени от заболеваний, в первую очередь от мастита. Кроме того, массаж вымени активизирует деятельность яичников, что помогает своевременному оплодотворению коров [41, 42, 43].

После подмыва вымени коровы очень важно тщательно обтереть вымя, так как доильный аппарат должен надеваться только на сухие соски вымени.

Негативные последствия «мокрой» обработки заключаются в следующем. Воздух по складкам кожи соска понемногу просачивается в доильный стакан от головки сосковой резины до сфинктера соска. Благодаря этому молоко транспортируется из стакана в коллектор (в коллекторе для транспортировки молока до молокопровода есть небольшое отверстие для подсоса воздуха), а в головке сосковой резины вакуум понижается до 20 кПа. Если стаканы надеваются на мокрое вымя, то складки кожи закрыты водяной пленкой, воздух не просачивается и вакуум в головке сосковой резины возрастает до рабочего – 42 кПа. Из-за этого стаканы наползают на сосок, пережимают его у основания, и процесс молоковыведения затрудняется. Если доильный аппарат был надет на влажное вымя, то после его снятия у основания соска видно синее кольцо. Если доильный аппарат периодически надевается на влажное вымя, то у основания соска ткани постепенно грубеют, перерождаются, мышцы вокруг канала в соске становятся менее эластичными, корова доится все дольше и труднее, увеличивается риск возникновения мастита. Также доение мокрого вымени является одной из причин гиперкератоза – повреждения сфинктеров сосков [44].

Сдаивание первых струек молока способствует существенному снижению его бактериальной обсеменённости благодаря удалению «микробной пробки». Также по внешнему виду этого молока можно на ранних стадиях диагностировать наличие заболеваний молочной железы.

При правильной преддоильной подготовке вымени корова быстро отдает молоко, и процесс доения заканчивается почти одновременно со снижением концентрации окситоцина в крови, то есть через 4 – 6 мин [33, 36].

Таким образом, хорошая подготовка к доению способствует:

- 1) снижению общей продолжительности доения и повышению производительности доильной техники;
- 2) полному освобождению вымени от молока и повышению продуктивности животных, а также увеличению валового выхода молока;
- 3) предотвращению переноса патогенных микробов от больных животных к здоровым и сохранению здоровья стада, а также сокращению затрат на

ветеринарное обслуживание;

4) уменьшению вероятности попадания микроорганизмов в молоко и повышению его качества.

Все эти факторы в конечном итоге способствуют сокращению затрат и росту прибыли при производстве молока. Поэтому вложение средств в разработку нового оборудования для проведения качественной преддоильной подготовки вымени коров не только экономически оправдано, но и позволит качественно изменить культуру труда, что несомненно скажется на привлекательности сельскохозяйственных специальностей.

## **1.2. Анализ затрат труда и технических средств применяемых для преддоильной подготовки при различных способах содержания коров**

В настоящее время в России применяется привязная и беспривязная технология содержания коров. При этом во многих исследованиях отмечается, что в большинстве российских хозяйств применяется привязной способ содержания животных [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52]. Тем не менее в последние годы наметилась тенденция по значительному увеличению доли хозяйств с беспривязным содержанием коров. Так, по некоторым оценкам по состоянию на 2018 год доля хозяйств в России с привязным содержанием коров достигала порядка 80 – 85 %. Причем, как правило, в таких хозяйствах использовалось относительно устаревшее оборудование [47, 48, 53]. Однако к 2022 году соотношение хозяйств с привязным и беспривязным содержанием практически выровнялось. Согласно данным ежегодника по племенной работе, в молочном скотоводстве в хозяйствах Российской Федерации доля хозяйств с привязным содержанием в 2021 году снизилась до 53,7%, а по итогам 2022 года составила 50,2% [54, 55].

При привязном содержании коров, их располагают в индивидуальных стойлах, которые расположены в один или несколько рядов. Фиксация животных в таких стойлах позволяет ограничить перемещения животного по коровнику. При этом животные располагаются головой к кормовому проходу, расположенному между рядами. Доеение в этом случае может осуществляться в ведро, в

молокопровод, а также в доильных залах [50, 52].

Беспривязная технология содержания коров подразумевает размещение животных в специальных секциях, которые могут быть оборудованы боксами для отдыха животных или боксами, совмещенными с кормушкой, а также в секциях, где не выделяется отдельных мест для отдыха и кормления [56]. Как правило, при использовании данной технологии содержания коров стадо делят на отдельные группы по 15 – 30 голов с учетом их возраста, молочной продуктивности и количества завершенных лактаций [50]. Доеение в этом случае осуществляют в доильных залах с доильными установками типа «Ёлочка», «Параллель», «Тандем», «Карусель» или при помощи доильных роботов [34, 50, 52].

Обе технологии содержания коров имеют как достоинства, так и недостатки. Так привязное содержание животных позволяет учесть индивидуальные особенности животных, упрощается ветеринарный и зоотехнический контроль. Кроме того, при привязном содержании коров снижается их травматизм, а также исключается угнетение более слабых коров со стороны более сильных. Однако, данная технология содержания животных способствует значительному снижению двигательной деятельности, что может привести к стрессу и снижению молочной продуктивности.

Беспривязное содержание позволяет осуществлять моцион, что снижает риски возникновения ожирения у животных. Однако данная технология содержания животных способствует формированию в группах коров своеобразной иерархии, что затрудняет процесс кормления и может привести к снижению молочной продуктивности.

В настоящее время проведен ряд исследований зависимости молочной продуктивности коров от способа их содержания [45, 46, 49, 51, 52]. Данные исследования имеют несколько противоречивые результаты, однако в целом можно сделать вывод о том, что молочная продуктивность при обоих способах содержания коров сравнима [45, 46, 49, 51, 52].

Тем не менее наиболее значимым преимуществом технологии беспривязного содержания коров по сравнению с привязным содержанием является значительное

снижение затрат труда при обслуживании дойного стада, что является одним из критериев эффективности машинного доения. В таблице 1.1 представлен анализ основных операций, выполняемых при машинном доении коров, с точки зрения затрат труда и возможности их автоматизации. На основании данной таблицы составлена диаграмма, отражающая долю операций, которая может быть выполнена без затрат ручного труда (рисунок 1.1).

Так наибольшее число операций, выполняемых при помощи ручного труда приходится на хозяйства с привязным содержанием, где доение осуществляется в ведро или в молокопровод. Доля операций, выполняемых без затрат ручного труда, в этих случаях составляет всего 8% и 25% соответственно (рисунок 1.1), что практически вдвое меньше при доении в доильных залах при беспривязном содержании, где доля автоматизированных операций достигает 55%.



Рисунок 1.1 – Доля операций, выполняемых в ручную и в автоматическом режиме при различных способах содержания коров.

Таблица 1.1 – Затраты труда при обслуживании дойного стада.

| №<br>п/п | Наименование операции                                      | Привязное содержание коров |                              |                              | Беспривязное содержание коров |                            |
|----------|------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
|          |                                                            | Доение в ведро             | Доение в<br>молокопровод     | Доение в доильном<br>залах   | Доение в доильном<br>зале     | Доение доильным<br>роботом |
| 1        | Отвязывание коров / перегон<br>коров в доильный зал        | —                          | —                            | Вручную или<br>автоматически | Вручную или<br>автоматически  | —                          |
| 2        | Подмыв и<br>массаж вымени                                  | Вручную                    | Вручную                      | Вручную                      | Вручную                       | Автоматически              |
| 3        | Вытирание вымени<br>насухо                                 | Вручную                    | Вручную                      | Вручную                      | Вручную                       | Автоматически              |
| 4        | Сдаивание первых струек<br>молока                          | Вручную                    | Вручную                      | Вручную                      | Вручную                       | Автоматически              |
| 5        | Подключение доильного<br>аппарата                          | Вручную                    | Вручную                      | —                            | —                             | —                          |
| 6        | Надевание доильных<br>стаканов                             | Вручную                    | Вручную                      | Вручную                      | Вручную                       | Автоматически              |
| 7        | Машинное<br>доение                                         | Автоматически              | Автоматически                | Автоматически                | Автоматически                 | Автоматически              |
| 8        | Машинное<br>додаивание                                     | Вручную                    | Вручную или<br>автоматически | Автоматически или<br>вручную | Автоматически или<br>вручную  | Автоматически              |
| 9        | Снятие доильных стаканов с<br>сосков вымени коровы         | Вручную                    | Вручную или<br>автоматически | Автоматически или<br>вручную | Автоматически или<br>вручную  | Автоматически              |
| 10       | Отключение доильного<br>аппарата                           | Вручную                    | Вручную                      | —                            | —                             | —                          |
| 11       | Обработка сосков<br>после доения                           | Вручную                    | Вручную                      | Вручную или<br>автоматически | Вручную или<br>автоматически  | Автоматически              |
| 12       | Перенос<br>доильного аппарата                              | Вручную                    | Вручную                      | —                            | —                             | —                          |
| 13       | Переходы оператора во время<br>доения                      | 0,20 ... 0,35 мин/гол      | 0,20 ... 0,35 мин/гол        | 0,03 ... 0,13 мин/гол        | 0,03 ... 0,13 мин/гол         | —                          |
| 14       | Привязывание коров /<br>перегон коров из доильного<br>зала | —                          | —                            | Вручную или<br>автоматически | Вручную или<br>автоматически  | —                          |

Снижение затрат труда при привязном содержании может быть осуществлено за счёт автоматизации процесса машинного додаивания коров и применения автоматических съёмников доильных стаканов. Операция машинного додаивания может быть реализована двумя способами: 1) пристягивание доильных стаканов; 2) снижение вакуума при уменьшении скорости молокоотдачи.

Пристягивание доильных стаканов позволяет освободить основание соска пережатого сосковой резиной, но тем не менее требует вмешательства оператора машинного доения. При этом снижение вакуума доильной установки может быть реализовано автоматически.



Рисунок 1.2 – Одноразовые и многоразовые салфетки для обработки сосков вымени коров.

Доение коров в доильных залах позволяют значительно снизить затраты труда за счёт отсутствия необходимости подключать, отключать и переносить доильный аппарат. При привязном содержании это позволяет повысить долю операций, выполняемых автоматически до 50%. Также снизить затраты труда при привязном содержании позволяет использование механических групповых привязей. При беспривязном способе содержания дополнительно снизить затраты труда позволяет использование автоматических подгонщиков в доильном зале.

Полностью автоматизировать процесс доения коров и исключить ручной труд позволяют доильные роботы. В этом случае доля операций, выполняемых в

автоматическом режиме достигает 100% (рисунок 1.1). Поэтому использование доильных роботов в настоящее время является одним из приоритетных направлений модернизации молочного животноводства.

Одной из наиболее трудозатратных операций в технологии машинного доения коров является подмыв и массаж вымени [57, 58]. В настоящее время в большинстве хозяйств с доильными залами и в хозяйствах с привязным содержанием коров эта операция выполняется вручную или вручную, но с применением механических средств (таблица 1.1).



Рисунок 1.3 – Стакан для обработки сосков вымени коров пеной.

При привязном содержании коров подготовка вымени к доению, как правило, осуществляется путём подмыва тёплой водой из ведра с последующим вытиранием вымени насухо полотенцем. При вытирании вымени параллельно осуществляется и его массаж. При этом даже сдаивания первых струек молока зачастую не проводится. Кроме того, из одной ёмкости происходит обработка нескольких животных [59]. Это плодотворно сказывается на здоровье животных и качестве получаемого молока.

В доильных залах для обработки вымени используют различные дезинфицирующие средства, применение которых как в рамках преддоильной

подготовки, так и при обработке вымени после доения способствует снижению бактериальной обсеменённости поверхности соска. Это способствует повышению качества, получаемого в процессе машинного доения молока [60]. Для их нанесения используют различные способы, такие как:

- 1) нанесение дезинфицирующего средства при помощи многоразовых салфеток (или полотенец), смоченных в ёмкости, содержащей раствор данного средства (рисунок 1.2);
- 2) нанесение дезинфицирующего средства при помощи одноразовых влажных салфеток (или полотенец) заводского изготовления, пропитанных раствором данного средства (рисунок 1.2);
- 3) нанесение дезинфицирующего средства погружением соска в специальный стакан для обработки вымени, содержащий жидкое или пенообразное дезинфицирующее средство (рисунок 1.3);
- 4) нанесение дезинфицирующего средства специальным распылителем (рисунок 1.4) [61, 62].



1 – распылитель без стакана, 2 – распылитель со стаканом для соска.

Рисунок 1.4 – Устройства для распыления дезинфицирующего средства при обработке сосков вымени коров.

После нанесения дезинфицирующего средства соски вытирают насухо при помощи одноразовых бумажных салфеток или полотенец, которые иногда используются и для сухой очистки сосков вымени. В этом случае массаж вымени

совмещается с вытиранием вымени салфеткой или полотенцем [62].

Использование одноразовых салфеток и распылителей препятствует переносу заболеваний между животными, однако их использование связано с повышенным расходом дезинфицирующих средств, что влечёт за собой дополнительные затраты.

Также некоторые доильные залы оборудуются душевыми разбрызгивателями для воды или разбрызгивателями для дезинфицирующих средств. Такие разбрызгиватели устанавливают и в коровниках с привязным содержанием.



Рисунок 1.5 – Устройство для очистки сосков вымени (скруббер).

Наиболее современным и совершенным видом оборудования доильных залов для проведения преддоильной подготовки вымени коров являются аппараты для очистки сосков - скрубберы (teat scrubber system). Это механические устройства, позволяющие осуществлять очистку сосков вымени от загрязнений вращающимися щётками, на которые подаётся дезинфицирующий раствор [63, 64, 65].

Воздействие щёток на соски оказывает стимулирующее воздействие и способствует возникновению рефлекса молокоотдачи, что, по оценкам некоторых исследований, ведёт к увеличению молочной продуктивности. Кроме того, отмечается повышение качества молока при использовании данных устройств [64].

Скрubberы различных производителей как правило содержат три или четыре роликовые щётки, закреплённые в корпусе устройства (скруббер F71 от компании Puli-sistem содержит три щётки, а скруббер F-488 содержит четыре щётки). Привод

щёток в таких устройствах осуществляется как электродвигателем, расположенным в ручке устройства, так и пневмодвигателем, работающим от вакуумной системы доильной установки. В настоящее время созданы как стационарные, так и мобильные версии скрубберов (рисунок 1.6). Кроме того, возможна их установка как в доильном зале, так и в хозяйствах с привязным содержанием коров [63, 64].

Тем не менее использование данных устройств не исключает использование ручного труда, хотя и значительно его облегчает. В процессе работы с аппаратом для очистки сосков вымени коров его необходимо перемещать от одного соска к другому, а также удерживать рукой в процессе их обработки. Некоторыми производителями заявлено, что время обработки одной коровы подобными устройствами составляет порядка 10 секунд.



Рисунок 1.6 – Стационарный и мобильный скрубберы.

Доильные роботы осуществляют преддоильную подготовку в полностью автоматическом режиме. При этом роботы различных производителей имеют несколько отличные способы подготовки вымени к доению. В настоящее время можно выделить три способа преддоильной подготовки, реализованных в доильных роботах (таблица 1.2):

- 1) очистка и массаж вымени при помощи вращающихся щеток,
- 2) очистка вымени при помощи отдельного моющего стакана,

### 3) очистка и доение универсальным стаканом.

Анализ доильных роботов основных производителей показал, что наиболее распространенными системами очистки сосков вымени являются системы, использующие две роликовые щётки (Lely, Fullwood, ООО "ПРОМТЕХНИКА-ПРИВОЛЖЬЕ") или отдельный стакан для обработки сосков перед доением (DeLaval, SAC, BouMatic).

В стаканах для обработки вымени обычно производится очистка специальными дезинфицирующими растворами или водой, стимуляция соска и сдаивание первых струек молока. Сушка соска в этом случае осуществляется потоком воздуха. При использовании роликовых щёток их вращение обеспечивает не только очистку сосков, но и их сушку.



Рисунок 1.7 – Система очистки сосков вымени коров доильных роботов Lely.

Компания GEA Farm Technologie, придерживаясь концепции In-Liner Everything, в своих доильных роботах использует универсальный доильный стакан, в котором выполняются все подготовительные операции: доение и обработка сосков после доения (таблица 1.2) [66].

Все эти способы имеют как преимущества, так и недостатки. Так при использовании роликовых щёток (рисунок 1.7) или отдельного моечного стакана (рисунок 1.8) обработка сосков осуществляется по отдельности, что увеличивает время обработки. Это может привести к нарушению временных рамок, установленных правилами машинного доения, особенно при ошибках робота в определении координат сосков и позиционировании щёток или стакана. Тем не

менее такой способ исключает контакт дезинфицирующих средств, применяемых при очистке сосков, и молока, полученного при сдаивании первых струек с молоком, получаемым в процессе доения коров. Это способствует повышению качества получаемого молока. Кроме того, использование роликовых щёток оказывает стимулирующее воздействие на соски, как и в случае использования скруббера, что положительно влияет на возникновение рефлекса молокоотдачи.



1 – 3D камера системы машинного зрения, 2 – манипулятор,  
3 – стакан для проведения преддоильной подготовки.

Рисунок 1.8 – Стакан для преддоильной подготовки доильного робота DeLaval VMST™ V300.

Применение универсального доильного стакана, позволяет проводить обработку сосков вымени перед доением практически одновременно. При этом доильный стакан подключается только один раз, в отличие от роботов с отдельным гигиеническим стаканом. Это позволяет сократить время, затрачиваемое на преддоильную подготовку. Однако в данной системе существуют риски попадания дезинфицирующих средств и молока, получаемого при сдаивании первых струек, в молоко при основном доении.

Таблица 1.2 – Системы очистки сосков различных доильных роботов.

| № | Производитель                               | Робот                                              | Тип робота                                                              | Способ очистки сосков                                                                                                                           |
|---|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | GEA Farm Technologie<br>(Германия)          | GEA Farm Mlone                                     | Мультиблочная доильная система<br>(от 1 до 5 бочков)                    | Универсальный стакан.<br>Подготовительные операции, доение и<br>обработка после доения осуществляются в<br>одном стакане (In-Liner Everything). |
|   |                                             | DairyRobot R9500                                   | Одноблочный доильный робот                                              |                                                                                                                                                 |
|   |                                             | GEA DairyProQ                                      | Роботизированная карусель                                               |                                                                                                                                                 |
| 2 | DeLaval<br>(Швеция)                         | DeLaval VMS™ V300                                  | Одноблочный доильный робот                                              | Отдельный стакан для обработки сосков.<br>Очищает по очереди по одному соску.                                                                   |
|   |                                             | DeLaval VMS™ V310                                  | Одноблочный доильный робот                                              |                                                                                                                                                 |
|   |                                             | DeLaval AMR™<br>(Automatic Milking Rotary)         | Роботизированная карусель                                               |                                                                                                                                                 |
| 3 | Lely<br>(Нидерланды)                        | Lely Astronaut A2                                  | Одноблочный доильный робот                                              | Две роликовые щётки.<br>Очищают по очереди по одному соску.                                                                                     |
|   |                                             | Lely Astronaut A3                                  |                                                                         |                                                                                                                                                 |
|   |                                             | Lely Astronaut A4                                  |                                                                         |                                                                                                                                                 |
|   |                                             | Lely Astronaut A5                                  |                                                                         |                                                                                                                                                 |
| 4 | SAC<br>(Дания)                              | RDS Futureline Elite DB                            | Робот с двумя бочками и одним<br>манипулятором                          | Отдельный стакан для обработки сосков.<br>Очищает по очереди по одному соску.                                                                   |
|   |                                             | RDS Futureline Elite SB                            | Одноблочный доильный робот                                              |                                                                                                                                                 |
| 5 | Fullwood<br>(Великобритания)                | Merlin M2                                          | Одноблочный доильный робот                                              | Две роликовые щётки.<br>Очищают по очереди по одному соску.                                                                                     |
| 6 | BouMatic<br>(США)                           | Proflex                                            | Одно или двух-блочный доильный<br>робот с одним манипулятором           | Отдельный стакан для обработки сосков.<br>Очищает по очереди по одному соску.                                                                   |
|   |                                             | MR-S1                                              | Одноблочный доильный робот                                              |                                                                                                                                                 |
|   |                                             | MR-D1                                              | Робот с двумя бочками                                                   |                                                                                                                                                 |
|   |                                             | GEMINI single box                                  | Одноблочный доильный робот                                              |                                                                                                                                                 |
|   |                                             | GEMINI double box                                  | Робот с двумя бочками                                                   |                                                                                                                                                 |
| 7 | ООО "ПРОМТЕХНИКА-<br>ПРИВОЛЖЬЕ"<br>(Россия) | ВОЛШЕБНИК<br>(Установка доильная роботизированная) | Одноблочный доильный робот                                              | Две роликовые щётки.<br>Очищают по очереди по одному соску.                                                                                     |
| 8 | R-SEPT<br>(Россия)                          | AMS                                                | Одноблочный доильный робот<br>(Проект находится в стадии<br>разработки) | Отдельный стакан для обработки сосков.<br>Очищает по очереди по одному соску.                                                                   |
| 9 | Проект Александра Цюка<br>(Россия)          | –                                                  | (Проект находится в стадии<br>разработки)                               | Отдельный стакан для обработки сосков.<br>Очищает по очереди по одному соску.                                                                   |

Кроме того, использование отдельного гигиенического стакана или универсального доильного стакана для обработки сосков вымени перед доением коров не позволяет обработать основание соска. Это место может стать источником загрязнения и развития заболеваний. Также в этом случае фактически не осуществляется массаж вымени, несмотря на требования правил машинного доения. Стимулирующему воздействию подвергаются только соски вымени. Отчасти этих недостатков лишена обработка сосков роликовыми щётками. Их применение позволяет обработать не только весь сосок, но и достаточно большую область у его основания, что тоже оказывает стимулирующее воздействие на вымя.



1 – 3D камера системы машинного зрения, 2 – манипулятор, 3 – стакан для проведения преддоильной подготовки, доения и обработки сосков после доения.

Рисунок 1.9 – Стакан для преддоильной подготовки доильного робота компании GEA Farm Technologie.

Следует отметить, что компании DeLaval и GEA Farm Technologie в настоящее время реализуют проекты роботизированных каруселей DeLaval AMR™ и GEA DairyProQ соответственно. Обработка сосков вымени коров перед доением на доильных установках данного типа так же осуществляется при помощи отдельного гигиенического стакана или универсального доильного стакана, как и в случае отдельных боксовых доильных роботов.

Таблица 1.3 – Сравнительный анализ различных способов преддоильной подготовки.

| № П/П | Способ преддоильной подготовки                                                                                          | Область применения                                           | Преимущества                                                                                                                                                                         | Недостатки                                                                                                                              |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Обработка тёплой водой из ведра с последующим вытиранием и массажем при помощи полотенца                                | Доеение в ведро или в молокопровод                           | Дешевый. Простой. Осуществляется стимуляция (массаж) сосков и вымени.                                                                                                                | Способствует переносу заболеваний между животными. Не исключает использование ручного труда.                                            |
| 2     | Обработка многоразовыми или одноразовыми салфетками, смоченными в ёмкости, содержащей раствор дезинфицирующего средства | Доеение в доильных залах, доеение в ведро или в молокопровод | Простой. Осуществляется стимуляция (массаж) сосков и вымени.                                                                                                                         | Большой расход дезинфицирующих средств. Не исключает использование ручного труда.                                                       |
| 3     | Обработка одноразовыми влажными салфетками (полотенцами), пропитанными дезинфицирующими средствами                      | Доеение в доильных залах                                     | Простой. Препятствует переносу заболеваний между животными. Осуществляется стимуляция (массаж) сосков и вымени.                                                                      | Недешевый. Не исключает использование ручного труда.                                                                                    |
| 4     | Обработка стаканом для нанесения жидких или пенообразных дезинфицирующих средств                                        | Доеение в доильных залах                                     | Простой. Экономичный расход дезинфицирующих средств.                                                                                                                                 | Не исключает использование ручного труда.                                                                                               |
| 5     | Обработка сосков при помощи распылителя для дезинфицирующих средств                                                     | Доеение в доильных залах                                     | Простой. Препятствует переносу заболеваний между животными.                                                                                                                          | Не исключает использование ручного труда. Повышенный расход дезинфицирующих средств.                                                    |
| 6     | Обработка сосков аппаратом для очистки сосков (скруббер)                                                                | Доеение в доильных залах, доеение в ведро или в молокопровод | Менее трудозатратный по сравнению с остальными способами. Интенсивная стимуляция сосков и частичная стимуляция вымени.                                                               | Не исключает использование ручного труда. Обработка сосков проводится по одному.                                                        |
| 7     | Обработка при помощи разбрызгивателя                                                                                    | Доеение в доильных залах, доеение в ведро или в молокопровод | Простой. Препятствует переносу заболеваний между животными. Осуществляется стимуляция (массаж) сосков и вымени.                                                                      | Не исключает использование ручного труда. Повышенный расход средств для обработки вымени.                                               |
| 8     | Автоматическая обработка сосков доильным роботом с использованием отдельного гигиенического стакана                     | Доеение роботом                                              | Не требуются затраты ручного труда. Исключён контакт молока, получаемого в процессе доения с молоком, получаемым при сдаивании первых струек, а также с дезинфицирующими средствами. | Обработка сосков проводится по одному. Не обрабатывается основание соска. Стимулирующее воздействие оказывается только на соски вымени. |

Продолжение таблицы 1.3

|    |                                                                                           |                 |                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                        |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9  | Автоматическая обработка сосков доильным роботом с использованием универсального стакана. | Доеение роботом | Не требуются затраты труда. Обработка сосков происходит практически одновременно. Стаканы подключаются только один раз.                                             | Существует риск контакта молока, получаемого в процессе доения с молоком, получаемым при сдаивании первых струек, а также с дезинфицирующими средствами. Стимулирующее воздействие оказывается только на соски вымени. |
| 10 | Автоматическая обработка сосков доильным роботом с использованием роликовых щёток         | Доеение роботом | Не требуются затраты труда. Исключён контакт молока, получаемого в процессе доения с молоком и дезинфицирующими средствами. Интенсивная стимуляция сосков и вымени. | Обработка сосков проводится по одному.                                                                                                                                                                                 |

Таким образом, в настоящее время существуют различные подходы к организации преддоильной подготовки вымени коров в хозяйствах с различными способами содержания и системами доения, что отражено в таблице 1.3. Все эти способы имеют как положительные, так и отрицательные качества (таблица 1.3). Применение доильных роботов позволяет полностью автоматизировать этот процесс. Поэтому применение роботизированных систем для обслуживания дойного стада и осуществления преддоильной подготовки, в частности, является наиболее перспективным направлением с точки зрения снижения затрат труда при производстве молока. Кроме того, применение роботов позволяет исключить влияние человеческого фактора при подготовки вымени к доению.

### **1.3. Анализ автоматизированных и роботизированных систем для подготовки вымени к доению**

Достижения в области цифровых технологий и электронных компонентов в настоящее время позволяют создавать достаточно сложные технические устройства, сфера применения, которых с каждым годом становится всё обширнее, что способствует переходу к цифровой экономике [16, 67, 68]. В настоящее время инженеры многих стран мира занимаются исследованиями в области разработки и применения робототехнических систем для выполнения различных технологических процессов как в области растениеводства, так и животноводства [68].

В России исследования в области разработки автоматизированных систем для доения коров начались ещё во времена СССР и проводились в Рижском ГСКБ, ПО «Кургансельмаш», институте машиноведения им. А.А. Благоднарова, Всесоюзном научно-исследовательском институте комплексных проблем машиностроения для животноводства и кормопроизводства и др. В настоящее время изучением и разработкой роботизированных систем занимаются учёные Федерального научного агроинженерного центра ВИМ: В.В. Кирсанов, Ю.А. Цой, Л.П. Кормановский, Д.Ю. Павкин, А.С. Дорохов, С.С. Юрочка и др., учёные Белгородского государственного аграрного университета имени В.Я. Горина: В.Ф.

Ужик, А.П. Слободюк, А.Г. Свиридов, Д.Б. Клименко, учёные Российского государственного аграрного университета - МСХА имени К.А. Тимирязева: Ю.Г. Иванов и А.Г. Лапкин. Также исследованиями в данной области занимаются учёные Оренбургского государственного аграрного университета, Ставропольского государственного аграрного университета, Верхневолжского государственного агробиотехнологического университета и др.

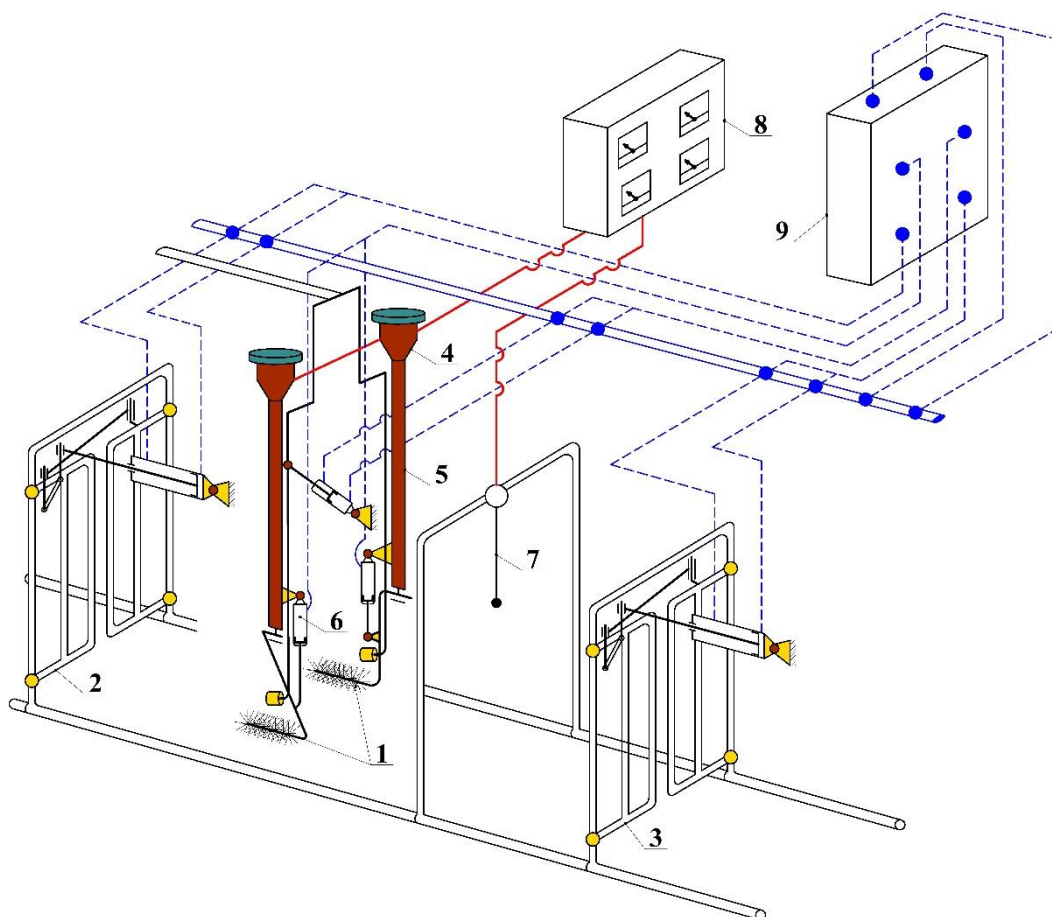
За рубежом разработкой роботизированных систем для доения коров занимаются инженеры компаний GEA Farm Technologie (Германия), DeLaval (Швеция), Lely (Нидерланды), SAC (Дания), Fullwood (Великобритания) BouMatic (США). Так же исследования в данной области проводят Kim W., Lee D. W., Chengjun Wang, Fan 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.

Следует отметить, что в настоящее время в России, помимо научных исследований в области роботизации доения, ведется и практическая работа по созданию систем для автоматического доения коров. Так, 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 и проект доильного робота, которым занимается А.И. Цюк.

Таблица 1.4 – Технические характеристики установки обработки вымени.

| № П/П | Наименование параметра                                      | УОВ-Ф-1                                                        | УОВ-Ф-1-01 | УОВ-Ф-1-02 |
|-------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------|------------|
| 1     | Тип доильной установки                                      | «Ёлочка»                                                       | «Тандем»   | «Карусель» |
| 2     | Назначение                                                  | Автоматизированная очистка вымени                              |            |            |
| 3     | Тип рабочего органа                                         | Две роликовые щётки обрабатывают одновременно все четыре соска |            |            |
| 4     | Управление дверцами и устройством очистки                   | Пневмопривод                                                   |            |            |
| 5     | Продолжительность очистки вымени одной коровы $t_{обр}$ , с | $17 \pm 2$                                                     | $20 \pm 2$ | $15 \pm 2$ |
| 6     | Расход воды на одну корову $V_{моющ.ж}$ , л                 | $3 \pm 1$                                                      | $3 \pm 1$  | $2 \pm 1$  |
| 7     | Производительность                                          | до 100 коров/час                                               |            |            |
| 8     | Температура моющей жидкости                                 | $30...45^{\circ}\text{C}$                                      |            |            |

В период 70 – 80-х годов в Советском Союзе разрабатывалась установка обработки вымени УОВ-Ф-1, а также её модификации УОВ-Ф-1-01 и УОВ-Ф-1-02 (рисунок 1.12) [69, 70, 71]. В таблице 1.4 приведены некоторые технические характеристики данной установки и её модификации, собранные на основе изученных источников, а на рисунке 1.12 приведена её схема [69, 70, 71, 72].



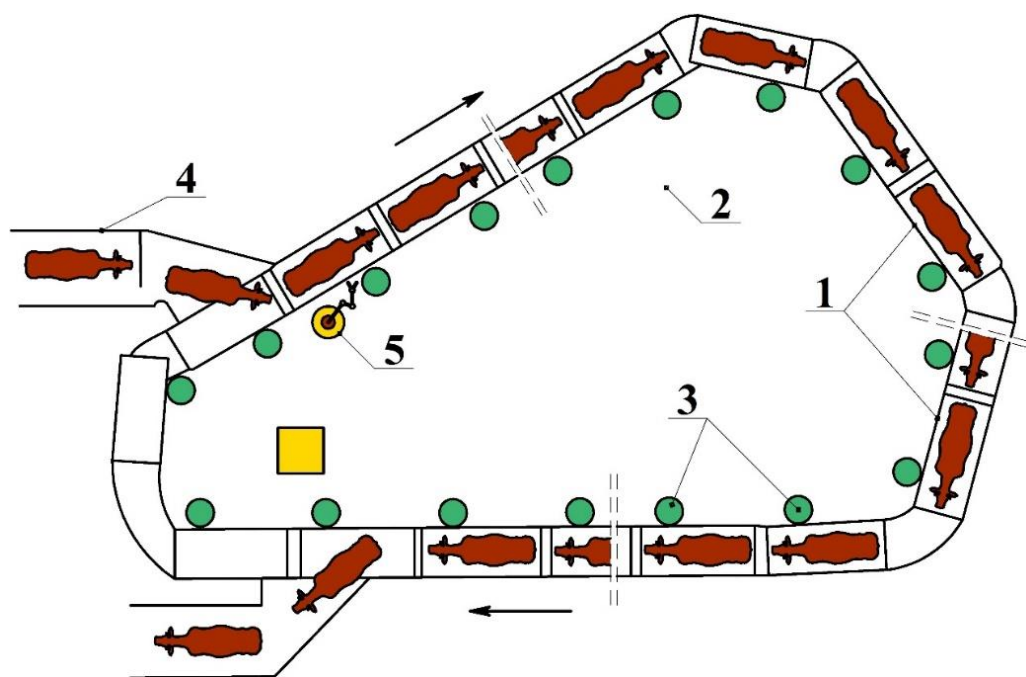
1 – роликовые щетки; 2 – входная дверца; 3 – выходная дверца; 4 – устройство обмыва вымени; 5 – устройство подогрева воды; 6 – пневмоцилиндр; 7 – индикатор наличия коровы в станке; 8 – блок управления; 9 – клапанная коробка.

Рисунок 1.12 – Установка УОВ-Ф-1-01.

Установка обработки вымени предназначалась для автоматизированной очистки вымени коров перед доением на доильных установках типа «Ёлочка», «Тандем» и «Карусель» (таблица 1.4). Основу данной установки составляет проходной станок и устройство обмыва вымени с двумя роликовыми щётками. Привод дверей и устройства обмыва вымени осуществляется при помощи

пневмоцилиндров. Кроме того, данная установка имеет устройство для подогрева воды [71].

При доении коров на конвейерно-кольцевой доильной установке типа «Карусель» с использованием установки обработки вымени задействовались до пяти операторов. Первый оператор контролирует поступление коров на платформу доильной установки и раздает концентрированные корма. Второй оператор контролирует качество обмыва вымени в установке УОВ-Ф-1, а также сдаивает первые струйки молока. Третий оператор вытирает вымя насухо и одевает доильные стаканы. Четвёртый оператор контролирует процесс доения коров, а пятый осуществляет машинное додаивание и выпускает коров [73].



- 1 – доильные станки, 2 – платформа доильной установки,  
3 – манипуляторы с доильными стаканами, 4 – подготовительный бункер,  
5 – механизм перемещения доильных стаканов.

Рисунок 1.13 – Автоматизированная доильная установка конвейерного типа  
(патент № 1777728).

Тем не менее установка обработки вымени не получила широкого распространения [69]. Данная установка не имела системы, обеспечивающей ориентацию рабочего органа (щёток). Щетки перемещались в рабочее положение

при помощи пневмоцилиндров, при этом отсутствовала возможность корректировки их положения с учетом расположения животного в станке или индивидуальных особенностей формы и высоты расположения вымени каждого животного.

В начале 90-х годов в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова проводились исследования в области роботизированных систем для доения. С.В. Колодезевым, И.Ю. Башевым, М.Ю. Слесаревым и А.Б. Сушинским была предложена автоматизированная доильная установка конвейерного типа (рисунок 1.13) [74]. Основу этой установки составляют доильные станки, расположенные на подвижной платформе. Каждый доильный станок такой установки оснащается манипуляторами, содержащими держатели доильных стаканов. После осуществления обработки вымени в специальном подготовительном бункере животное попадет в первую ячейку, где при помощи механизма перемещения к соскам вымени коровы прикрепляются доильные стаканы [74]. Однако в описании к данной доильной установке не указан способ осуществления подмыва и массажа вымени, а также способ определения координат сосков вымени для подключения доильных стаканов. Тем не менее следует отметить, что в данной установке выполнение подготовительных операций вынесено за пределы платформы доильной установки.

В период конца 80-х и начала 90-х годов учёные Всесоюзного научно-исследовательского института комплексных проблем машиностроения для животноводства и кормопроизводства и Чувашского сельскохозяйственного института (В.К. Алексеев, М.М. Шугуров, Ю.А. Александров, В.Н. Кантеев и др.) занимались разработкой манипулятора для преддоильной санитарной обработки вымени коров [75]. Также данным коллективом был рассмотрен вопрос совершенствования его конструкции [76, 77]. Целью данного изобретения являлось повышение качества обработки вымени перед доением и сокращение времени на выполнение данной операции. Согласно патентным документам, при использовании данного манипулятора обработка вымени осуществлялась упругим моющим элементом, но подробно его конструкция не раскрывается. Тем не менее

данное устройство характеризовалось как достаточно сложное в изготовлении и недостаточно надежное [78].

Учёные из Белгородской ГСХА (В.Ф. Ужик, А.П. Слободюк, А.Г. Свиридов, Д.Б. Клименко) занимались разработкой автоматизированной доильной установки, которая помимо доения также выполняет подготовительные операции [78]. Очистку сосков вымени здесь предполагается производить при помощи специального устройства для санитарной обработки вымени, состоящее из двух роликовых щеток, расположенных горизонтально (рисунок 1.14).

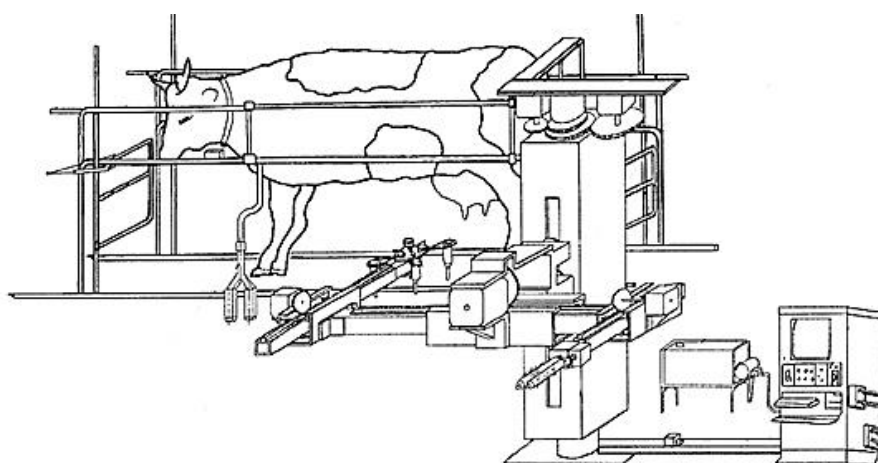


Рисунок 1.14 – Автоматизированная доильная установка (патент № 2244417).

В РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева учеными Ю.Г. Ивановым и А.Г. Лапкиным так же вели исследования в области автоматизированной преддоильной подготовки вымени. Ими разработана установка для автоматической преддоильной обработки сосков вымени коров. Очистка вымени в этом устройстве осуществляется при помощи двух вращающихся роликовых щеток, при этом каждый сосок вымени обрабатывается индивидуально. Подведение устройства в рабочую область осуществляется манипулятором, причем его устройство и принцип наведения не уточняются [79].

На рубеже 80 – 90-х годов с целью снижения затрат труда при доении коров был разработан манипулятор для доения МД-Ф-1, которым оснащались автоматизированные доильные установки УДА-8А «Тандем» и УДА-16А «Елочка» [80, 81, 82]. Учёными Оренбургского ГАУ, Белгородского ГАУ и Новосибирского

ГАУ предложены аналоги данного манипулятора, в том числе и переносная версия [83, 84, 85]. Тем не менее данные устройства используются для поддержки доильных стаканов, а также для снятия их с сосков вымени коров по окончании процесса доения. Поэтому манипуляторы для доения не обеспечивают автоматического выполнения преддоильной подготовки вымени, а лишь снижают затраты труда при доении коров, не исключая его полностью.

Исследованиями в области роботизации машинного доения занимаются ученые Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства: В.В. Кирсанов, Ю.А. Цой, Л.П. Кормановский, Д.Ю. Павкин, И.М. Довлатов, С.С. Юрочка и др. Учёные института предложили стратегию поэтапного создания роботизированных систем на основе антропоморфного манипулятора, управляемого системой машинного зрения на основе 3D камер. Также ведется разработка доильного аппарата с почетвертным управлением процесса доения для роботизированных систем. Кроме того, ученые изучают возможность интеграции роботизированных систем с традиционными доильными установками [18, 80, 81, 82, 86].

В настоящее время В.В. Кирсанов, Д.Ю. Павкин, И.М. Довлатов так же проводят исследования в области разработки санитарного модуля для обработки сосков вымени коров. Учёными предложена конструкция стакана для обмыва и дезинфекции сосков и определен оптимальный состав и температура дезинфицирующей жидкости [65].

За рубежом разработка автоматизированных систем для доения коров началась в 50-е годы прошлого века, а в 1992 году началось промышленное применение первых доильных роботов от компании Lely [87, 88]. В настоящее время различными производителями выпускается достаточно широкая модельная линейка доильных роботов (таблица 1.2), а также продолжают работы по их совершенствованию. Анализу работы систем данных роботов, экономических показателей и степени их влияния на животных и качество молока посвящены исследования многих учёных как в России, так и за рубежом: В.П. Мещеряков, Н.М. Морозов, В.В. Кирсанов, Ю.А. Цой, Л.Р. Загидуллин, Р.Р. Хисамов, Р.Р.

Каюмов, Д.Р. Шарипов, И.А. Ходырева, А. С. Курак, Wacław Romaniuk, Paulina Mielcarek-Bocheńska, Juris Priekulis, Laura Solano и др.

Таким образом, созданные доильные робототехнические системы фактически решают вопрос автоматизированного выполнения преддоильной подготовки вымени животных (таблица 1.1). В исследовании [87] приводится анализ существующих доильных роботов и представлена их классификация. В целом доильные роботы имеют боксовую структуру и направлены на персональное обслуживание одного животного (Lely Astronaut A5, Merlin M2, DeLaval VMS™ V310, DairyRobot R9500, ВОЛШЕБНИК). Также существуют доильные роботы, имеющие два доильных бокса с одним общим манипулятором (RDS Futureline Elite DB) и мультибоксовые системы (GEA Farm Mlone). Однако использование данных роботов подразумевает обслуживание коров по отдельности.



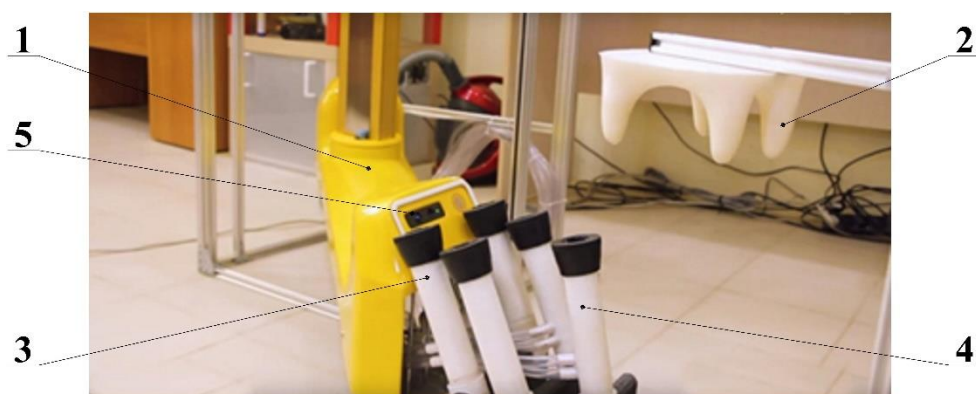
Рисунок 1.15 – Доильный робот компании R-SEPT.

Российские проекты доильных роботов А.В. Хахунова (компания R-SEPT, рисунок 1.15) и А.И. Цюка также нацелены на создание боксовых роботизированных систем [89, 90]. Компанией R-SEPT прорабатывается вопрос создания манипуляторов для конвейерно-кольцевых доильных установок типа «Карусель», которые позволят выполнить все технологические операции в автоматическом режиме [89].

Боксовые доильные роботы являются частью технологии добровольного

доения, и их применение оправдано для хозяйств со сравнительно небольшим поголовьем, где задачу обслуживания животных решит один или несколько доильных боксов.

Использование таких систем в крупных хозяйствах с большим поголовьем животных связано с рядом сложностей. В первую очередь это необходимость установки большого количества доильных роботизированных боксов. Как следствие возникнет проблема с их размещением на территории коровника, поскольку для этого потребуются большие площади. Это также осложнит организацию движения коров в коровнике. Кроме того, установка большого количества доильных роботов повлечёт за собой большие затраты на их приобретение.



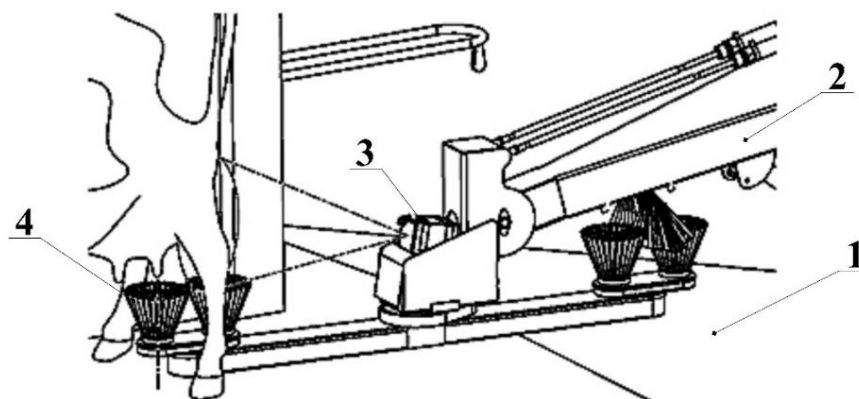
1 – манипулятор, 2 – макет вымени, 3 – доильные стаканы, 4 – стакан для обработки сосков перед доением, 5 – 3D камера системы машинного зрения.

Рисунок 1.16 – Манипулятор доильного робота по проекту А.И. Цюка.

Эту проблему решает сочетание достижений в области роботизированного доения с традиционными доильными системами. В настоящее время проводятся исследования, направленные на создание манипуляторов и роботизированных модулей, которые можно интегрировать в существующие доильные залы с доильными установками «Карусель», «Ёлочка» и т.д. [18, 80, 81, 83, 91, 92, 93].

В 2015 году опубликован патент, описывающий устройство для очистки сосков вымени коров, которое предполагается использовать в сочетании с конвейерно-кольцевой доильной установкой. При этом доение данная система не

осуществляет [91]. Очистка вымени в данном устройстве осуществляется при помощи рабочего органа, основной частью которого являются вертикальные конические щётки, щетина которых образует усечённый конус, расширяющийся снизу-вверх (рисунок 1.17). Управление манипулятором с рабочим органом осуществляется посредством 3D камеры, а сама операция очистки сосков выполняется непосредственно на платформе доильной установки.



1 – Платформа доильной установки; 2 – манипулятор; 3 – камера системы машинного зрения; 4 – вертикальные конические щётки.

Рисунок 1.17 – Установка для очистки вымени перед доением  
(Патент WO/2015/009158).

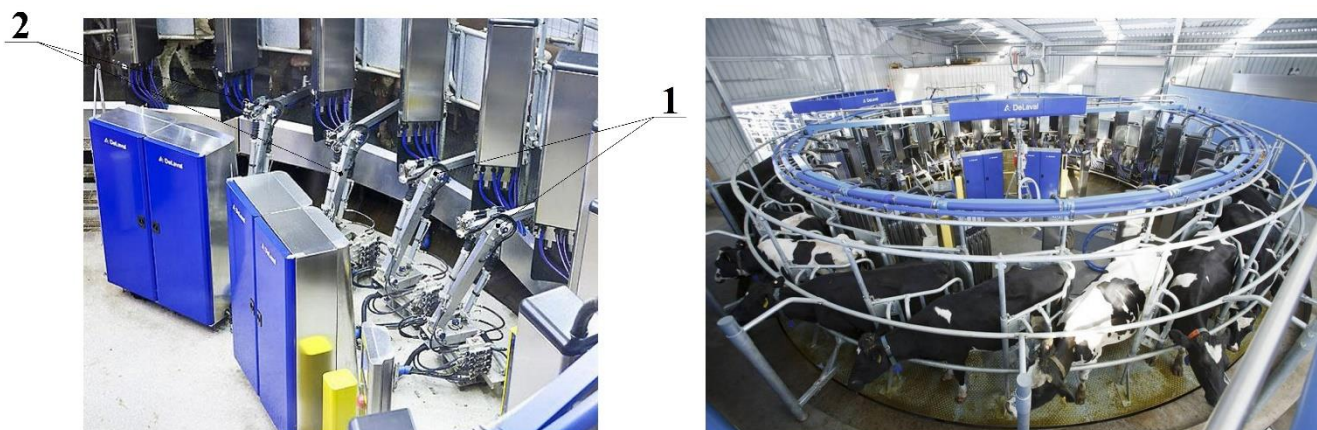
В настоящее время в России и за рубежом проводятся испытания полностью роботизированных каруселей, которые производят компании De Laval и GEA Farm Technologies [94]. Концепция этих систем несколько различна.

В роботизированной карусели DeLaval AMR™ все операции, предписанные правилами машинного доения, выполняются при помощи пяти манипуляторов, расположенных в доильном зале (рисунок 1.18). Первые и второй манипуляторы выполняют подготовку вымени к доению, третий и четвёртый подключают доильные стаканы. При помощи пятого манипулятора производится обработка вымени после доения.

Таким образом, в роботизированной карусели DeLaval все операции, в том числе и преддоильная подготовка, выполняются непосредственно на платформе доильной установки. Поэтому время, затрачиваемое на выполнение

подготовительных операций, входит во время, затрачиваемое на оборот платформы доильной установки. При этом сбои в работе манипулятора приведут к увеличению времени оборота платформы и снижению её пропускной способности. В результате этого снизится и производительность доильной установки.

Кроме того, в роботизированной карусели DeLaval AMR™ манипуляторы взаимозаменяемы и при выходе из строя одного из манипуляторов его функции может выполнить следующий манипулятор. Однако в этом случае также увеличивается время работ на платформе доильной установки, а также нагрузка на оставшиеся исправными манипуляторы.



1 – манипуляторы, осуществляющие обработку передних и задних сосков,

2 – манипуляторы, осуществляющие подключение доильных стаканов.

Рисунок 1.18 – Роботизированная карусель DeLaval AMR™.

В роботизированной карусели GEA DairyProQ каждый станок является отдельным доильным роботом за счёт использования разработанного компанией GEA Farm Technologie доильного модуля (рисунок 1.19) [92, 93, 95]. Этот модуль позволяет роботизировать не только доильные установки типа «Карусель», но и другие доильные установки [92]. Такой подход в роботизации более гибкий в отличие от концепции DeLaval. В случае поломки роботизированного модуля одного из станков, доступ к нему для животных может быть заблокирован до устранения неисправности, в то время как остальные модули могут осуществлять доение животных [95].

Тем не менее все операции при доении в роботизированной карусели GEA DairyProQ также выполняются на платформе доильной установки, а, значит, время, затрачиваемое на подготовительные операции, также входит во время оборота платформы доильной установки. Таким образом, сбои в работе роботов приведут к снижению производительности доильной установки. Кроме того, выход из строя отдельных роботизированных станков и их блокировка для животных тоже способствует снижению производительности всей доильной установки.



1 – универсальный доильный роботизированный модуль.

Рисунок 1.19 – Роботизированная карусель GEA DairyProQ.

Так же следует отметить, что установка роботизированного модуля в каждый станок доильной установки значительно увеличивает её стоимость. В этом смысле концепция установки нескольких роботов, последовательно выполняющих отдельные операции, экономически более оправдана.

Проведенный обзор литературы и патентных документов показал наличие достаточно большого количества разработок в области автоматизированных и роботизированных систем для обработки вымени. Очевидно, что в России (времена СССР и современная Россия) уровень теоретических исследований в этой области, а также концептуальных решений практически не отстает от зарубежных исследователей. Однако уровень практической реализации невысок.

Рассмотренные выше способы и различные системы для подготовки вымени к доению в целом можно классифицировать по различным признакам (рисунок

1.20). В первую очередь это разделение по способу работы: ручные (салфетки, стакан для обработки пеной и т.д.), механизированные (скрубберы), автоматизированные (УОВ-Ф-1) и роботизированные (Lely Astronaut A5, Merlin M2, DeLaval VMS™ V310 и др.).

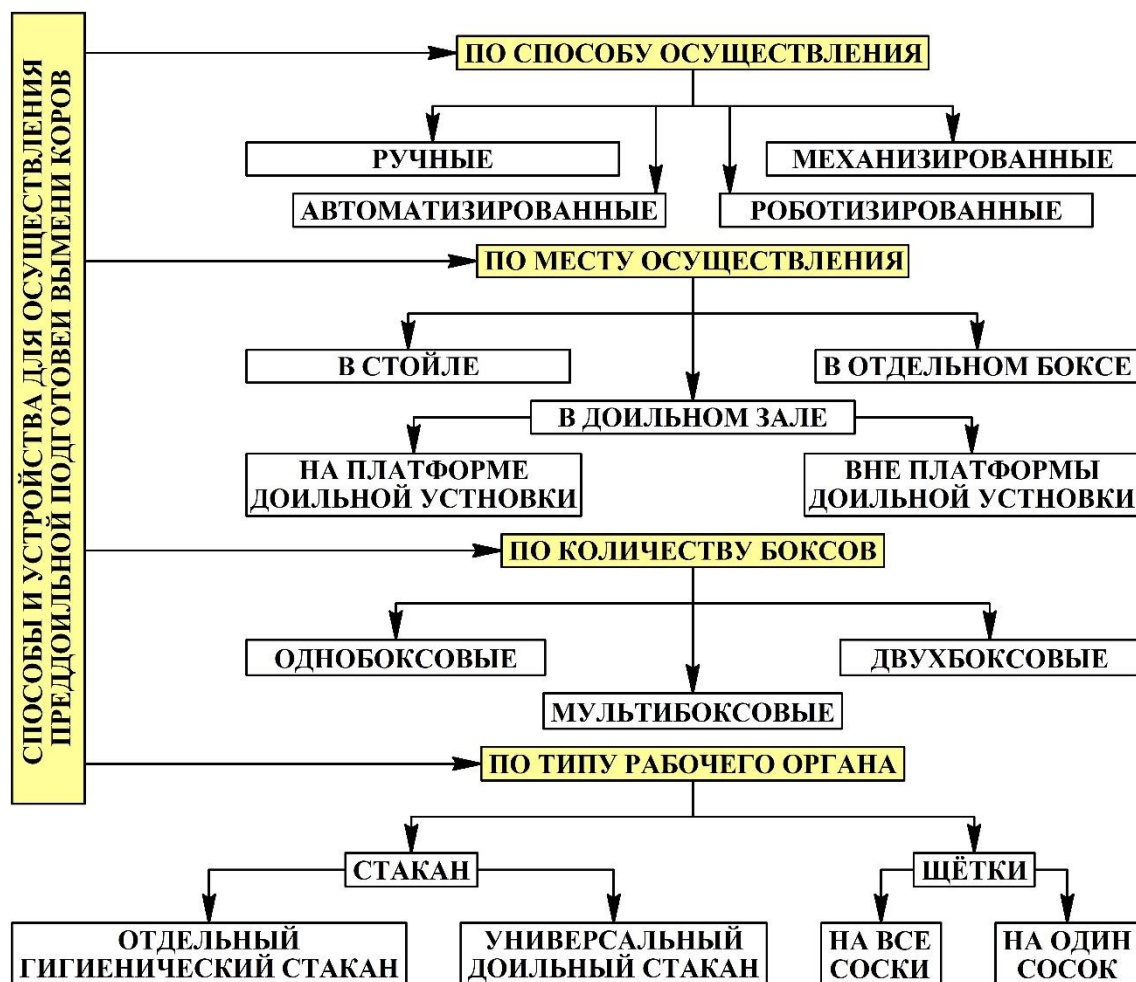


Рисунок 1.20 – Классификация способов и устройств для осуществления преддоильной подготовки вымени.

Во-вторых, способы и устройства для преддоильной подготовки можно разделить по месту осуществления данной операции. В этом случае можно выделить системы, устанавливаемые в доильном зале (УОВ-Ф-1, роботизированные карусели и т.д.), в отдельном боксе (доильные роботы) и в стойле при ручной обработке вымени.

Некоторые производители доильных роботизированных систем придерживаются мультибоксовой концепции, поэтому устройства для

преддоильной подготовки вымени можно разделить на однобоксовые, двухбоксовые и мультибоксовые. Особое значение имеет классификация по типу исполнения рабочего органа, непосредственно осуществляющего обработку сосков вымени. Здесь в целом можно обозначить два направления. Это использование щёток или специального стакана.

Анализ литературы и патентных документов позволяет сделать вывод о том, что с точки зрения роботизации процесса преддоильной подготовки вымени коров в целом можно выделить три направления.

- 1) Первое направление подразумевает использование боксовых доильных роботов, где обработка вымени осуществляется в рамках машинного доения и является одной из операций, выполняемой роботом в автоматическом режиме.
- 2) Второе направление заключается в роботизации доильных залов, в том числе с конвейерно-кольцевыми доильными установками типа «Карусель». Обработка вымени в этом случае осуществляется в рамках машинного доения и является одной из операций, выполняемой роботом в автоматическом режиме непосредственно на платформе доильной установки. Данное направление подразумевает полный отказ от операторов доильного зала.
- 3) Третье направление – это также роботизация доильных залов, в том числе с конвейерно-кольцевыми доильными установками типа «Карусель», но с обработкой вымени за пределами доильной установки. При этом данное направление подразумевает сохранение операторов доильного зала.

Первые два направления в настоящее время реализованы на практике производителями роботизированного оборудования. При этом с точки зрения роботизации преддоильной подготовки достаточно перспективно третье направление, которое частично реализовано при создании установки УОВ-Ф-1 и разработке концепции автоматизированных доильных установок [74, 96]. Особенно третье направление актуально для конвейерно-кольцевых доильных установок типа «Карусель» [18].

Установки данного типа в целом считаются наиболее эффективными доильными установками с высокой производительностью труда. Доение коров

здесь приближено к поточной линии промышленного предприятия за счёт того, что животные заходят в станки установки по одному, что очень удобно для их обслуживания [97, 98, 99, 100]. Благодаря этому данные установки имеют значительные резервы для сокращения затрат труда при производстве молока.

Выполнение роботом преддоильной подготовки перед выходом на платформу доильной установки позволит освободить оператора доильного зала от выполнения данной операции, которая является наиболее трудозатратной. В этом случае животное попадет на платформу практически готовое к надеванию доильных стаканов. Это позволит снизить затраты труда операторов доильного зала при доении коров или оптимизировать их количество. Кроме того, организованная таким образом подготовка вымени коров к доению сократит время выполняемых операторами доильного зала работ, что позволит увеличить её пропускную способность.

Следует также отметить, что сохранение операторов в доильном зале позволяет в случае выхода из строя робота, осуществляющего преддоильную подготовку вымени, не останавливать работу доильной установки. Во время устранения неисправности преддоильную подготовку можно будет осуществлять вручную. Кроме того, оператор доильного зала сможет проконтролировать выполнение подготовительных операций роботом, что повысит качество преддоильной подготовки вымени коров. Это, в свою очередь позитивно скажется на качестве получаемого молока.

Проведенный литературный обзор также показал, что практически все существующие системы преддоильной подготовки вымени доильных роботов осуществляют обработку сосков по одному. Поэтому использование таких систем затрудняет организацию поточного обслуживания коров при использовании робота, расположенного перед входом на платформу доильной установки, так как в этом случае существенно увеличиваются затраты времени на подготовительные операции.

Решить эту проблему позволяет рабочий орган с двумя роликовыми щётками большого радиуса, который обрабатывает все соски вымени одновременно, как это

было реализовано в установках типа УОВ-Ф-1. Использование рабочего органа со щётками большого радиуса имеет ряд преимуществ:

- 1) сокращается время подготовительных операций, что способствует поточному обслуживанию животных;
- 2) моются и массируются не только соски, но и вся нижняя часть вымени, что способствует исключению возможности попадания загрязнений в молоко и гарантированному возникновению рефлекса молокоотдачи;
- 3) обеспечивается качественная мойка и массаж вне зависимости от индивидуальных особенностей конфигурации вымени – сокращается выбраковка коров;
- 4) требуется меньшая точность в определении координат и позиционировании рабочего органа в пространстве, а значит можно для этих целей использовать более простые и как следствие дешёвые технические решения.

Активное воздействие ворса щёточных устройств для очистки сосков вымени позволяет производить очистку сильно загрязнённых сосков и удалять частицы засохшей грязи. Поэтому данный способ очистки сосков вымени коров имеет большую эффективность в сравнении с гигиеническими стаканами. Кроме того, в этом случае можно отказаться от использования пенообразующих и дезинфицирующих средств [69, 101, 102, 103].

Упрощение систем и конструкции роботизированных систем особенно важно с экономической точки зрения. Существующие на сегодняшний день доильные роботизированные системы имеют достаточно высокую стоимость, что существенно сдерживает их массовое внедрение в хозяйствах. Так в исследовании [104] был проведен технико-экономический анализ двух систем доения, построенных на базе четырёх доильных роботов от компании Lely и доильного зала с доильной установкой УДА-16А. Данный анализ показал, что доильные роботы за свой срок эксплуатации не окупают затрат на их приобретение в отличие от доильного зала.

Таким образом, роботизированная установка, выполняющая преддоильную подготовку вымени коров и расположенная перед входом на платформу

конвейерно-кольцевой доильной установки типа «Карусель», позволит снизить затраты труда при доении коров и повысить пропускную способность доильной установки, что в целом увеличит эффективность доения на установке данного типа.

Применение такого робота, в сочетании с автоматическими съёмниками приблизит доильные залы с конвейерно-кольцевыми доильными установками типа «Карусель» по уровню трудозатрат к полностью роботизированным доильным залам, но при этом будут значительно снижены риски с точки зрения выхода из строя роботизированного оборудования.

#### **1.4. Анализ систем позиционирования автоматизированных систем для доения коров**

Наиболее сложной и ответственной частью любой роботизированной системы, применяемой для доения коров, является система, обеспечивающая перемещение доильного стакана или устройства для очистки сосков в рабочую область. Это обусловлено тем, что роботы данного типа взаимодействуют с животным, действия которого порой непредсказуемо.

Поэтому создание роботизированной установки для осуществления преддоильной подготовки вымени требует решения важной задачи, а именно разработки системы позиционирования.

Под системой позиционирования будем подразумевать совокупность оптико-электронных компонентов для определения координат рабочей области и механических элементов, образующих манипулятор для перемещения рабочего органа в пространстве (рисунок 1.21). Таким образом, данная система обеспечивает:

- 1) определение координат сосков вымени коровы, т.е. границ рабочей области;
- 2) перемещение рабочего органа в рабочую область согласно определенным координатам.

В настоящее время существует множество способов и технических средств для определения координат рабочей области. Все они в основе своей работы используют различные физические принципы и функционируют с различной

степенью эффективности. Кроме того, схема построения манипулятора, а именно привод его механических частей также может быть реализован различными способами (рисунок 1.22).

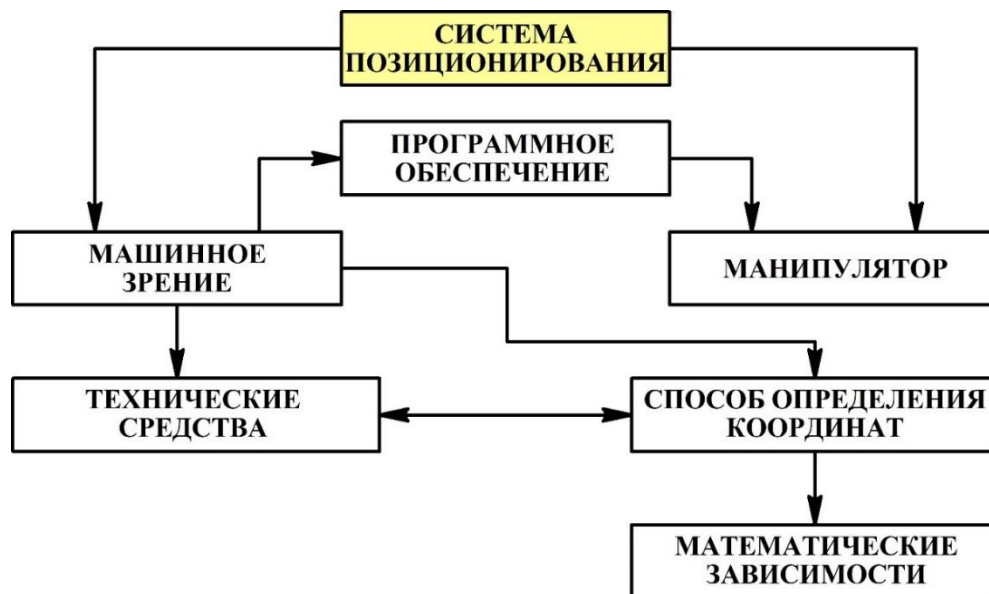


Рисунок 1.21 – Система позиционирования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени.

Анализ литературы и патентных документов показал, что в автоматизированных и роботизированных системах, разрабатываемых в разные годы и созданных в настоящее время в качестве привода манипулятора применяется:

- 1) пневмопривод;
- 2) гидропривод;
- 3) электропривод.

В Советских разработках и Российских разработках 90-х годов большой упор делался на применение систем с пневмоприводом. Так, управление щётками в установках типа УОВ-Ф-1 осуществлялось посредством пневмоцилиндров [69, 70, 71, 72, 73, 74]. Также данный тип привода описан в изобретении В.К. Алексеева, М.М. Шугурова, Ю.А. Александрова, В.Н. Кантеева и др. – Автоматический манипулятор для преддоильной санитарной обработки вымени коров [75]. Применяется данный тип привода и в манипуляторах для доения [83, 84, 85]. Д.Ю.

Павкин, В.В. Кирсанов, А.С. Дорохов, Я.П. Лобачевский предложили конструкцию манипулятора доильной установки с управляемым режимом доения по четвертям вымени коровы, в котором перемещение держателя доильных стаканов в пространстве обеспечивает манипулятор с пневмоцилиндрами [105].

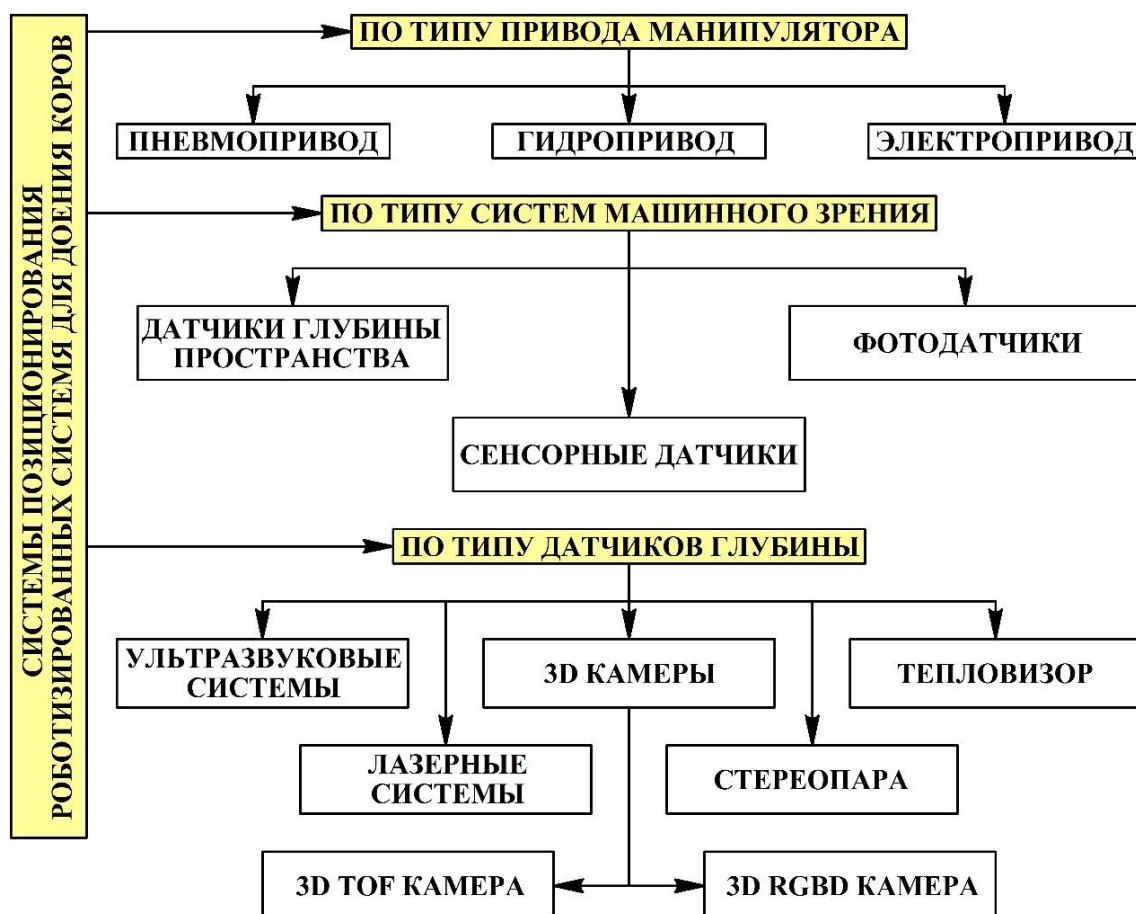


Рисунок 1.22 - Классификация систем позиционирования роботизированных систем для доения коров.

Использование пневмопривода сопряжено с рядом сложностей. В частности, в исследовании [15] отмечается, что достаточно сложно организовать эффективный закон управления данными системами в силу сжимаемости воздуха. Это приводит к нелинейности величин, определяющих работу пневмосистемы. Также для корректной работы пневмопривода необходимо поддержание герметичности системы и необходимого давления в ней.

Тем не менее пневмопривод используют и в современных роботизированных доильных системах. Однако в этом случае он применяется как часть гибридной

системы управления в сочетании с электроприводом. Такая схема управления манипулятором реализована в доильных роботах компании Lely и доильном роботе Mlone компании GEA Farm Technologie (таблица 1.5) [106, 107, 108, 109]. Подобная схема управления манипулятором реализуется и в доильном роботе, разрабатываемом компанией R-SEPT.

Таблица 1.5 – Тип привода манипуляторов, используемых в доильных роботах.

| № | Производитель                           | Робот                           | Тип привода манипулятора |
|---|-----------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1 | GEA Farm Technologie                    | GEA Farm Mlone                  | Пневмопривод             |
|   |                                         | DairyRobot R9500                | Электропривод            |
| 2 | DeLaval                                 | DeLaval VMST <sup>TM</sup> V300 | Гидропривод              |
|   |                                         | DeLaval VMST <sup>TM</sup> V310 |                          |
|   |                                         | DeLaval AMR <sup>TM</sup>       |                          |
| 3 | Lely                                    | Lely Astronaut A4               | Пневмопривод             |
|   |                                         | Lely Astronaut A5               |                          |
| 4 | SAC                                     | RDS Futureline Elite DB         | Электропривод            |
|   |                                         | RDS Futureline Elite SB         |                          |
| 5 | Fullwood                                | Merlin M2                       | Электропривод            |
| 6 | BouMatic                                | ProFlex                         | Электропривод            |
|   |                                         | MR-S1                           | Гидропривод              |
|   |                                         | MR-D1                           |                          |
|   |                                         | GEMINI single box               |                          |
|   |                                         | GEMINI double box               |                          |
| 7 | ООО "ПРОМТЕХНИКА-ПРИВОЛЖЬЕ"             | ВОЛШЕБНИК                       | Электропривод            |
| 8 | Проект доильного робота компании R-SEPT | –                               | Пневмопривод             |
| 9 | Проект доильного робота А.И Цюка        | –                               | Электропривод            |

Компания DeLaval в своих доильных роботах для управления манипулятором применяет гидравлическую систему. Гидравлические манипуляторы данная компания использует и в роботизированной карусели DeLaval AMR<sup>TM</sup> [106, 107, 108, 109, 110, 111]. Такую же схему привода манипулятора использует в своих роботах MR-S1, MR-D1 компания BouMatic [106, 107, 112, 113].

Достаточно широкое распространение в системах привода манипулятора доильных роботов получил электропривод, применение которого имеет ряд преимуществ. В частности, использование электропривода в узлах манипулятора упрощает его управление и программирование. Кроме того, в этом случае не требуется насосного оборудования для подачи гидравлической жидкости или воздуха в системы манипулятора.

Данный тип привода был использован при создании манипулятора в проекте доильного робота А.И. Цюка (рисунок 1.16) [90]. Также возможность применения многозвенного манипулятора с электроприводом и несколькими степенями свободы для роботизированных систем изучалась Kim W. и Lee D. W. Испытания данного манипулятора позволили определить погрешность его позиционирования, среднее значение которой в абсолютном выражении оказалось равным 2,5 мм [114], на основании чего был сделан вывод о применимости манипуляторов данного типа в доильных роботах.

Chengjun Wang, Fan Ding, Liuyi Ling и Shaoqiang Li был предложен шести-осевой манипулятор с электроприводом, который позволил повысить эффективность прикрепления доильных стаканов, а также сократить время их прикрепления. В лабораторных исследованиях успешность прикрепления доильных стаканов данным манипулятором составила 98% [115].

Следует отметить, что манипуляторы с электроприводом обладают более низким уровнем шума, поэтому их применение в роботизированных доильных системах способствует снижению стресса у коров [116, 117]. Так, в исследовании Куоо Jae Shin приведена схема манипулятора с упрощенной конструкцией. Данный манипулятор имеет 3 степени свободы и полностью электрический привод. По оценкам ученого, данная схема позволяет на 40% сократить время приучения коров к подобным роботизированным системам [116].

В настоящее время управление манипулятором при помощи электропривода реализовано в доильных роботах: DairyRobot R9500 компании «GEA Farm Technologie», Merlin M2 компании «Fullwood», RDS Futureline Elite DB компании «SAC», ВОЛШЕБНИК компании «ПРОМТЕХНИКА-ПРИВОЛЖЬЕ» и др.

(таблица 1.5) [106, 107, 108, 109, 110].

Для реализации систем машинного зрения в роботизированных и автоматизированных системах для доения коров учёными и инженерами также были предложены различные способы.

В автоматизированной доильной установке [74] С.В. Колодезевым, И.Ю. Башевым, М.Ю. Слесарев и др. для определения положения сосков вымени предлагалось использовать датчик положения вымени, состоящий из нескольких сенсорных ячеек, имеющих определенные координаты. Обнаружение сосков в этом случае предполагалось осуществлять по касанию сосков данных ячеек при перемещении всего датчика под вымя коровы и его вертикального поднятия до касания сосков. Данный способ позволяет достаточно точно определить координаты сосков в силу их прямого контакта с датчиком, однако не позволяет учесть перемещения коровы после отведения его из рабочей области.

Л.П. Карташовым и В.Б. Шлейниковым предложено устройство для ориентации доильных стаканов. Принцип действия этого устройства основан на отражении от сосков вымени света, который излучает источник, расположенный на дне доильного стакана. Отраженный свет падает на фотоэлементы приёмника излучения, установленные на схвате доильного стакана. Равномерное освещение датчиков приёмника соответствует точному наведению стакана под сосок [118]. В целом данное устройство позволяет достаточно точно позиционировать доильный стакан относительно сосков вымени, однако реализовать данный принцип для наведения рабочего органа со щётками достаточно сложно.

Для определения пространственного положения сосков были предприняты попытки использовать и ультразвуковые датчики. Domenico Giorgio Sorrenti, Marco Cattaneo и Vincenzo Villa занимались изучением системы машинного зрения, построенной на базе данных датчиков. В своём исследовании учёные отмечают, что ультразвуковые датчики достаточно дешёвые и позволяют получать полярную карту расстояний [119]. Однако использование данных датчиков сопряжено с возникновением шумов на их входе, что требует разработки алгоритмов обработки данных, позволяющих устранить эти шумы. Кроме того, успешность применения

такой системы сильно зависит от использования датчиков, фиксирующих перемещение животного. Такое сочетание позволяет увеличить успешность прикрепления доильных стаканов до 94% [120].

Ультразвуковые системы были использованы для позиционирования манипулятора в доильных роботах AMSLiberty и Leonardo [109]. Однако в более современных моделях доильных роботов все более широкое применение находят лазерные системы и 3D камеры (таблица 1.6) [106, 107, 109, 121].

Каждый кадр 3D камеры содержит массив данных с информацией о глубине пространства (карта глубины). При этом подходы к получению информации о глубине пространства могут быть различными. Наибольшее распространение в доильных роботах получили 3D TOF камеры (Time of Flight, времяпролетные камеры) (рисунок 1.23) [122]. В этой камере реализован принцип измерения глубины пространства по времени, которое затрачивает луч света на движение от источника до препятствия и обратно после отражения [123].

Таблица 1.6 – Системы технического зрения некоторых доильных роботов.

| № | Производитель        | Робот                   | Определения положения сосков                 |
|---|----------------------|-------------------------|----------------------------------------------|
| 1 | GEA Farm Technologie | DairyRobot R9500        | 3D камера                                    |
| 2 | DeLaval              | VMST <sup>TM</sup> V300 | 3D камера в сочетании с лазерным дальномером |
| 3 | Lely                 | Astronaut A4            | 3D камера в сочетании с лазерным дальномером |
| 4 | Fullwood             | Merlin M2               | Лазерный дальномер                           |
| 5 | BouMatic             | MR-S1                   | 3D камера в сочетании с 2D видеокамерой      |

Тем не менее данный тип камер, не передает данные о цвете объекта. Эта информация может стать дополнительным критерием при построении трёхмерной модели пространства. Эту проблема решена в 3D RGB-D камерах. В каждом кадре такой камеры объединена информация о цвете (RGB) и глубине пространства. Реализуется это за счёт совмещения 2D RGB камеры и датчика глубины, в качестве которого может быть использовано устройство с технологией TOF или стереозрения [124]. В исследовании [125] отмечается, что 3D RGB-D показывают

лучшие результаты при обнаружении сосков в сравнении с 3D TOF камерами.

Лазерные системы позволяют производить измерение расстояний, а также строить трёхмерные модели окружающего пространства при помощи лазерного сканирования. В доильных роботах данные системы используются в качестве дальномера и являются дополнением к 3D камерам (таблица 1.6) [106, 107, 109, 121]. Для измерения расстояния в лазерных системах используются метод триангуляции или измерение времени движения луча до препятствия, как и в 3D TOF камере.

В исследовании С.С. Юрочки проведен анализ и обоснованы параметры оптического модуля, построенного на базе 3D TOF камеры и тепловизора. Данный модуль может быть использован для управления манипулятором в роботизированных доильных системах, а также для проведения бесконтактной бонитировки коров [121, 126].



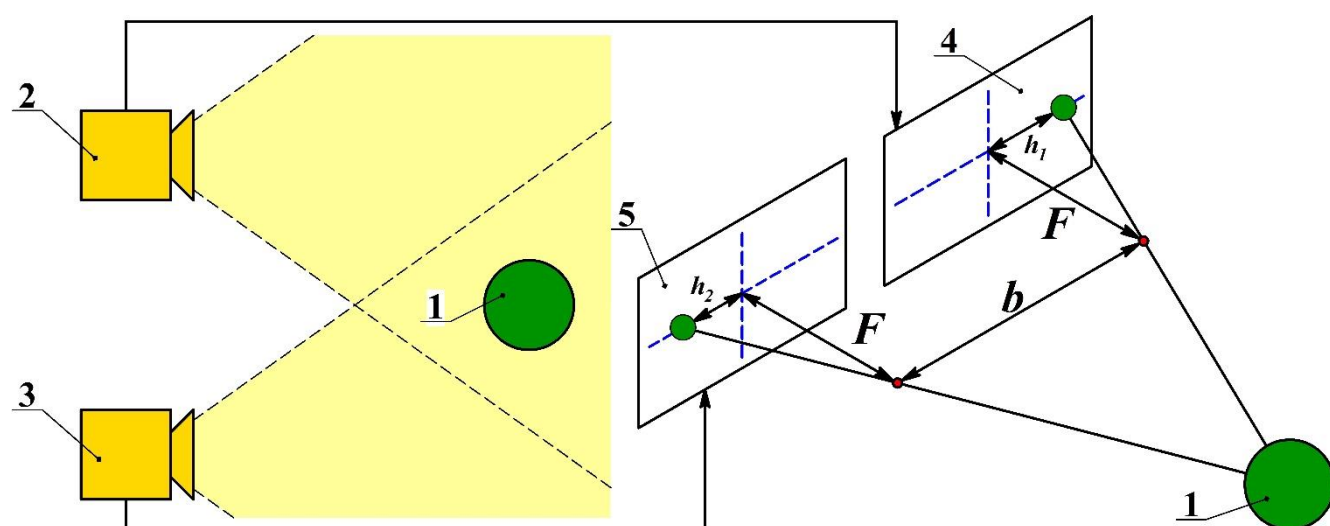
1 – 3D TOF камера, 2 – 3D RGB-D камера с TOF датчиком глубины, 3 – источник света, 4 – TOF сенсор, 5 – RGB камера.

Рисунок 1.23 – Внешний вид 3D камеры.

Таким образом, тепловизор может стать источником дополнительной информации для построения трёхмерной модели пространства. В исследовании [127] разработана система для определения положения сосков вымени коровы на основе объединения данных тепловизора и стереопары. В лабораторных испытаниях установлено, что данная система достаточно точно и за время порядка 1 с способна определить положение четырёх сосков [127].

Стереоскопические системы также позволяют измерять глубину

пространства и применяются в системах машинного зрения различных роботизированных систем как самостоятельные устройства [128]. Стереоскопическая система представляет собой оптическую систему, состоящую из двух фото или видеокамер, расположенных на некотором фиксированном расстоянии друг от друга и осуществляющих съёмку одного и того же объекта (рисунок 1.24) [128]. Сопоставление двух 2D изображений, полученных с камер, позволяет получить координаты этого объекта [121, 129, 130, 131, 132]. При этом сопоставление подразумевает нахождение расстояния до объекта съёмки по величине расхождения в расположении объекта на получаемых изображениях [128, 131, 133].



1 – объект съёмки, 2 – камера №1, 3 – камера №3, 4 – матрица камеры №1, 5 – матрица камеры №2,  $b$  – базовое расстояние,  $F$  – фокусное расстояние объектива камер,  $h_1$  – смещение объекта на матрице первой камеры,  $h_2$  – смещение объекта на матрице второй камеры.

Рисунок 1.24 – Формирование изображения стереопарой.

Для сопоставления изображений разработаны различные алгоритмы сопоставления двух изображений. Наиболее часто эти алгоритмы делят на локальные и глобальные. Локальные алгоритмы подразумевают расчёт диспарентности при сравнении всех точек изображения, но за счёт сравнения только их локальных областей. В глобальных алгоритмах диспарентность

определяется для всех пикселей сопоставляемых изображений [129, 133].

Таким образом, использование 3D камер и лазерных систем в роботизированных системах для определения пространственного положения сосков вымени коров достаточно перспективно. Эти системы имеют достаточно высокую точность, а в случае лазерных систем и высокое разрешение [121]. Тем не менее данные системы являются достаточно сложными оптико-электронными устройствами, что, как правило, определяет их высокую стоимость.

В доильных роботизированных системах 3D камеры или лазерные системы располагаются непосредственно на манипуляторе и фактически оказываются в области агрессивной среды, что может способствовать загрязнению оптических модулей и необходимости их очистки, что повлечёт за собой увеличение продолжительности обработки вымени и снижение пропускной способности робота. Кроме того, в этом случае повышаются риски повреждения модулей системы машинного зрения со стороны животных в процессе преддоильной подготовки или прикрепления доильных стаканов. Так, приучение коров к доильным роботам занимает от двух недель до двух месяцев, а некоторые животных так и не удастся приучить [20]. Соответственно, в этот период системы машинного зрения, расположенные на манипуляторе, наиболее уязвимы.



Рисунок 1.25 – модуль камеры.

Стереоскопические системы уступают по точности 3D камерам и лазерным системам, однако, с точки зрения электроники, организация таких систем значительно проще. Они не требуют дополнительных сенсоров и систем освещения

[121, 134]. Как правило, 3D камеры и лазерные системы реализованы в виде компактных модулей, которые доступны на рынке. Однако для получения качественных 3D карт с использованием данных систем необходима их точная настройка [135]. Стереоскопические же системы можно построить на базе достаточно дешевых модульных камер (рисунок 1.25). При этом увеличение базового расстояния между камерами позволит расположить камеры за пределами рабочей области с агрессивными условиями. Кроме того, при использовании такой системы в работе, осуществляющей преддоильную обработку вымени, неточности в определении координат могут быть нивелированы при помощи двух роликовых щёток большого радиуса.

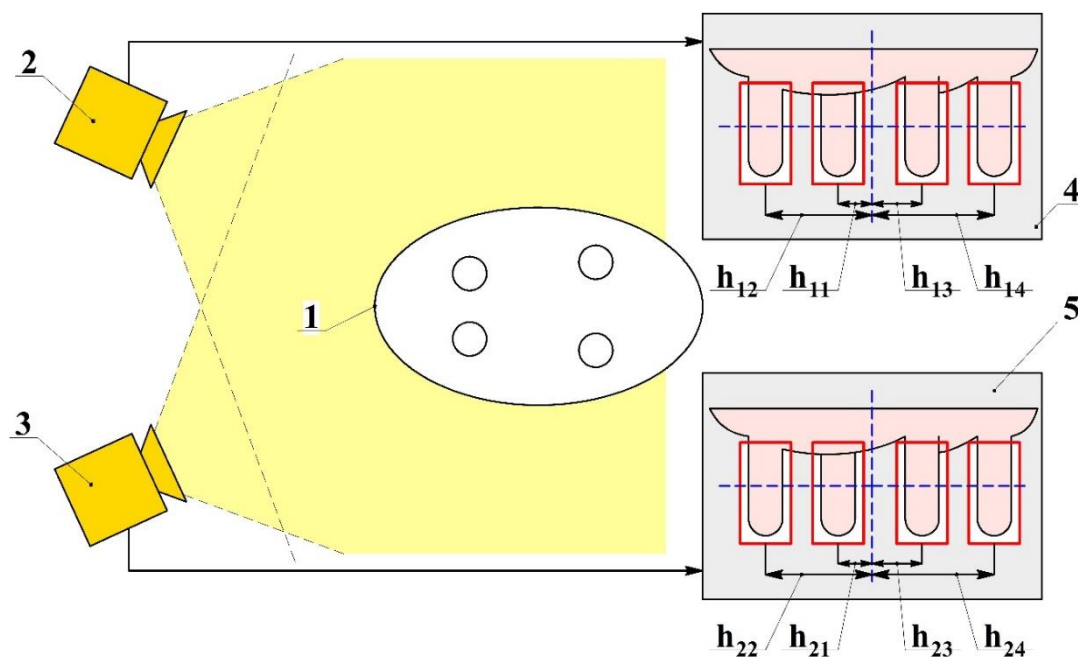
Следует также отметить, что одним из недостатков стереоскопических систем с двумя камерами является существование слепых зон, когда часть рассматриваемой сцены недоступна одной из камер. Решением этой проблемы может стать скрещивание оптических осей камер, т.е. их разворот в сторону снимаемого объекта. Это, как отмечается в [136] позволяет сократить размеры слепой зоны и повысить точность определения координат до 2%.

Размещение камер за пределами рабочей области без привязки к манипулятору позволит сразу после размещения животного в станке приступить к определению координат сосков вымени, в то время как размещение 3D камер или лазерных систем на самом манипуляторе требует дополнительного перемещения манипулятора в рабочую область.

Проведенный анализ систем машинного зрения для роботизированных систем позволяет сделать вывод о том, что существующие системы на основе 3D камер и лазерных систем нацелены на создание карты глубины с информацией о расстояниях до всех точек рассматриваемой сцены. Задача построения карты глубины по двумерным изображениям стереоскопической системы также решается различными учёными [130, 132, 133, 134].

При этом, с точки зрения робота, для осуществления преддоильной подготовки необходимо определить только пространственные координаты сосков для точного наведения манипулятора. При съёмке вымени коровы двумя камерами

(фото или видео), образующими стереопару, соски являются частью изображений, получаемых с камер. На каждой камере они расположены несколько по-разному, т.е. имеют различное смещение относительно центра изображения (рисунок 1.26). Поэтому при надежной идентификации сосков на изображениях, полученных со стереоскопической системы, можно определить их координаты без построения пространственной модели.



1 – вымя; 2 – камера №1; 3 – камера №2; 4 – изображение, получаемое с первой камеры; 5 – изображение, получаемое со второй камеры;  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{13}$ ,  $h_{14}$  – смещение сосков относительно центра на первом изображении;  $h_{21}$ ,  $h_{22}$ ,  $h_{23}$ ,  $h_{24}$  – смещение сосков относительно центра на втором изображении.

Рисунок 1.26 – Определение координат сосков вымени.

Еще одним важным аспектом применения системы машинного зрения на основе стереоскопической системы с двумя фото/видео камерами, расположенными за пределами рабочей области, является возможность получения фотоматериалов с изображением боковой поверхности вымени. В случае обнаружения повреждения снимки вымени конкретной коровы могут отправляться в базу данных с одновременным оповещением ветеринарного врача о необходимости осмотра и принятия решения о лечении.

Таким образом, система позиционирования с манипулятором, имеющим электропривод, и машинным зрением, построенном на основе двух фото/видео камер, образующих стереопару, может быть реализована в роботизированной установке, выполняющей преддоильную подготовку вымени коров в автоматическом режиме. Применение такой системы позволит обеспечить поточное обслуживание животных при их доении на конвейерно-кольцевых доильных установках типа «Карусель».

### **1.5. Выводы по главе**

Проведенный литературный обзор по теме исследования позволил сформулировать следующие выводы.

- 1) Преддоильная подготовка вымени коров является одним из важнейших элементов технологии машинного доения коров. Необходимость проведения подготовительных операций продиктована не только особенностями физиологии животных, но и имеет нормативную основу. Качественное выполнение подготовительных операций прямо определяет качество молока, способствует снижению времени доения, повышает полноту выдаивания и обеспечивает сохранение здоровья вымени коров.
- 2) Преддоильная подготовка является одной из самых трудозатратных операций в технологии машинного доения. В настоящее время в хозяйствах с разными способами содержания подготовительные операции перед доением осуществляются вручную или вручную, но с использованием технических средств. Только в доильных роботах эта операция полностью автоматизирована.
- 3) В настоящее время созданы доильные роботы, которые имеют боксовую структуру, а также разрабатываются системы, которые позволяют роботизировать доильные залы с традиционными доильными установками, в частности с конвейерно-кольцевыми доильными установками типа «Карусель». Данный тип доильных установок имеет наибольшую производительность и удобен для использования роботов, так как обслуживание животных на данных доильных установках максимально приближено к поточной линии промышленного

предприятия. Тем не менее стоимость роботизированных систем достаточно высока.

4) Снизить стоимость роботизированных систем позволит роботизация отдельных технологических операций при помощи роботов с упрощённой конструкцией. Создание робота, выполняющего подмыв и массаж вымени коров перед выходом на платформу доильной установки типа «Карусель», позволит снизить затраты труда операторов доильного зала при доении коров и повысит пропускную способность доильной установки.

5) Для создания роботизированной установки, выполняющей преддоильную подготовку вымени коров в доильных залах с конвейерно-кольцевой доильной установкой типа «Карусель», необходимо определить её основные конструктивные параметры и режимы работы, и разработать систему позиционирования рабочего органа в пространстве.

## **1.6. Цель и задачи исследования**

**Цель исследования** – 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**

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 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.

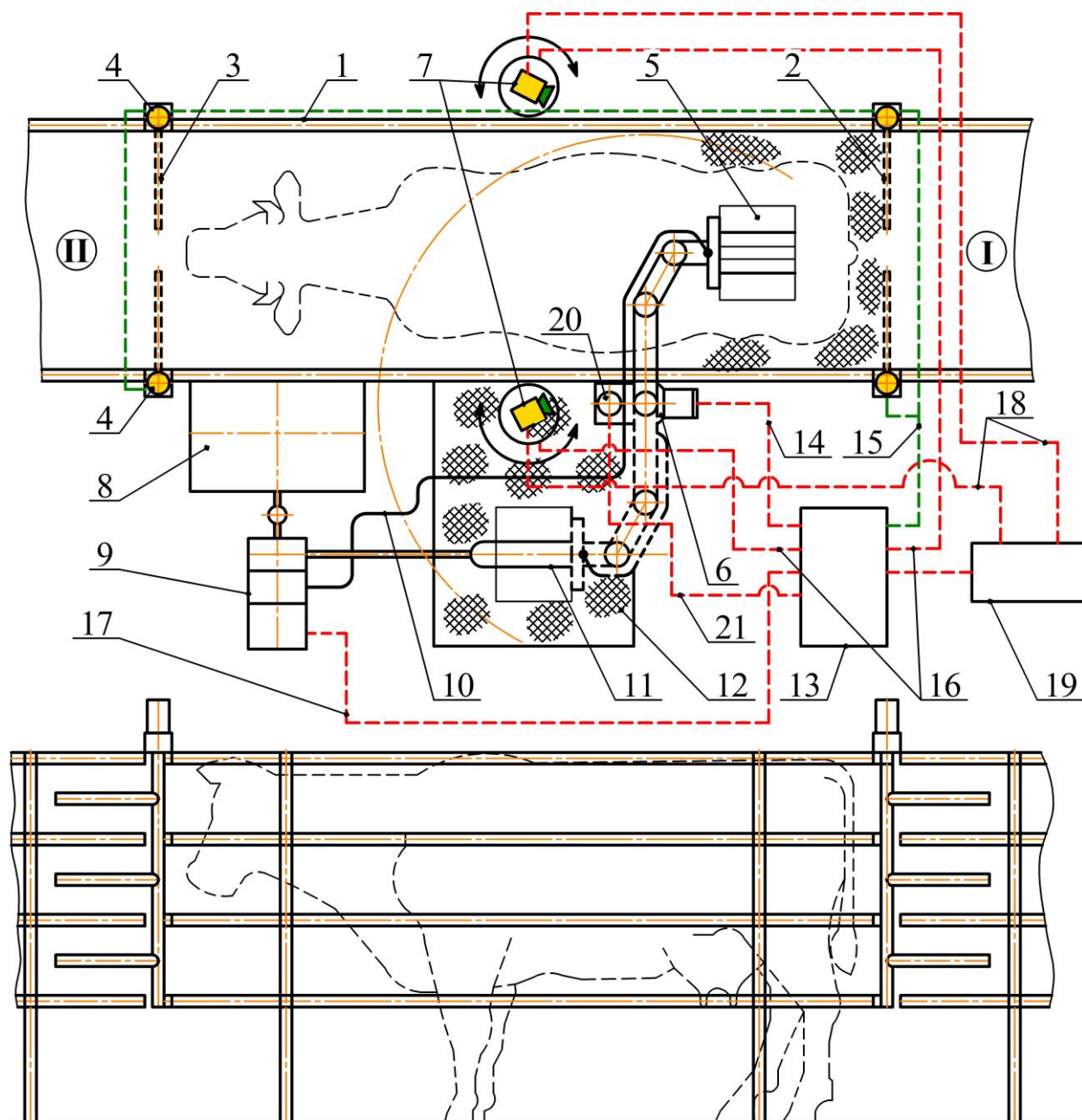
## **ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ПРЕДДОИЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ВЫМЕНИ КОРОВ И СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ**

### **2.1. Функциональная схема роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров**

На основе анализа литературы и патентных документов, представленного в первом разделе, разработана функциональная схема роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров, которая в автоматическом режиме выполняет подмыв и массаж вымени в доильных залах с конвейерно-кольцевыми доильными установками типа «Карусель» (приложение А) [137, 138, 139, 140, 141].

Основу роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров составляет проходной станок 1, оснащенный входной 2 и выходной 3 дверцами (рисунок 2.1). Открытие и закрытие обеих дверей осуществляется при помощи электропривода 4. Вход коровы в станок роботизированной установки осуществляется с площадки преддоильного накопителя I. Входная дверца открывается в тот момент, когда предыдущая корова прошла в установке преддоильную подготовку и вышла через выходную дверцу на площадку II. В свою очередь открытие выходной дверцы синхронизировано с вращением платформы доильной установки. Выходная дверца открывается, когда подошёл свободный станок на платформе доильной установки и закрывается сразу же после прохода через неё коровы.

Обработка вымени перед доением осуществляется при помощи щётчного рабочего органа 5, перемещение которого в рабочую область осуществляется системой позиционирования. Данная система включает в себя манипулятор 6 и две 2D видеокамеры 7 с поворотным механизмом, которые образуют машинное зрение установки и расположены на несущих элементах станка. При помощи камер определяются координаты сосков вымени коровы, а манипулятор перемещает рабочий орган в расчётную точку (Приложение Б) [142, 143].



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 2.1 – Функциональная схема роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров.

В качестве жидкости, применяемой для подмыва вымени может быть использована вода или раствор дезинфицирующего средства, которые находятся в баке 8 с подогревателем. При помощи насоса 9 и системы шлангов 10, уложенных вдоль механических частей манипулятора, моющая жидкость подается к рабочему органу. Для периодической очистки самих щёток рабочего органа в системе предусмотрен душ 11, моющая жидкость в который также подается насосом из бака. При этом отвод моющей жидкости, использованной для обработки вымени или очистки щёток рабочего органа, осуществляется посредством канализационных решеток 12, расположенных как в области станка установки, так и в области расположения душа для очистки щёток.

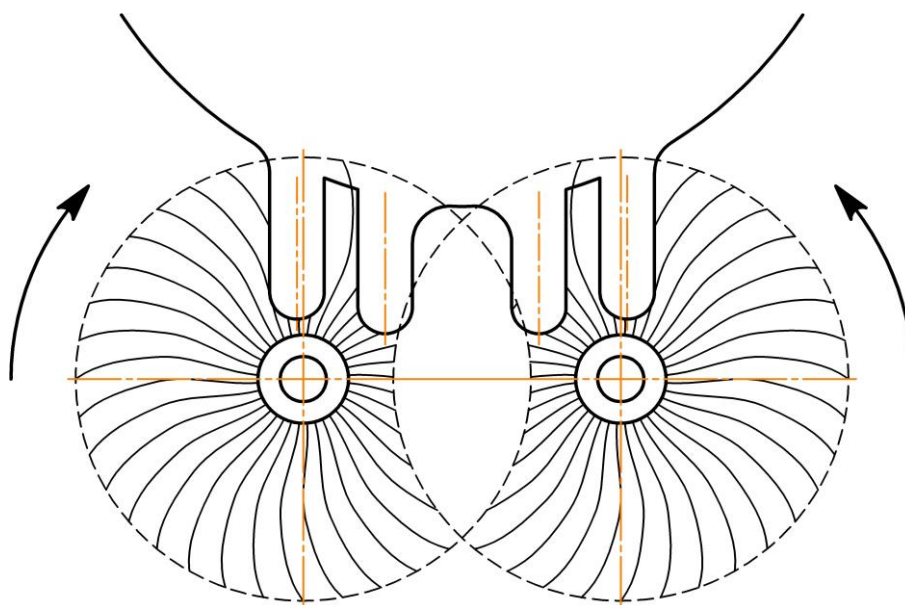
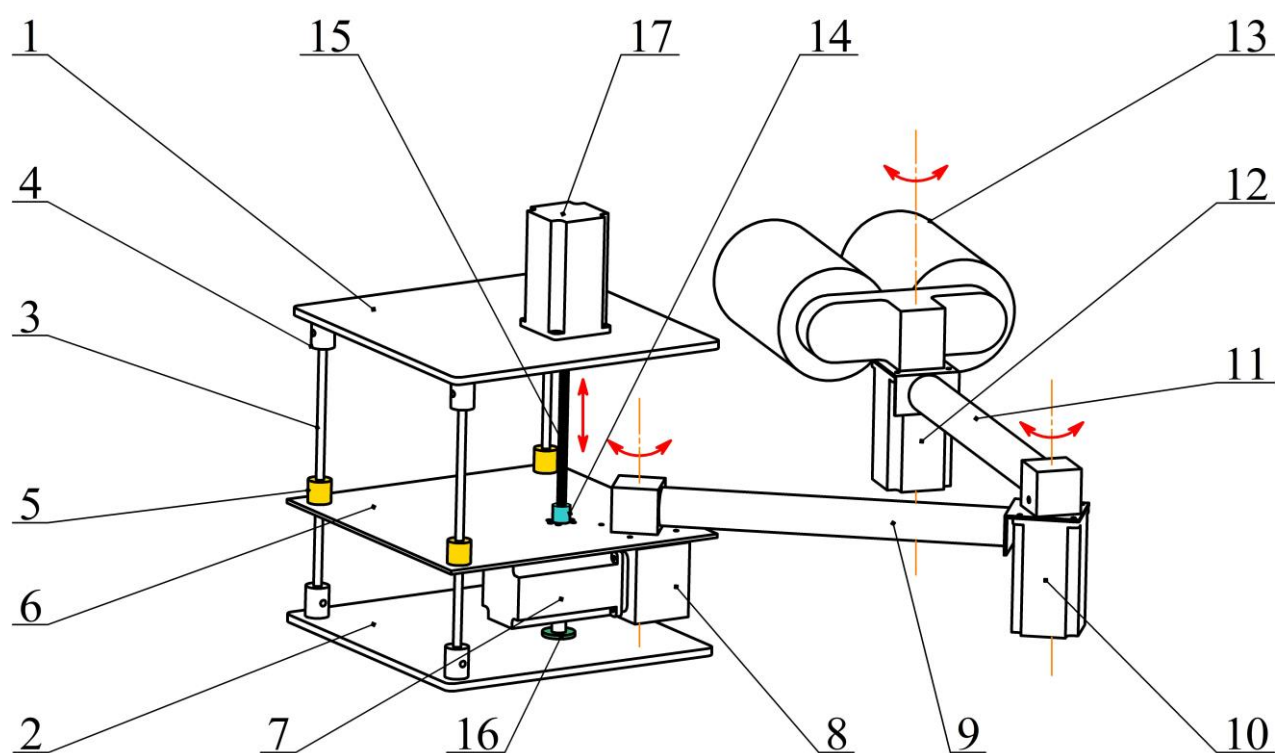


Рисунок 2.2 – Обработка вымени коровы при помощи двух роликовых щёток.

Управление приводом манипулятора, входной и выходной дверцами, поворотным механизмом камер и насосом осуществляется блоком управления 13 посредством линий управления 14, 15, 16, 17. Обработка графического материала, поступающего с камер машинного зрения роботизированной установки по линии передачи данных 18, и расчёт координат сосков вымени коровы осуществляется ЭВМ 19 при помощи программного обеспечения.

Рабочий орган роботизированной установки преддоильной подготовки

вымени образуют две роликовые щётки большого радиуса, которые позволяют обрабатывать все соски вымени одновременно (рисунок 2.2) [144]. Приводятся данные щётки во вращение при помощи электропривода 20 (рисунок 2.1) посредством гибкого вала. При этом один из валов, на котором насажена щетка, полый и имеет отверстия для разбрызгивания моющей жидкости. Разбрызгиваемая при вращении щёток рабочего органа моющая жидкость обеспечивает подмыв вымени коровы, а воздействие ворса щёток на его поверхность выполняет роль массажа. Управление приводом щёток осуществляется по линии управления 21 (рисунок 2.1).



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 2.3 – Манипулятор роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров.

Манипулятор роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров представляет собой механическую «руку» с тремя поворотными и одной линейной осями, которая расположена сбоку от станка установки. Данный манипулятор имеет три степени свободы и позволяет перемещать рабочий орган в пространстве вдоль трех осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  системы координат, которая связана со станком установки. При этом позиционирование рабочего органа в плоскости  $ХОУ$  обеспечивается тремя поворотными осями, а вертикальное позиционирование вдоль оси  $z$  обеспечивается линейной осью. Управление манипулятором осуществляется посредством электроприводов, в качестве которых выступают шаговые моторы, которые располагаются в узлах соединения механических частей манипулятора.

На рисунке 2.3 приведена схема манипулятора роботизированной установки. Он состоит из верхнего и нижнего основания 1 и 2, которые соединены между собой направляющими 3, зафиксированными в держателях 4. Вдоль направляющих на линейных подшипниках 5 перемещается подвижная платформа 6. На подвижной платформе закреплен шаговый двигатель 7 с редуктором 8, на валу которого одним концом крепится грузовой рычаг 9. На втором конце грузового рычага закреплен шаговый двигатель 10, на валу которого закреплён вспомогательный рычаг 11. К свободному концу вспомогательного рычага крепится шаговый двигатель 12 и рабочий орган 13 (Приложение В) [145, 146].

Перемещение подвижной платформы вдоль направляющих осуществляется за счёт шариковой винтовой передачи, гайка 14 которой закреплена на подвижной платформе, а её винт 15 зафиксирован в подшипниковых узлах 16, расположенных на нижнем и верхнем основании. Винт шариковой винтовой передачи получает вращательное движение от шагового двигателя 17, установленного на верхнем основании.

Работа установки преддоильной подготовки вымени подразумевает выполнение ряда последовательных действий, контроль над осуществлением которых выполняется блоком управления и ЭВМ (рисунок 2.1). На рисунке 2.4 представлен алгоритм работы этого блока [147].

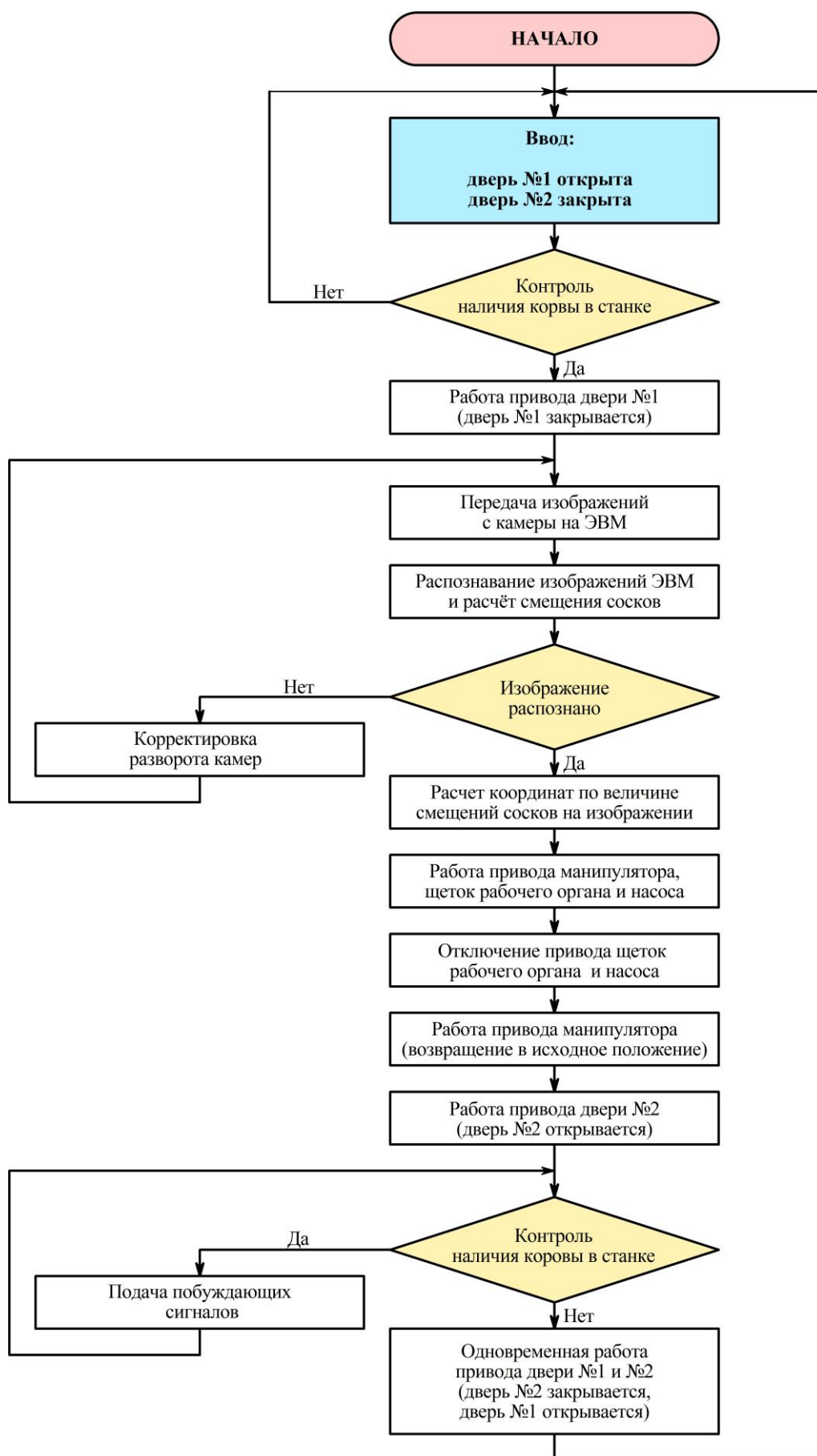


Рисунок 2.4. Блок-схема алгоритма работы блока управления роботизированной установки преддоильной подготовки вымени.

Согласно алгоритму блока управления, работа установки протекает следующим образом. В начальный момент рабочего цикла установки открыта входная дверца, при этом выходная дверца закрыта. Система отслеживает попадание животного в станок посредством системы датчиков, в качестве которых могут быть использованы тензо-датчики или ультразвуковой радар.

В момент попадания животного в станок система датчиков подает сигнал блоку управления о нахождении животного в станке, после чего блок управления генерирует команду на закрытие входной дверцы и включает привод входной дверцы. Затем в действие приводится система машинного зрения установки для определения рабочей области и подведения в эту область рабочего органа для осуществления подмыва и массажа вымени.

Снимки вымени животного, полученные в двух пересекающихся плоскостях, передаются на ЭВМ, где происходит их обработка и распознавание положения сосков. Обработка изображений подразумевает определение смещения контура сосков вымени животного относительно центра изображения. Это смещение позволяет определить координаты расположения сосков, что необходимо для наведения манипулятором рабочего органа в рабочую область.

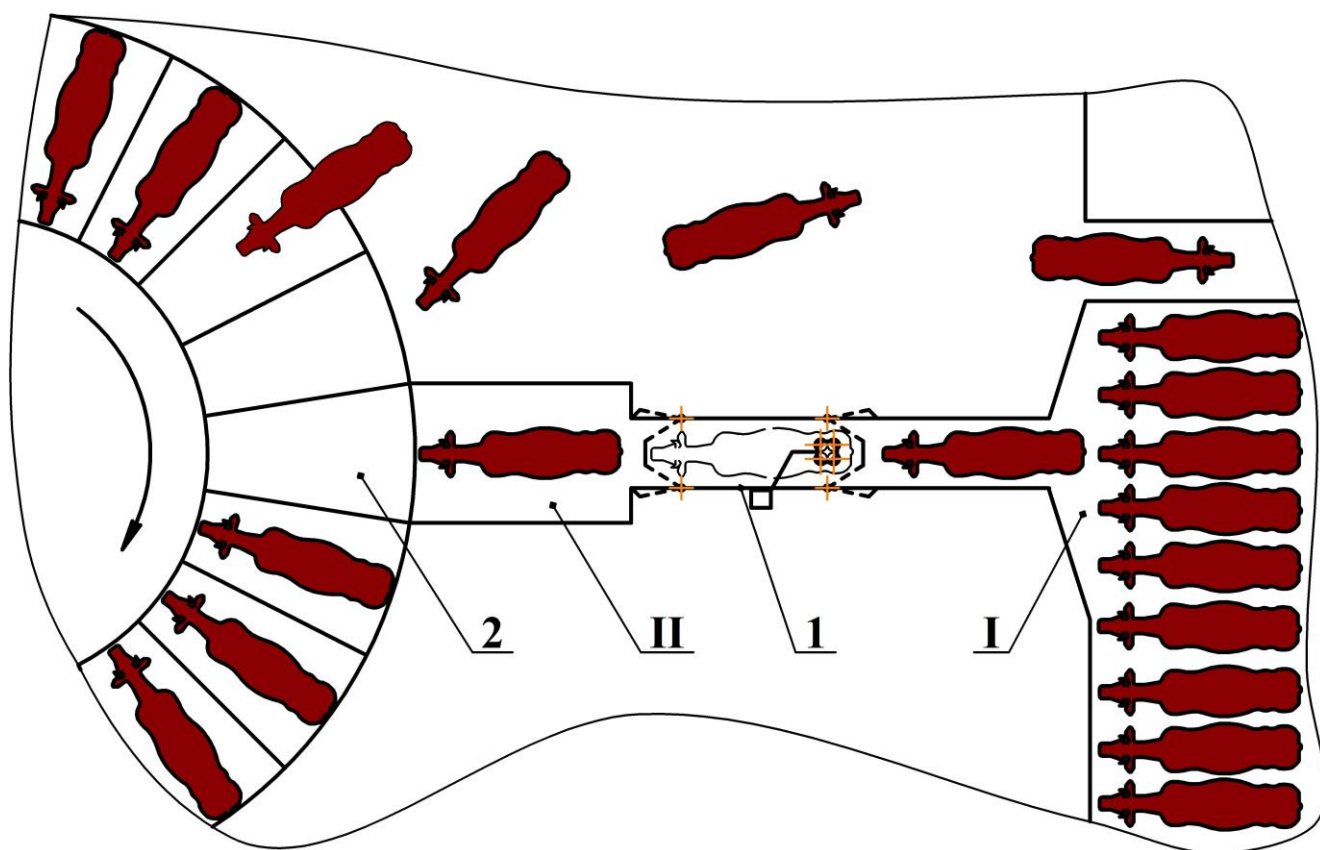
В случае если изображение распознано и определено смещение контура сосков относительно центра изображений, осуществляется расчет координат. В противном случае, если распознавание изображения закончилось неудачей, блок управления осуществляет корректировку разворота камер, после чего процесс расчёта повторяется.

После расчета координат блок управления инициирует включение моторов щеток рабочего органа и насоса, подающего моющую жидкость. Одновременно включаются моторы манипулятора, осуществляя тем самым подведение рабочего органа к вымени животного.

После осуществления подмыва и массажа вымени привод щеток рабочего органа и насос отключаются, и манипулятор возвращается в исходное положение. Сразу после этого блок управления включает привод выходной дверцы, открытие которой позволяет животному выйти из станка.

В случае если животное после открывания выходной дверцы остается в станке установки преддоильной подготовки вымени, блок управления подает побуждающие сигналы (например, разбрызгивание воды). Кроме того, добровольный выход животного из станка можно стимулировать размещением в станках доильной установки кормушек с дозированной подачей концентрированного корма.

После того, как животное покинуло станок и датчики определили его отсутствие, блок управления закрывает выходную дверцу и одновременно открывает входную дверцу для следующего животного, после чего цикл повторяется заново.



I – преддоильный накопитель; II – площадка входа на платформу доильной установки; 1 – роботизированная установка преддоильной подготовки вымени; 2 – станки доильной установки.

Рисунок 2.5 – Схема расположения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени в доильном зале

В доильном зале роботизированная установка преддоильной подготовки вымени располагается между преддоильным накопителем I и площадкой II, с которой коровы выходят на вращающуюся платформу доильной установки (рисунок 2.5). Использование такой промежуточной площадки обусловлено тем, что корове удобнее выйти из станка роботизированной установки на эту площадку, так как она неподвижна, а затем с неё зайти в станок доильной установки на вращающейся платформе данной установки, нежели сразу же через дверцу выходить на вращающуюся платформу [148].

Технология машинного доения коров на конвейерно-кольцевых доильных установках типа «Карусель» с использованием роботизированной установки преддоильной подготовки вымени подразумевает выполнение следующих операций:

- 1) переход группы коров из секции коровника в преддоильный накопитель;
- 2) поочерёдный вход коров в станок роботизированной установки преддоильной подготовки вымени;
- 3) подмыв и массаж вымени в роботизированной установке преддоильной подготовки вымени коров;
- 4) выход коровы из станка роботизированной установки преддоильной подготовки вымени на промежуточную площадку и вход в станок доильной установки с автоматической идентификацией в программе управления доильным залом;
- 5) контроль оператором доильного зала качества выполнения подмыва вымени в роботизированной установке;
- 6) вытирание вымени насухо оператором доильного зала;
- 7) сдаивание первых струек молока оператором доильного зала;
- 8) подключение доильных стаканов к соскам вымени оператором доильного зала;
- 9) доение коровы;
- 10) снятие доильных стаканов с сосков вымени коровы;
- 11) обработка сосков вымени после доения оператором доильного зала;
- 12) выход коровы из станка доильной установки;
- 13) проход коровы через селекционные ворота и возвращение в секцию коровника.

Тем не менее для реализации данной технологии важно добиться установившегося ритма работы роботизированной установки преддоильной подготовки вымени, когда вышедшую из станка корову заменяет вновь вошедшая. Это позволит избежать простоев в работе как доильной установки, так и работа при их совместной работе и обеспечит строгую поточность процесса доения. Однако для этого необходимо решить задачу согласованной работы робота с доильной установкой [149].

Таким образом, применение роботизированной установки преддоильной подготовки вымени позволяет вынести подготовительные операции за пределы платформы доильной установки и освободить оператора доильного зала от выполнения подмыва и массажа вымени. Кроме того, применение данного робота позволит исключить влияние человеческого фактора при выполнении подготовительных операций перед доением. Робот всегда будет выполнять данную операцию одинаково в соответствии с заложенным алгоритмом, со строгой последовательностью и чёткими временными интервалами. Это будет способствовать формированию очень важного для лактирующих коров «стереотипа машинного доения».

## **2.2. Согласованная работа роботизированной установки преддоильной подготовки вымени и доильной установки «Карусель»**

Согласованную работу роботизированной установки преддоильной подготовки вымени с конвейерно-кольцевой доильной установкой типа «Карусель» определяет продолжительность рабочего цикла робота, которая в целом определяется временем выполнения алгоритма блоком управления. При этом на величину рабочего цикла роботизированной установки оказывают влияние два фактора.

Во-первых, рабочий цикл роботизированной установки преддоильной подготовки вымени должен обеспечивать соответствие пропускной способности робота и доильной установки. Это позволит синхронизировать вращение платформы доильной установки с ритмом работы роботизированной установки

преддоильной подготовки вымени.

Вторым значимым фактором, определяющим продолжительность рабочего цикла роботизированной установки преддоильной подготовки вымени является соблюдение зоотехнических требований к технологии машинного доения коров, одним из которых является строгое соблюдение временных интервалов при подготовке вымени к доению. В среднем активный припуск молока начинается через 45 – 60 секунд после первого касания вымени [33, 34, 38, 150, 151]. За это время необходимо выполнить преддоильную подготовку и приступить к подключению доильных стаканов. Таким образом, доильные стаканы должны быть подключены к соскам вымени коровы не позднее чем через 60 секунд с момента начала выполнения подготовительных операций.

Чтобы учесть данные факторы, рассмотрим продолжительность рабочего цикла роботизированной установки преддоильной подготовки вымени на основе дифференцированного подхода. Для этого определим затраты времени на выполнение отдельных операций при подготовке вымени к доению при помощи роботизированной установки преддоильной подготовки вымени.

Так в процессе работы роботизированной установки преддоильной подготовки вымени затраты времени приходятся на выполнение следующих операций (рисунок 2.6):

- 1) вход коровы в станок роботизированной установки преддоильной подготовки вымени;
- 2) определение координат сосков вымени системой машинного зрения;
- 3) подведение манипулятором рабочего органа в рабочую область;
- 4) проведение при помощи рабочего органа подмыва и массажа вымени;
- 5) отведение рабочего органа из рабочей области;
- 6) выход коровы из станка роботизированной установки преддоильной подготовки вымени на промежуточную платформу;
- 7) вход коровы на платформу доильной установки;
- 8) движение коровы на платформе доильной установки до оператора;
- 9) обтирание оператором вымени коровы насухо и сдаивание первых струек

молока;

10) подключение оператором доильных стаканов.

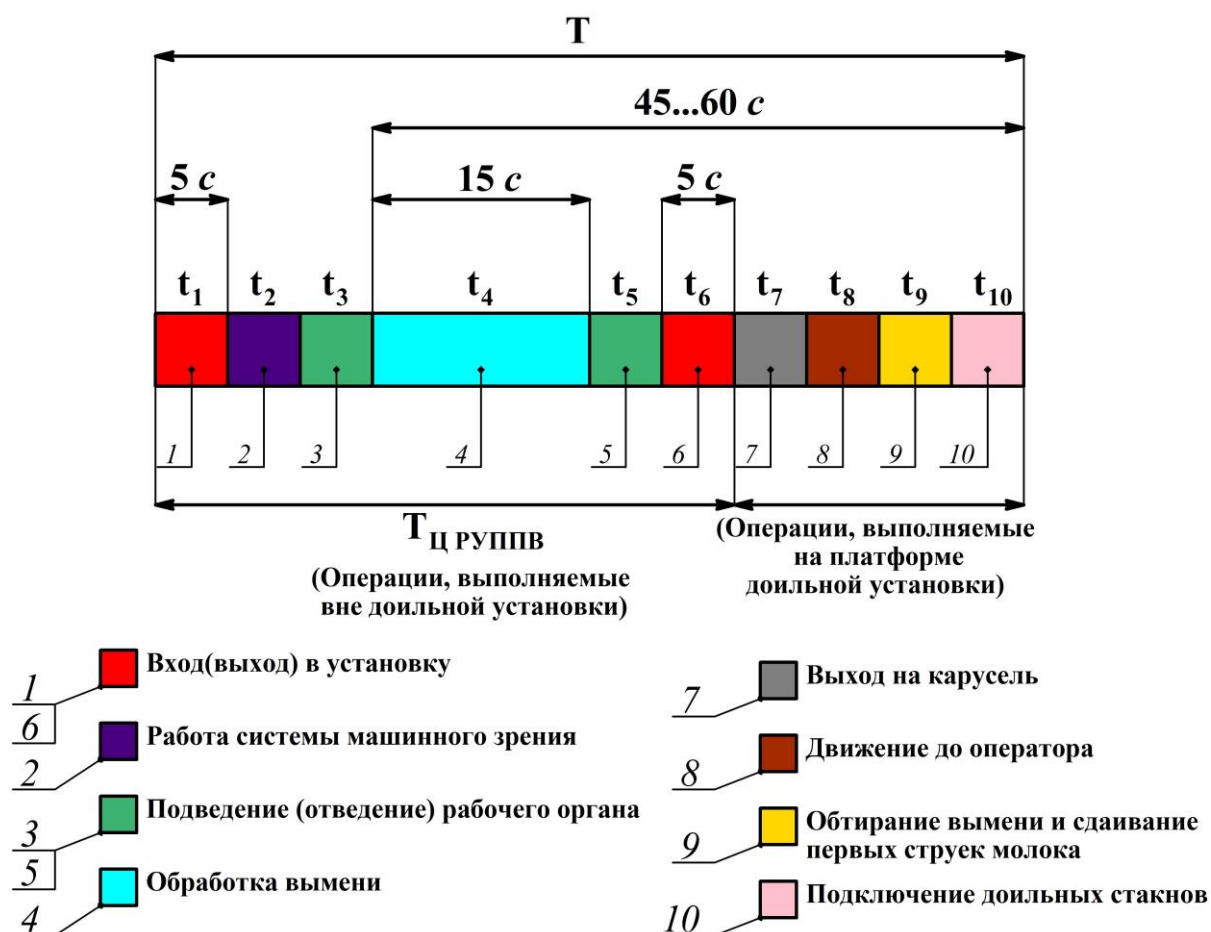


Рисунок 2.6 – Диаграмма распределения времени на выполнение отдельных операций роботизированной установки преддоильной подготовки вымени.

В этом случае общее время, отводимое на выполнение всех операций, выполняемых на доильной установке в сочетании с роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени, можно описать формулой:

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}, \quad (2.1)$$

где  $t_1$  – время, затрачиваемое на вход в станок роботизированной установки преддоильной подготовки вымени;

$t_2$  – время, затрачиваемое на работу системы машинного зрения и определение координат сосков вымени;

$t_3$  – время, затрачиваемое на подведение рабочего органа в рабочую область;  
 $t_4$  – время, затрачиваемое на проведение массажа и подмыва вымени;  
 $t_5$  – время, затрачиваемое на отведение рабочего органа из рабочей области;  
 $t_6$  – время, затрачиваемое на выход коровы на промежуточную платформу;  
 $t_7$  – время, затрачиваемое на вход коровы на платформу доильной установки;  
 $t_8$  – время, затрачиваемое на движение коровы до оператора;  
 $t_9$  – время, затрачиваемое на обтирание вымени насухо и сдаивание первых струек молока;  
 $t_{10}$  – время, затрачиваемое на подключение доильных аппаратов.

Операции с первой по шестую проводятся вне доильной установки и определяют продолжительность рабочего цикла роботизированной установки преддоильной подготовки вымени:

$$T_{Ц\text{ РУППВ}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6, \quad (2.2)$$

где  $T_{Ц\text{ РУППВ}}$  – время рабочего цикла роботизированной установки преддоильной подготовки вымени, с.

Остальные операции проводятся уже на платформе доильной установки, и их общая продолжительность составляет:

$$T_{ДУ\text{ РУППВ}} = t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}, \quad (2.3)$$

где  $T_{ДУ\text{ РУППВ}}$  – время выполнения операций на платформе доильной установки при доении с использованием роботизированной установки преддоильной подготовки вымени, с.

Операции с четвёртой по десятую определяют время от первого касания сосков вымени до подключения доильных стаканов. Поэтому продолжительность выполнения данных операций должна соответствовать зоотехническим требованиям:

$$t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} = 45 - 60 \text{ с.} \quad (2.4)$$

Продолжительность осуществления непосредственно подмыва и массажа вымени должна составлять порядка 15 секунд [33]. Поэтому согласно принятым обозначениям:

$$t_4 = 15 \text{ с.} \quad (2.5)$$

Таким образом, с учётом (2.5) из (2.4) следует, что на выполнение операций с пятой по десятую приходится порядка 30 – 45 секунд, т.е.

$$t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} = 30 - 45 \text{ с.} \quad (2.6)$$

Это время включает в себя:

- 1) отведение рабочего органа из рабочей области;
- 2) выход коровы на промежуточную площадку;
- 3) выход животного на карусель;
- 4) движение коровы до оператора;
- 5) обтирание вымени оператором и сдаивание первых струек молока;
- 6) подключение доильных стаканов к соскам вымени коровы.

Для оценки времени, которое необходимо животному на вход и выход в станок роботизированной установки преддоильной подготовки вымени, на животноводческом комплексе предприятия ООО «Растениеводческое хозяйство Родина» Гаврилово-Посадского района Ивановской области была изучена работа доильного робота VMS DeLaval [152]. Проведенное исследование позволило установить, что затраты времени на вход и выход животных в станок и из станка доильного робота в среднем составляют 7 секунд. При этом в изученном доильном роботе используется боковой вход. Однако в роботизированной установке преддоильной подготовки вымени станок проходной, что позволяет сократить время входа и выхода, и его можно принять равным 5 секундам, т.е.:

$$t_1 = t_6 = 5 \text{ с.} \quad (2.7)$$

С учётом (2.7) получаем, что суммарное время выполнения 5-ой, 7-ой, 8-ой, 9-ой и 10-ой операции составляет 25 – 40 секунд, т.е.:

$$t_5 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} = 25 - 40 \text{ с.} \quad (2.8)$$

Временные показатели операций, входящих в равенство (2.8) можно получить, распределив временной интервал 25 – 40 (2.8) равномерно между ними. Тогда с учётом (2.8) получаем:

$$t_5 = t_7 = t_8 = t_9 = t_{10} = 5 - 8 \text{ с.} \quad (2.9)$$

Временной отрезок  $t_5$  – это время, затрачиваемое на подведение и отведение манипулятором рабочего органа. Поскольку это время должно быть одинаковым, то временные интервалы  $t_5$  и  $t_3$  должны равняться друг другу, то есть:

$$t_3 = t_5 = 5 - 8 \text{ с.} \quad (2.10)$$

С учетом (2.2), (2.7), (2.9) и (2.10) получаем, что продолжительность рабочего цикла роботизированной установки преддоильной подготовки вымени определяется следующим выражением:

$$T_{Ц\text{ РУППВ}} = t_2 + (35 - 41). \quad (2.11)$$

Время  $t_2$  определяет продолжительность работы машинного зрения и расчёта координат сосков вымени. Величину этого времени определяет скорость обработки графического материала, поступающего с камер. Поэтому необходима разработка программного продукта для ЭВМ, обеспечивающего максимальную скорость распознавания изображений и максимальную скорость расчета координат. При этом следует отметить, что увеличить скорость обработки графического материала, поступающего с камер, позволит подбор оптимальной схемы распознавания изображений и использование камер в системе позиционирования с оптикой,

позволяющей получать изображения должного качества. Также на скорость работы системы позиционирования окажет влияние величина вычислительной мощности ЭВМ.

Если время позиционирования займет не более 5 секунд, то продолжительность цикла роботизированной установки преддоильной подготовки вымени будет определяться временным интервалом, равным:

$$T_{\text{ЦРУППВ}} = 40 - 46 \text{ с.} \quad (2.12)$$

Пропускную способность роботизированной установки преддоильной подготовки вымени или общую пропускную способность нескольких таких установок, работающих совместно, можно определить формулой [80, 81]:

$$Q_{\text{РУППВ}} = \frac{3600}{T_{\text{ЦРУППВ}}} \cdot n_{\text{РУППВ}}, \quad (2.13)$$

где  $Q_{\text{РУППВ}}$  – пропускная способность роботизированной установки преддоильной подготовки вымени, коров/ч;  $T_{\text{ЦРУППВ}}$  – продолжительность рабочего цикла установки преддоильной подготовки вымени, с;  $n_{\text{РУППВ}}$  – число роботизированных установок преддоильной подготовки вымени коров, шт.

Так для одной установки преддоильной подготовки вымени и времени её цикла 40 – 46 секунд, согласно (1), пропускная способность составит 90 – 78 коров/ч.

При этом следует отметить, что интервалы времен  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_5$  фактически определяются техническими характеристиками машинного зрения, ЭВМ, манипулятора и не зависят от физиологии животных или требований к машинному доению. Ускорение работы системы машинного зрения и привода манипулятора снизит общую сумму  $t_2 + t_3 + t_5$  и, как следствие, уменьшит продолжительность рабочего цикла роботизированной установки преддоильной подготовки вымени. Уменьшению продолжительности рабочего цикла также будет способствовать приучение животных к обработке вымени в роботизированной установке.

Таблица 2.1 – Продолжительность составляющих операции преддоильной подготовки вымени.

| №<br>п/п | Наименование операции                                                             |                                                                                  | Различные варианты распределения времени на<br>выполнение отдельных операций |    |                                      |    |                                      |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----|--------------------------------------|----|--------------------------------------|----|
|          |                                                                                   |                                                                                  | Вариант №1                                                                   |    | Вариант №2                           |    | Вариант №3                           |    |
| 1        | Операции, выполняемые в роботизированной установке преддоильной подготовки вымени | Вход коровы в станок роботизированной установки преддоильной подготовки вымени   | $T_{ц\text{ руппв}} = 46 \text{ с}$                                          | 5  | $T_{ц\text{ руппв}} = 40 \text{ с}$  | 5  | $T_{ц\text{ руппв}} = 34 \text{ с}$  | 5  |
| 2        |                                                                                   | Определение координат сосков вымени                                              |                                                                              | 5  |                                      | 5  |                                      | 3  |
| 3        |                                                                                   | Подведение манипулятором рабочего органа в рабочую область                       |                                                                              | 8  |                                      | 5  |                                      | 3  |
| 4        |                                                                                   | Проведение при помощи рабочего органа подмыва и массажа вымени                   |                                                                              | 15 |                                      | 15 |                                      | 15 |
| 5        |                                                                                   | Отведение рабочего органа из рабочей области                                     |                                                                              | 8  |                                      | 5  |                                      | 3  |
| 6        |                                                                                   | Выход коровы из станка роботизированной установки преддоильной подготовки вымени |                                                                              | 5  |                                      | 5  |                                      | 5  |
| 7        | Операции, выполняемые на платформе доильной установки                             | Вход коровы на платформу доильной установки                                      | $T_{д\text{у руппв}} = 32 \text{ с}$                                         | 8  | $T_{д\text{у руппв}} = 20 \text{ с}$ | 5  | $T_{д\text{у руппв}} = 22 \text{ с}$ | 5  |
| 8        |                                                                                   | Движение коровы на платформе доильной установки до оператора                     |                                                                              | 8  |                                      | 5  |                                      | 7  |
| 9        |                                                                                   | Обтирание оператором вымени коровы насухо и сдаивание первых струек молока       |                                                                              | 8  |                                      | 5  |                                      | 5  |
| 10       |                                                                                   | Подключение оператором доильных стаканов.                                        |                                                                              | 8  |                                      | 5  |                                      | 5  |
| 11       | Время от первого касания вымени до подключения доильных аппаратов                 |                                                                                  | 60                                                                           |    | 45                                   |    | 45                                   |    |
| 12       | Пропускная способность роботизированной установки преддоильной подготовки вымени  |                                                                                  | 78                                                                           |    | 90                                   |    | 106                                  |    |

Так снижение времени работы системы позиционирования и подведения (отведения) рабочего органа из рабочей области до трех секунд позволит сократить время рабочего цикла до 34 – 40 с, при этом высвободившееся время для соблюдения зоотехнических требований можно распределить на операции, выполняемые на платформе доильной установки. Это позволит увеличить пропускную способность роботизированной установки преддоильной подготовки вымени до 90 – 106 коров/ч.

В таблице 2.1 приведены различные варианты распределения времени на выполнение отдельных операций при доении коров с использованием роботизированной установки преддоильной подготовки вымени. Как видно из таблицы, варьируя временные промежутки между операциями, можно добиться различной пропускной способности роботизированной установки, но при этом выполнять требования правил машинного доения.

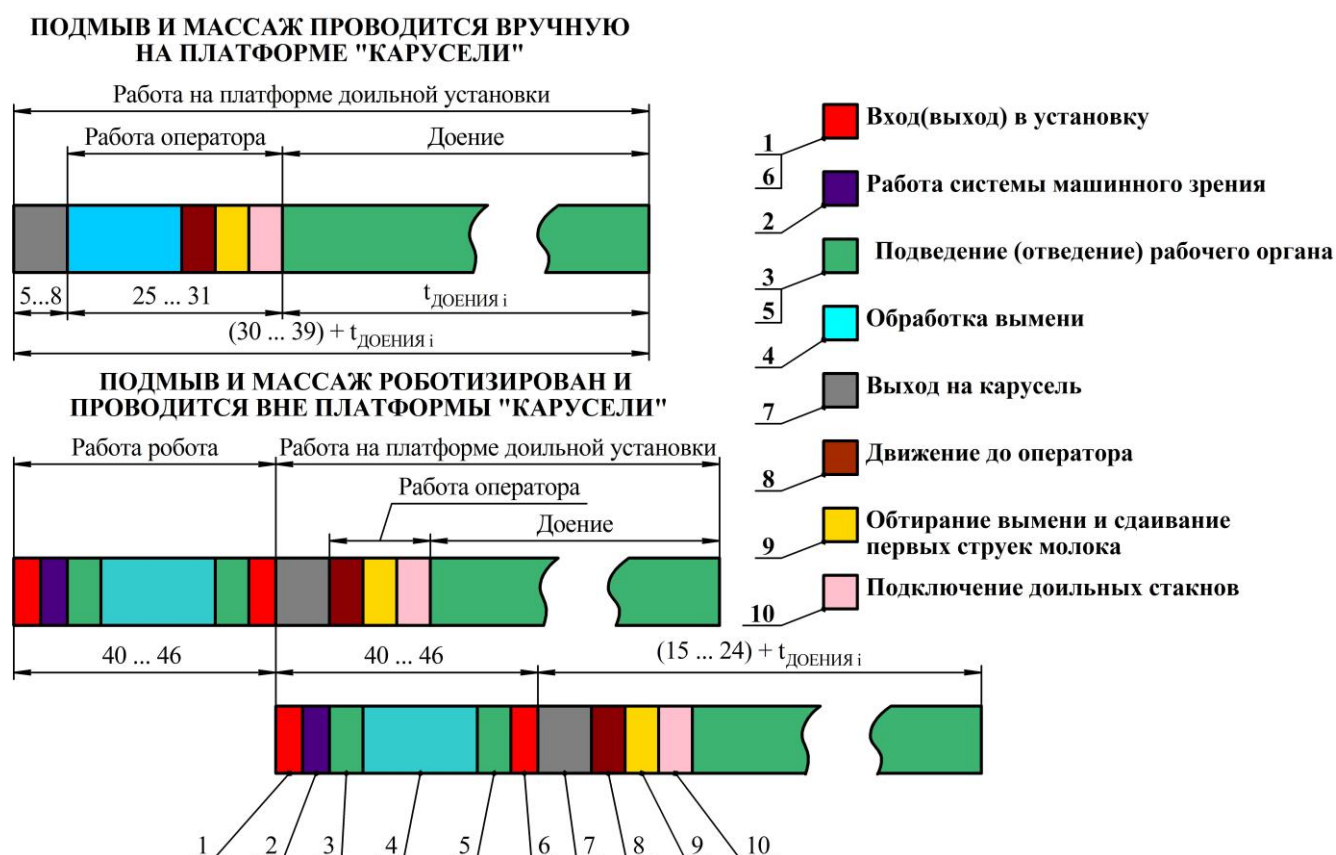


Рисунок 2.7 – Циклограмма технологических операций на доильной установке типа «Карусель» с применением роботизированной установки преддоильной подготовки вымени и без нее.

Для исследования продолжительности доения на конвейерно-кольцевой доильной установке с использованием роботизированной установки преддоильной подготовки вымени были построены циклограммы (рисунок 2.7):

- 1) при подмыве и массаже вымени вручную на платформе доильной установки;
- 2) при проведении подмыва и массажа вымени роботизированной установкой вне платформы доильной установки.

Построенные циклограммы наглядно показывают сокращение времени работы оператора за счет выноса операций по подмыву и массажу вымени за пределы доильной установки. Это позволяет снизить время работ на платформе доильной установки, что способствует увеличению производительности доильной установки [153, 154].

Для расчёта пропускной способности конвейерно-кольцевой доильной установки типа «Карусель» применим формулу, аналогичную формуле пропускной способности роботизированной установки вымени:

$$Q_{ДУ} = \frac{3600}{T_{Ц ДУ}} \cdot n_{ДУ}, \quad (2.14)$$

где  $Q_{ДУ}$  – пропускная способность доильной установки, голов/час,  $T_{Ц ДУ}$  – продолжительность рабочего цикла доильной установки, с;  $n_{ДУ}$  – число станков на вращающейся платформе доильной установки.

Согласно приведенной циклограмме, продолжительность рабочего цикла доильной установки без использования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени составляет  $t_{ДОЕНИЯ} + (30 - 39)$  секунд, в то время как при использовании робота данный цикл будет равен  $t_{ДОЕНИЯ} + (15 - 24)$ . В этом случае увеличение производительности в процентном соотношении можно оценить при помощи следующего выражения:

$$W = \frac{Q_{ДУ}(t_{ДОЕНИЯ} + (15...24)) - Q_{ДУ}(t_{ДОЕНИЯ} + (30...39))}{Q_{ДУ}(t_{ДОЕНИЯ} + (15...24))} \cdot 100\%, \quad (2.15)$$

где  $W$  – показатель увеличения пропускной способности доильной установки, %;  
 $Q_{ДУ}(t_{ДОЕНИЯ} + (15 - 24))$  – пропускная способность доильной установки при использовании робота;  $Q_{ДУ}(t_{ДОЕНИЯ} + (30 - 39))$  – пропускная способность доильной установки без использования робота.

С учётом выражения (2.14) для случаев доения на карусели с использованием роботизированной установки и без неё, выражение (2.15) можно представить как функцию двух переменных:

$$W(t_{ДОЕНИЯ}, \Delta t) = \left(1 - \frac{\Delta t + t_{ДОЕНИЯ}}{\Delta t + 15 + t_{ДОЕНИЯ}}\right) \cdot 100\%, \quad (2.16)$$

где  $\Delta t$  – интервал времени (15 – 24), определяемый продолжительностью выполнения отдельных операций в роботизированной установке, с.

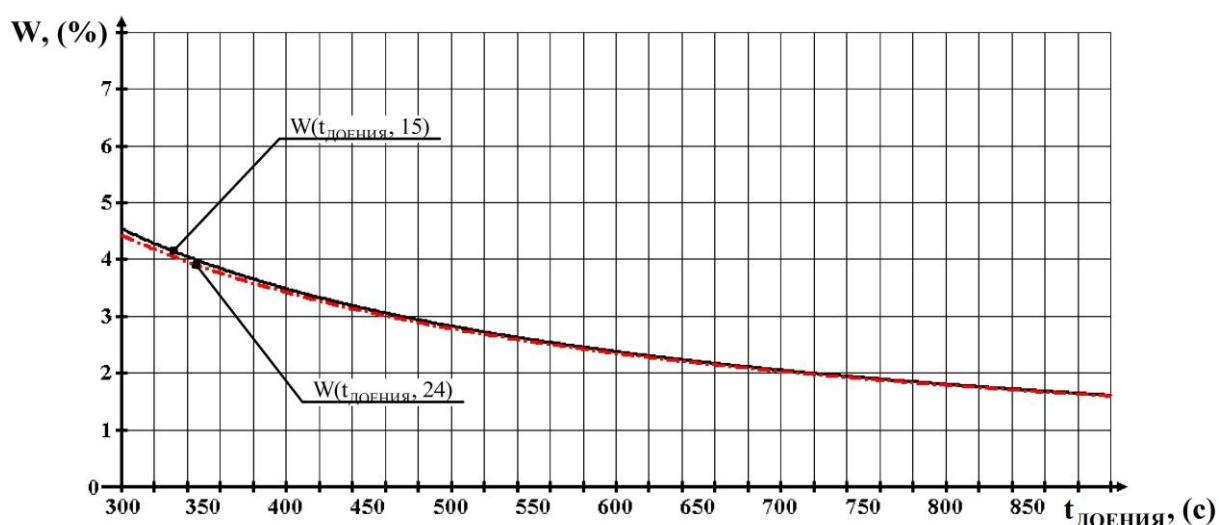


Рисунок 2.8 – График зависимости функции  $W(t_{ДОЕНИЯ}, \Delta t)$ .

На рисунке 2.8 изображен график зависимости увеличения пропускной способности доильной установки при использовании роботизированной установки преддоильной подготовки вымени  $W(t_{ДОЕНИЯ}, \Delta t)$ , при двух значениях временного интервала  $\Delta t$ . Как видно из графика, увеличение пропускной способности сильно зависит от продолжительности нахождения животных на платформе доильной установки и меняется в пределах от 4,5 % до 1,5 % при продолжительности

нахождения коров на платформе до 10 минут. При этом величина  $W$  незначительно меняется при изменении временного отрезка  $\Delta t$ . С увеличением времени доения  $t_{\text{ДОЕНИЯ}}$  графики практически совпадают.

При совместной работе пропускная способность роботизированной установки преддоильной подготовки вымени равняется пропускной способности доильной установки, поэтому, приравняв правые части уравнений (2.13) и (2.14), получаем выражение, позволяющее определить оптимальную продолжительность рабочего цикла доильной установки  $T_{\text{ЦДУ}}$  и необходимое для согласованной работы количество станков роботизированной установки  $n_{\text{РУППВ}}$ :

$$\frac{n_{\text{ДУ}}}{T_{\text{ЦДУ}}} = \frac{n_{\text{РУППВ}}}{T_{\text{ЦРУППВ}}}. \quad (2.17)$$

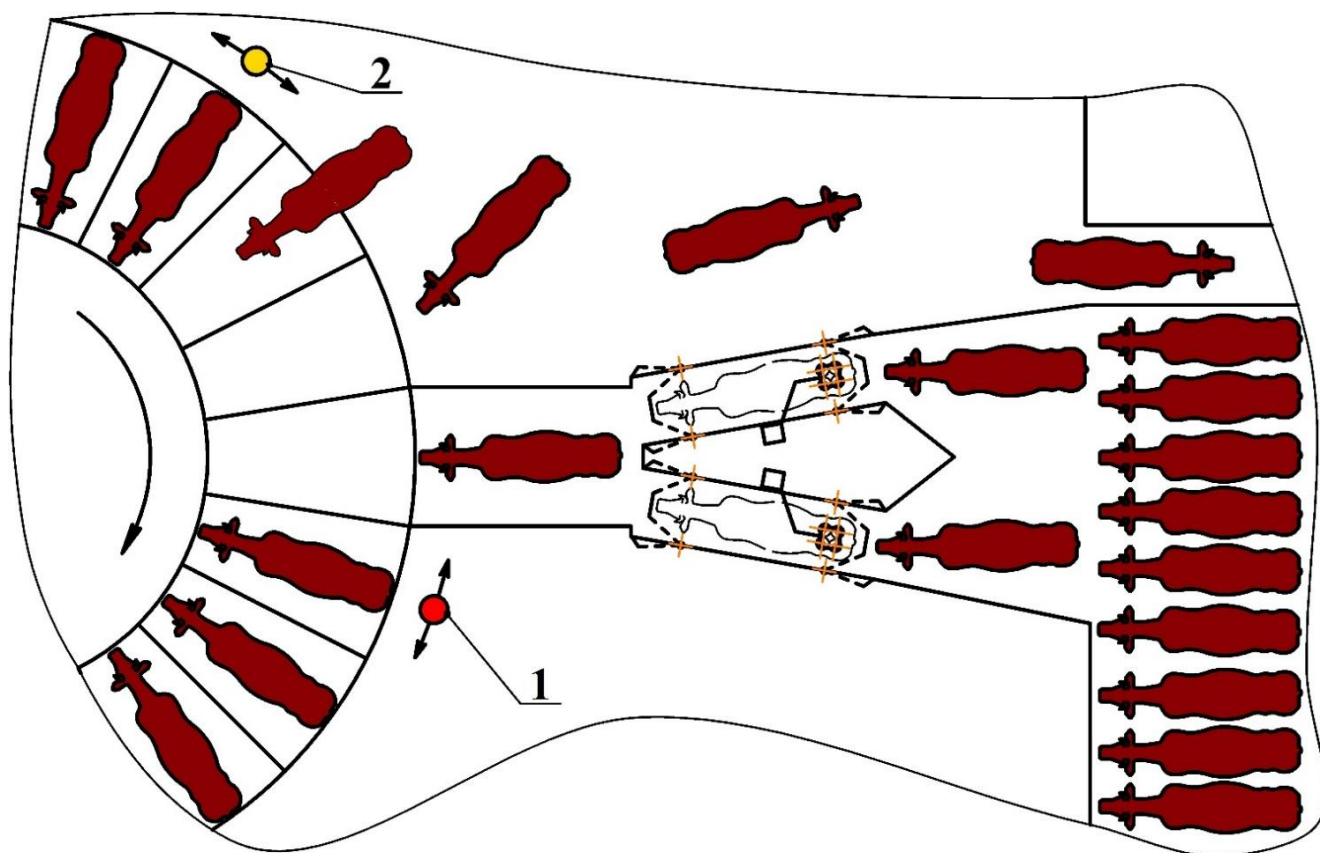
В среднем оборот платформы конвейерно-кольцевой доильной установки составляет порядка 10 минут, хотя различными производителями закладывается время оборота 18 – 20 минут [155, 156]. Исходя из этого, при помощи соотношения (2.17) произведены расчёты необходимого для согласованной работы с доильной установкой числа роботизированных установок преддоильной подготовки вымени в зависимости от продолжительности рабочего цикла доильной установки. Результаты расчётов приведены в таблице 2.2.

Анализируя варианты, приведённые в таблице 2.2, можно сделать вывод о том, что благодаря возможности варьирования продолжительности рабочего цикла обеих установок (в определённых пределах) роботизированная установка преддоильной подготовки вымени способна работать совместно с конвейерно-кольцевыми доильными установками типа «Карусель», оснащёнными различным числом станков на вращающейся платформе. При этом из таблицы 2.2 также следует, что продолжительность рабочего цикла, равная  $T_{\text{ЦРУППВ}} = 34 - 40$  с, является наиболее оптимальной. В этом случае для обслуживания доильной установки потребуется один или два робота для осуществления преддоильной подготовки.

Таблица 2.2 – Число роботизированных установок преддоильной подготовки вымени, необходимых для совместной работы с доильными установками типа «Карусель» с различной продолжительностью рабочего цикла.

| Группы | n <sub>д</sub> = 12 |                    | n <sub>д</sub> = 16 |                    | n <sub>д</sub> = 20 |                    | n <sub>д</sub> = 24 |                    | n <sub>д</sub> = 28 |                    | n <sub>д</sub> = 32 |                    | n <sub>д</sub> = 36 |                    | n <sub>д</sub> = 40 |                    |
|--------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
|        | T <sub>д</sub>      | n <sub>групп</sub> | T <sub>д</sub>      | n <sub>групп</sub> | T <sub>д</sub>      | n <sub>групп</sub> | T <sub>д</sub>      | n <sub>групп</sub> | T <sub>д</sub>      | n <sub>групп</sub> | T <sub>д</sub>      | n <sub>групп</sub> | T <sub>д</sub>      | n <sub>групп</sub> | T <sub>д</sub>      | n <sub>групп</sub> |
| 34     | 360                 | 2                  | 420                 | 2                  | 480                 | 2                  | 540                 | 2                  | 600                 | 2                  | 660                 | 2                  | 780                 | 2                  | 840                 | 2                  |
|        | 420                 | 1                  | 480                 | 2                  | 540                 | 2                  | 600                 | 2                  | 660                 | 2                  | 720                 | 2                  | 840                 | 2                  | 900                 | 2                  |
|        | 480                 | 1                  | 540                 | 2                  | 600                 | 2                  | 660                 | 2                  | 720                 | 2                  | 780                 | 2                  | 900                 | 2                  | 960                 | 2                  |
|        | 540                 | 1                  | 600                 | 1                  | 660                 | 2                  | 720                 | 2                  | 780                 | 2                  | 840                 | 2                  | 960                 | 2                  | 1020                | 2                  |
|        | 600                 | 1                  | 660                 | 1                  | 720                 | 1                  | 780                 | 2                  | 840                 | 2                  | 900                 | 2                  | 1020                | 2                  | 1080                | 2                  |
|        | 660                 | 1                  | 720                 | 1                  | 780                 | 1                  | 840                 | 1                  | 900                 | 2                  | 960                 | 2                  | 1080                | 2                  | 1140                | 2                  |
|        | 720                 | 1                  | 780                 | 1                  | 840                 | 1                  | 900                 | 1                  | 960                 | 1                  | 1020                | 2                  | 1140                | 2                  | 1200                | 2                  |
| 40     | 360                 | 2                  | 420                 | 2                  | 480                 | 2                  | 540                 | 2                  | 600                 | 2                  | 660                 | 2                  | 780                 | 2                  | 840                 | 2                  |
|        | 420                 | 2                  | 480                 | 2                  | 540                 | 2                  | 600                 | 2                  | 660                 | 2                  | 720                 | 2                  | 840                 | 2                  | 900                 | 2                  |
|        | 480                 | 1                  | 540                 | 2                  | 600                 | 2                  | 660                 | 2                  | 720                 | 2                  | 780                 | 2                  | 900                 | 2                  | 960                 | 2                  |
|        | 540                 | 1                  | 600                 | 2                  | 660                 | 2                  | 720                 | 2                  | 780                 | 2                  | 840                 | 2                  | 960                 | 2                  | 1020                | 2                  |
|        | 600                 | 1                  | 660                 | 1                  | 720                 | 2                  | 780                 | 2                  | 840                 | 2                  | 900                 | 2                  | 1020                | 2                  | 1080                | 2                  |
|        | 660                 | 1                  | 720                 | 1                  | 780                 | 2                  | 840                 | 2                  | 900                 | 2                  | 960                 | 2                  | 1080                | 2                  | 1140                | 2                  |
|        | 720                 | 1                  | 780                 | 1                  | 840                 | 1                  | 900                 | 2                  | 960                 | 2                  | 1020                | 2                  | 1140                | 2                  | 1200                | 2                  |
| 46     | 360                 | 2                  | 420                 | 2                  | 480                 | 2                  | 540                 | 3                  | 600                 | 3                  | 660                 | 3                  | 780                 | 3                  | 840                 | 3                  |
|        | 420                 | 2                  | 480                 | 2                  | 540                 | 2                  | 600                 | 2                  | 660                 | 2                  | 720                 | 3                  | 840                 | 2                  | 900                 | 3                  |
|        | 480                 | 2                  | 540                 | 2                  | 600                 | 2                  | 660                 | 2                  | 720                 | 2                  | 780                 | 2                  | 900                 | 2                  | 960                 | 2                  |
|        | 540                 | 2                  | 600                 | 2                  | 660                 | 2                  | 720                 | 2                  | 780                 | 2                  | 840                 | 2                  | 960                 | 2                  | 1020                | 2                  |
|        | 600                 | 1                  | 660                 | 2                  | 720                 | 2                  | 780                 | 2                  | 840                 | 2                  | 900                 | 2                  | 1020                | 2                  | 1080                | 2                  |
|        | 660                 | 1                  | 720                 | 2                  | 780                 | 2                  | 840                 | 2                  | 900                 | 2                  | 960                 | 2                  | 1080                | 2                  | 1140                | 2                  |
|        | 720                 | 1                  | 780                 | 1                  | 840                 | 2                  | 900                 | 2                  | 960                 | 2                  | 1020                | 2                  | 1140                | 2                  | 1200                | 2                  |

Следует также отметить, что с ростом числа станков доильной установки для согласованной работы необходимо увеличивать продолжительность рабочего цикла доильной установки  $T_{ц\ ду}$  и числа роботизированных установок преддоильной подготовки вымени. В связи с этим возникает проблема их размещения в доильном зале. Поэтому наиболее оптимально использовать роботизированную установку преддоильной подготовки вымени с доильными установками, на платформе которых располагается до 40 станков.



1 – первый оператор доильного зала (вытирает вымя насухо и подключает к соскам вымени доильные стаканы); 2- второй оператор доильного зала (контролирует процесс доения и осуществляет обработку вымени после доения)

Рисунок 2.9 – Доильный зал с двумя роботизированными установками преддоильной подготовки вымени.

На рисунке 2.5 приведен доильный зал с одной роботизированной установкой преддоильной подготовки, а на рисунке 2.9 приведен доильный зал с

двумя такими роботами. При этом в обоих случаях для обслуживания коров в доильном зале может быть использовано два оператора. Первый оператор осуществляет контроль за качеством выполнения преддоильной подготовки роботизированной установкой, вытирает вымя насухо, сдаивает первые струи молока и подключает доильные стаканы. Второй оператор контролирует процесс доения и осуществляет обработку вымени после доения.

### **2.3. Кинематическое исследование**

Для обоснования длин рычагов манипулятора роботизированной установки преддоильной подготовки вымени было проведено кинематическое исследование, основанное на исследовании кинематических схем перемещения.

При проведении исследования были приняты следующие обозначения:

- 1) грузовой рычаг – это расстояние между осевыми линиями валов шаговых электродвигателей;
- 2) вспомогательный рычаг – расстояние между консольным участком рычага и осевой линией вала электродвигателя, на котором установлен сам рычаг (рисунок 2.3).

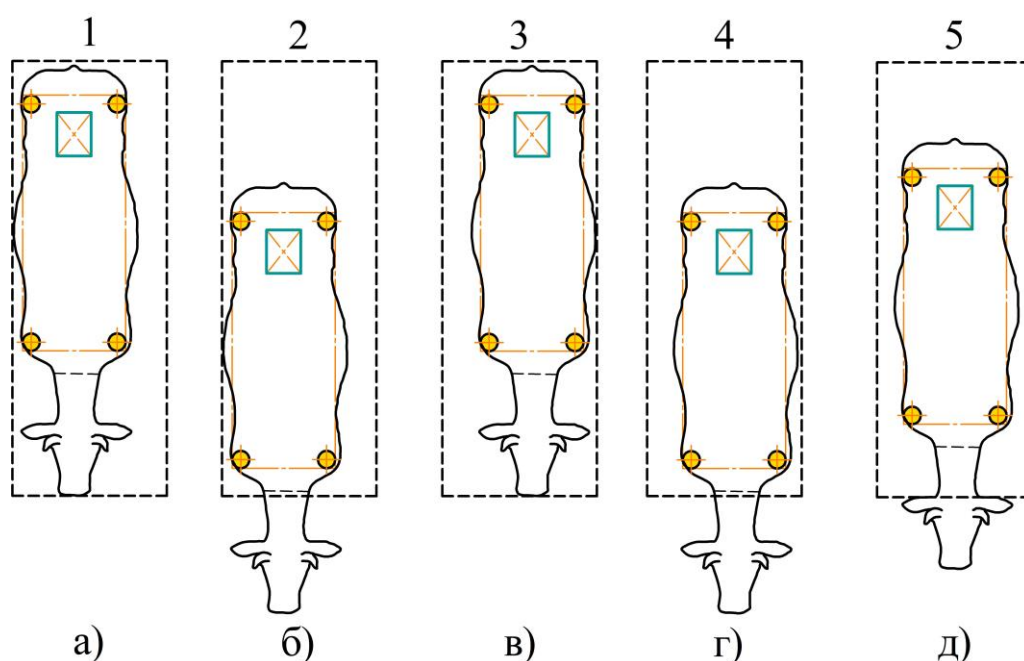
Проведение операции по преддоильной подготовке вымени должно обеспечиваться роботизированной установкой, осуществляющей минимальное число движений – перемещений рычагов манипулятора в пространстве. В разработанной схеме необходимое положение рабочего органа в пространстве (позиционирование) осуществляется за счет следующих перемещений:

- 1) относительное движение вспомогательного рычага – вращение вокруг оси, расположенной на грузовом рычаге;
- 2) переносное движение рабочего органа вместе с грузовым рычагом – вращение вокруг оси, расположенной на подвижной платформе;
- 3) переносное движение, осуществляемое при поступательном перемещении подвижной платформы за счет вращения винта шариковой винтовой передачи.

Таким образом, манипулятор лабораторной установки обеспечивает три степени свободы перемещаемому рабочему органу, и такая компоновка узлов

позволила получить простую конструкцию с низкой металлоёмкостью.

Для определения длин грузового и вспомогательного рычагов манипулятора предварительно были определены примерные габаритные размеры станка. Для этого были исследованы среднестатистические размеры коров, что позволило определить рациональные размеры станка для комфортного размещения коровы и беспрепятственного проведения преддоильной подготовки. Его длина должна составлять 2500 мм, а ширина – 900 мм. На кинематических схемах (рисунки 2.10, 2.11, 2.12, 2.13) контур станка показан штриховой линией [157, 158].



а) положение 1; б) положение 2; в) положение 3; г) положение 4; д) положение 5

Рисунок 2.10 – Рассматриваемые положения коровы в станке

Для определения оптимальных длин рычагов был использован графический метод с применением горизонтальной плоскости проекций (вид сверху), на которой размещены следующие элементы: манипулятор и контур станка с помещенной в него коровой (показана штрихпунктирной линией); на контуре коровы схематично показаны положения ног и вымени – выделены для наглядности жирной линией. Для повышения достоверности результатов исследований кинематические схемы вычерчены в натуральную величину, в масштабе 1:1.

Для подведения рабочего органа в рабочую область необходимо выполнение следующих условий:

- 1) консольный участок вспомогательного рычага должен доставать до середины вымени, которая схематично отмечена скрещивающимися линиями, заключенными в прямоугольный контур;
- 2) во время движения рычага манипулятора не должны задевать ноги коровы.

Для определения расположения манипулятора относительно станка были рассмотрены пять положений коровы в станке, показанных на рисунке 2.10.

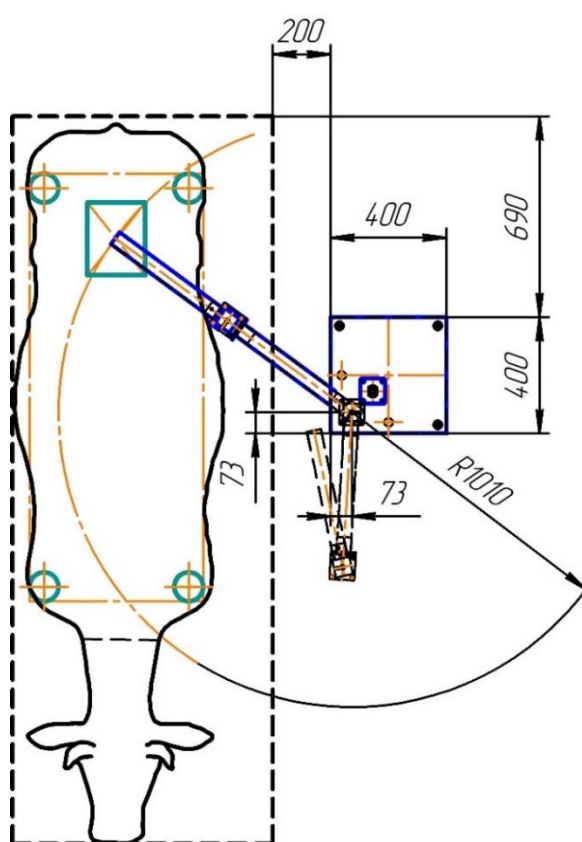


Рисунок 2.11 – Схема к определению геометрических размеров и положения манипулятора

При расположении манипулятора справа от станка крайним положением коровы в станке будет положение 1 (рисунок 2.10а). Выбранные шаговые двигатели имеют ограниченные возможности по развиваемому крутящему моменту. На основании этого принимаем суммарную длину рычагов манипулятора равную 1010 мм. Ось манипулятора разместим на расстоянии 73 мм от ребра

подвижной пластины (рисунок 2.11). Очертив дугой окружности радиус вращения консольного участка манипулятора, равный длине 1010 мм, когда оси грузового и вспомогательного рычагов выстраиваются в одну линию, и перемещая манипулятор вдоль правой стороны станка, определяем оптимальное положение, которое составляет 690 мм по длине и 200 мм по ширине от дальнего правого угла станка.

При проведении кинематических исследований расположение манипулятора относительно станка неизменно. С целью повышения маневренности манипулятора были рассмотрены три варианта исполнения с различными длинами рычагов (при этом суммарная длина рычагов не изменяется).

Первый вариант (вариант А). Длина грузового рычага – 530 мм, длина вспомогательного – 480 мм, т.е. длина грузового рычага на 10% превышает длину вспомогательного. В данном варианте длина вспомогательного рычага максимальная, что обеспечит максимальную окружную скорость перемещения его консольного участка, на котором расположен рабочий орган.

Второй вариант (вариант Б). Длина грузового рычага – 630 мм, длина вспомогательного – 380 мм. Такая длина рычагов выбрана с учетом следующих соотношений: 5 долей от суммарной длины рычагов – длина вспомогательного рычага; 8 долей от суммарной длины рычагов – длина грузового рычага. В итоге получаем соотношение 5/8. Длина грузового рычага на 65% больше длины вспомогательного.

Третий вариант (вариант В). Длина грузового рычага – 750 мм – максимально допустимая, длина вспомогательного – 260 мм, что на 288% меньше длины грузового.

Для того чтобы показать способ определения углов поворота рычагов, воспользуемся схемой на рисунке 2.12. На рисунке 2.12а показана схема по определению углов поворота грузового рычага. В качестве начального выберем положение, отмеченное на схеме как Н.П. Отсчет величины углов поворота ведем в направлении, указанном дуговой стрелкой (по ходу часовой стрелки). При определении углов поворота вспомогательного рычага (рисунок 2.12б) в качестве

начального будем использовать положение, при котором осевые линии обоих рычагов совпадают, независимо от положения грузового рычага.

Результаты кинематических исследований установки графическим способом представлены на рисунке 33. Как было описано выше, рассмотрены три варианта исполнения манипулятора с различными длинами рычагов для пяти положений коровы в станке. Положения коровы на схемах отмечены цифрами от 1 до 5, а варианты исполнений манипулятора буквами А, Б, В, которые показаны в виде нижнего индекса цифры, соответствующей положению коровы. Например, обозначение  $2_B$  принадлежит второму положению коровы в станке и рассматриваемому манипулятору с длинами рычагов, соответствующими второму варианту исполнения.

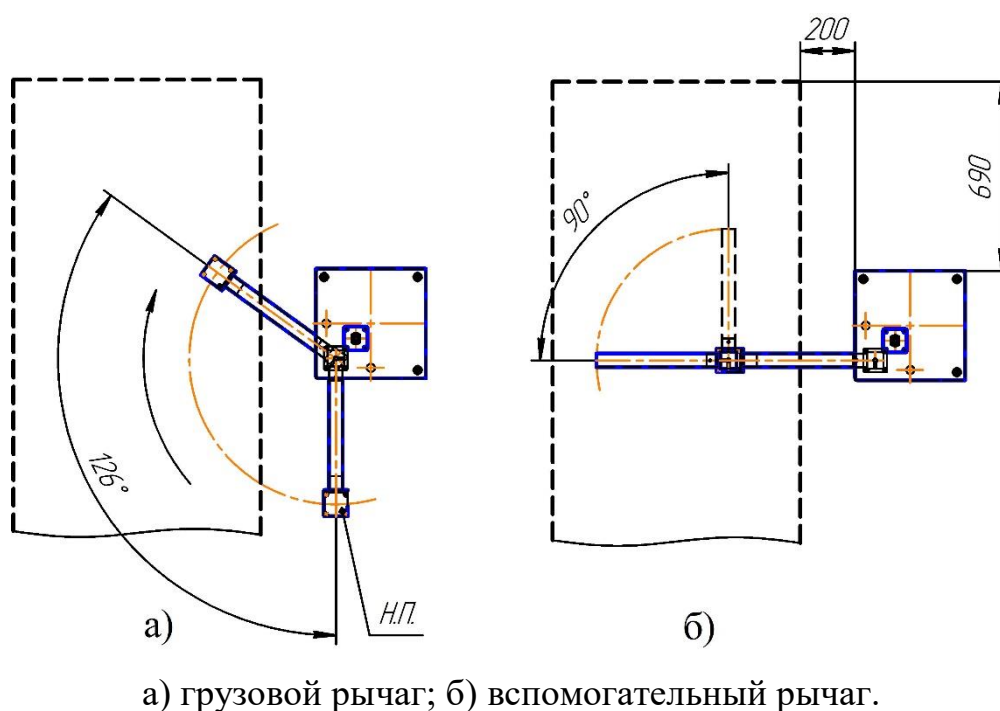
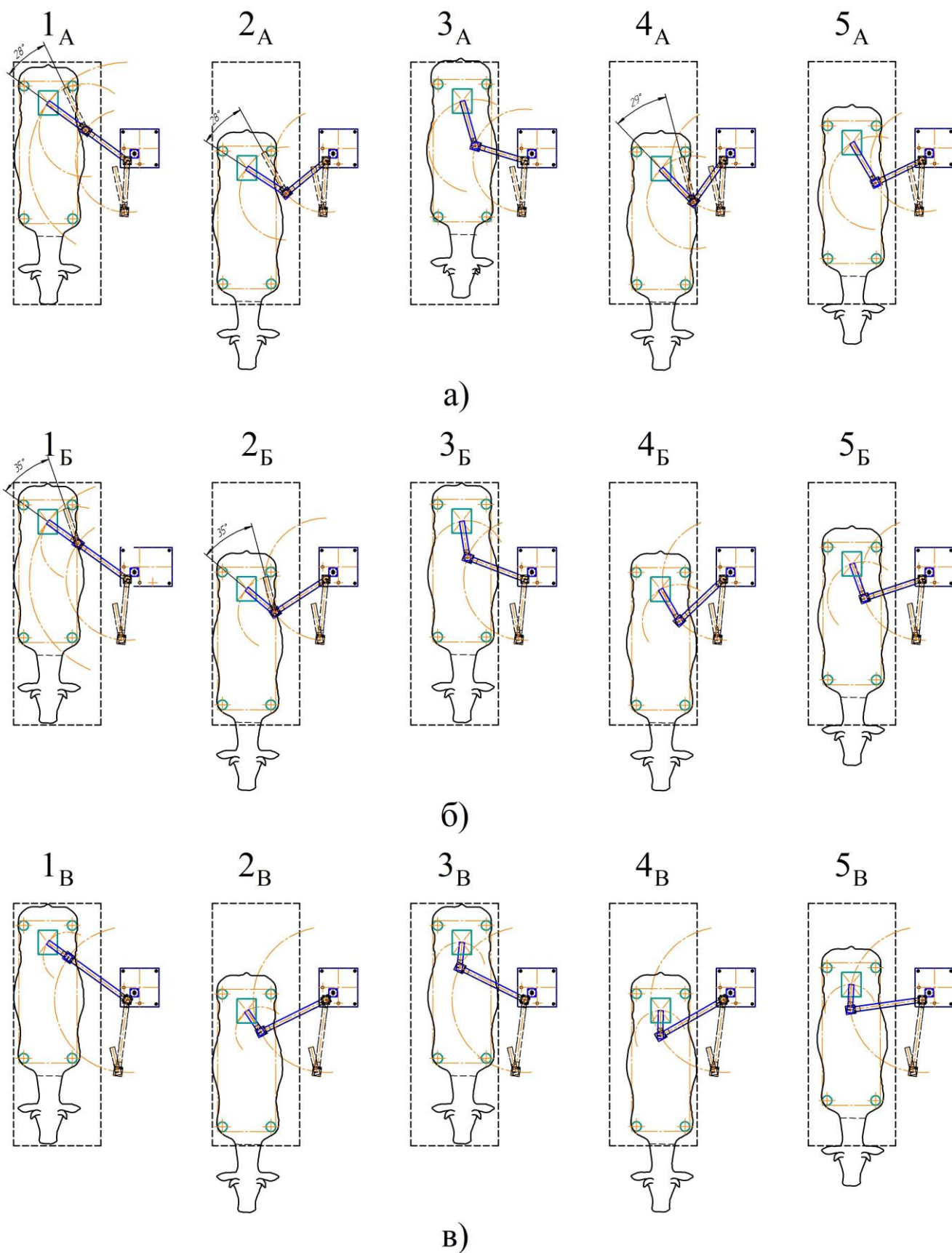


Рисунок 2.12 – Схема к определению углов поворота рычагов.

На схемах дугowymi штрихпунктирными линиями показаны траектории движения оси, на которой шарнирно крепится вспомогательный рычаг и траектории движения консольного участка вспомогательного рычага. Пунктирными линиями показаны крайние положения вспомогательного рычага, при которых возможны случаи их встречи с задними ногами животного.



а) первый вариант исполнения (вариант А); б) второй вариант исполнения (вариант Б); в) третий вариант исполнения (вариант В).

Рисунок 2.13 – Результаты кинематических исследований установки.

Представленные на рисунке 2.13 схемы позволяют определить углы поворота рычагов манипулятора (положения рычагов), когда консольный участок вспомогательного рычага занимает положение строго под серединой вымени.

Результаты замеров углов положений рычагов манипулятора представлены в таблице 2.3. При анализе вариантов исполнения манипулятора в таблицу 1 включим такой показатель, как критический угол поворота вспомогательного рычага, при котором происходит его встреча с задней ногой коровы.

Таблица 2.3 – Результаты замеров углов положений рычагов.

| Наименование угла                                    | Номер положения коровы в станке |        |             |        |             |
|------------------------------------------------------|---------------------------------|--------|-------------|--------|-------------|
|                                                      | 1                               | 2      | 3           | 4      | 5           |
| Первый вариант (вариант А)                           |                                 |        |             |        |             |
| Угол поворота грузового рычага                       | 126°                            | 50°    | 106°        | 35°    | 65°         |
| Угол поворота вспомогательного рычага                | 0°                              | 72°    | 57,4°       | 100,5° | 85,4        |
| Критический угол поворота<br>вспомогательного рычага | 28°                             | 100,7° | отсутствует | 130°   | отсутствует |
| Второй вариант (вариант Б)                           |                                 |        |             |        |             |
| Угол поворота грузового рычага                       | 125,8°                          | 56,8°  | 110,6°      | 46,5°  | 71,5°       |
| Угол поворота вспомогательного рычага                | 0°                              | 73,2°  | 60,5°       | 103,4  | 89°         |
| Критический угол поворота<br>вспомогательного рычага | 35°                             | 108°   | отсутствует |        |             |
| Третий вариант (вариант В)                           |                                 |        |             |        |             |
| Угол поворота грузового рычага                       | 125,9°                          | 63,8°  | 116,3°      | 60,3°  | 82°         |
| Угол поворота вспомогательного рычага                | 0°                              | 82,2°  | 69,2        | 120,8° | 100,7°      |
| Критический угол поворота<br>вспомогательного рычага | отсутствует                     |        |             |        |             |

Анализируя схемы на рисунке 2.13 и данные таблицы 2.9, можно отметить следующее. В первом варианте в положения 3<sub>А</sub> и 5<sub>А</sub> отсутствуют критические углы поворота вспомогательного рычага; во втором варианте критические углы поворота отсутствуют в положениях 3<sub>Б</sub>, 4<sub>Б</sub> и 5<sub>Б</sub>; в третьем варианте углы вообще отсутствуют. Отсутствие критических углов поворота связано с тем, что в третьем варианте исполнения длина вспомогательного рычага наименьшая. Здесь недостатком является то, что при позиционировании манипулятора грузовому рычагу приходится делать больше перемещений и на больший угол. При переводе манипулятора из рабочих положений 1<sub>В</sub>, 3<sub>В</sub> в положение ожидания возможна встреча с передней ногой коровы. В остальных двух вариантах такого не

наблюдается. Если за базовый принять первый вариант исполнения манипулятора (вариант А), то наблюдается увеличение критических углов поворота вспомогательных рычагов у положения 1<sub>Б</sub> на 25% по сравнению с положением 1<sub>А</sub>, у положения 2<sub>Б</sub> – на 7% по сравнению с положением 2<sub>А</sub>. Это связано также с увеличением длины грузового рычага. Для того, чтобы произошла встреча с задней ногой коровы при уменьшении длины вспомогательного рычага (второй вариант по сравнению с первым), нужно повернуть его на больший угол. В третьем варианте такая встреча вообще не наблюдается.

Рассмотрим изменение углов поворота грузового и вспомогательного рычага, выбрав за базовый первый вариант исполнения (вариант А).

Для грузового рычага в первом варианте исполнения максимальный угол поворота составляет 126°, минимальный – 35°. Разница составляет 91°. Во втором варианте исполнения разница между максимальным и минимальным углами поворота – 79,3°; в третьем варианте исполнения эта разница уже 65,6°. Снижение разницы углов поворота для второго варианта по сравнению с первым составляет почти 15%, а третьего с первым – 38,7%. Данные значения говорят о том, что во втором и третьем вариантах для позиционирования грузового рычага понадобится меньше времени и затрат энергии на перемещение.

Таблица 2.4 – Относительные изменения углов поворота грузового рычага.

| Наименование величины                    | Номер положения коровы в станке   |      |     |      |      |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------|-----|------|------|
|                                          | 1                                 | 2    | 3   | 4    | 5    |
| Относительное изменение угла поворота, % | <b>Второй вариант (вариант Б)</b> |      |     |      |      |
|                                          | 0,16                              | 13,6 | 4,3 | 32,9 | 10   |
|                                          | <b>Третий вариант (вариант В)</b> |      |     |      |      |
|                                          | 0,08                              | 27,6 | 9,7 | 72,3 | 26,2 |

Найдем относительные изменения углов поворота грузового рычага для второго и третьего вариантов по отношению к первому (таблица 2.4).

Анализируя данные таблицы 2.4, делаем вывод о том, что во всех положениях, за исключением 1-го, в третьем варианте исполнения двукратное увеличение относительного изменения углов поворота грузового рычага по

сравнению со вторым вариантом исполнения. Отсюда можно сделать промежуточный вывод о целесообразности применения в конструкции манипулятора второго варианта исполнения.

По аналогии определим разности между максимальными и минимальными значениями углов поворота для вспомогательного рычага. В первом варианте разница составляет  $100,5^\circ$ , во втором –  $103,4^\circ$ , в третьем –  $120,8^\circ$ . Изменение угла поворота во втором варианте по сравнению с первым составляет почти 3%, а в третьем по сравнению с первым – 20%. Для более ясного представления изменения углов поворота вспомогательного рычага во втором и третьем вариантах по отношению к первому варианту определим относительные изменения углов поворота рычага, а результаты расчетов занесем в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Относительные изменения углов поворота вспомогательного рычага.

| Наименование величины                    | Номер положения коровы в станке   |      |      |      |      |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------|------|------|------|
|                                          | 1                                 | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Относительное изменение угла поворота, % | <b>Второй вариант (вариант Б)</b> |      |      |      |      |
|                                          | –                                 | 1,7  | 5,4  | 2,9  | 4,2  |
|                                          | <b>Третий вариант (вариант В)</b> |      |      |      |      |
|                                          | –                                 | 14,2 | 20,6 | 20,2 | 17,9 |

Анализируя данные таблицы 2.5, делаем следующие выводы. Во втором варианте исполнения наименьшая разница составляет 1,7%, наибольшая – 5,4%. В третьем варианте исполнения наименьшая разница уже 14,2%, а наибольшая – 20,6%. Здесь мы видим многократное увеличение величины относительных изменений углов поворота вспомогательного рычага в третьем варианте исполнения по сравнению со вторым вариантом. Причем максимальное относительное изменение угла поворота рычага между вторым и первым вариантами немного превышает 5%, что является незначительным отклонением, и говорит в пользу применения второго варианта исполнения (варианта Б).

Таким образом, результаты кинематического анализа позволяют сделать вывод о том, что наиболее предпочтительным в использовании является второй

вариант исполнения длин рычагов манипулятора (вариант Б), для которого длина грузового рычага составляет 630 мм, а вспомогательного рычага – 380 мм.

## **2.4. Теоретическое исследование перемещения рычагов манипулятора лабораторной установки**

Конструкция манипулятора роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров в качестве привода предполагает использование шаговых двигателей (рисунок 2.3). Данные двигатели работают в импульсном режиме, а их вал совершает угловые перемещения, кратные некоторой угловой величине  $\Delta$ , называемой шагом. Поэтому для управления манипулятором необходимо связать координаты точки, в которую перемещается рабочий орган, с количеством шагов каждого двигателя, совершив которые, моторы сообщат необходимые угловые перемещения рычагам манипулятора.

Следует отметить, что в данном исследовании не рассматривается подробная конструкция рабочего органа, который имеет некоторые габаритные размеры. При этом центр рабочего органа может быть совмещен с концом вспомогательного рычага (рисунок 2.11), а может являться его продолжением (рисунок 2.3). В первом случае рабочий орган необходимо подводить под центр вымени, а во втором необходимо учитывать его габаритные размеры. Поэтому рассмотрим задачу для определения количества шагов, которые необходимо совершить шаговым двигателям для совмещения конца вспомогательного рычага с точкой, имеющей координаты  $N(x_{мз}, y_{мз}, z_{мз})$ , рассчитанные при помощи машинного зрения системы позиционирования с учётом габаритов рабочего органа.

Перемещение рабочего органа в плоскости обеспечивает вращение одновременно двух шаговых двигателей (поз. 8 и 10, рисунок 2.3), а перемещение вдоль вертикальной оси обеспечивается отдельным двигателем за счет шариковой винтовой передачи (поз. 17 рисунок 2.3). Обозначим величину шага каждого двигателя как  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  соответственно. При этом рассмотрим общий случай, когда каждый двигатель оснащен редуктором с передаточным числом  $n_1, n_2$  и  $n_3$ . Если в данном узле редуктор отсутствует, то передаточное число будет равно 1.

Перемещение рычагов рассмотрим в системе координат, начало которой совмещено с основанием грузового рычага (рисунок 2.14). Длину грузового рычага манипулятора обозначим как  $\ell_1 = 630$  мм, а вспомогательного  $\ell_2 = 380$  мм.

Пусть в начальный момент времени рычаги занимают положение, определяемое векторами  $\vec{\ell}_{01}$  и  $\vec{\ell}_{02}$ , направленными вдоль соответствующего рычага (рисунок 2.14). При этом модули данных векторов соответствуют длинам рычагов манипулятора, т.е.  $|\vec{\ell}_{01}| = \ell_1$  и  $|\vec{\ell}_{02}| = \ell_2$ . Угол поворота грузового рычага будем отсчитывать от положительного направления оси  $x$ , и в начальный момент времени он равен  $\varphi_{01}$ . Поворот вспомогательного рычага будем отсчитывать от оси грузового рычага. В начальный момент времени он равен  $\varphi_{02}$  (рисунок 2.14). В этом случае справедливо векторное равенство следующего вида:

$$\vec{r}_0 = \vec{\ell}_{01} + \vec{\ell}_{02}, \quad (2.18)$$

где  $\vec{r}_0$  – радиус-вектор, проведенный в конец вспомогательного рычага манипулятора в начальный момент времени.

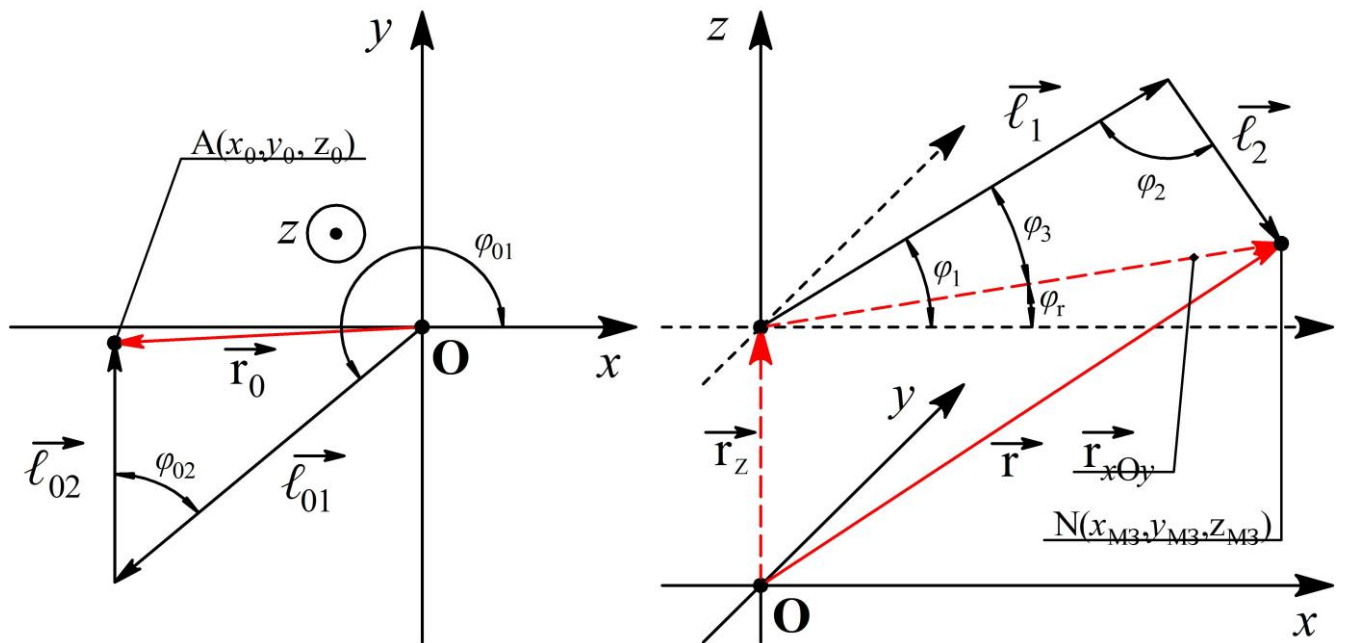


Рисунок 2.14 – Положение рычагов манипулятора в начальный момент времени и при наведении в точку  $N$ .

Спроектировав уравнение (2.18) на ось  $x$  и  $y$  системы координат  $xOy$ , получим координаты, определяющие положение точки  $A(x_0, y_0, z_0)$ , соответствующей концу вспомогательного рычага, в плоскости  $xOy$ :

$$\begin{cases} x_0 = \ell_1 \cdot \cos(\varphi_{01}) + \ell_2 \cdot \cos(\varphi_{01} + \varphi_{02} - \pi), \\ y_0 = \ell_1 \cdot \sin(\varphi_{01}) + \ell_2 \cdot \sin(\varphi_{01} + \varphi_{02} - \pi). \end{cases} \quad (2.19)$$

В процессе позиционирования первый шаговый двигатель совершает некоторое количество шагов, равное  $k_1$ , а второй шаговый двигатель –  $k_2$  шагов. Поэтому рычаги манипулятора совершают угловые перемещения и занимают положения, определяемые векторами  $\vec{\ell}_1$  и  $\vec{\ell}_2$  (рисунок 2.14). Меняет свое положение и радиус-вектор, проведенный в конец вспомогательного рычага. В этом случае начальные углы  $\varphi_{01}$  и  $\varphi_{02}$  изменяют свои значения за счет дополнительного углового приращения, и их величина определяется выражениями:

$$\varphi_1 = \varphi_{01} - \Delta_1 \cdot n_1 \cdot k_1, \quad (2.20)$$

$$\varphi_2 = \varphi_{02} - \Delta_2 \cdot n_2 \cdot k_2. \quad (2.21)$$

Выражения (2.20) и (2.21) составлены с учетом принятых правил знаков:

- 1)  $k_1 > 0$  – соответствует вращению рычага  $\ell_1$  по часовой стрелке,
- 2)  $k_1 < 0$  – соответствует вращению рычага  $\ell_1$  против часовой стрелки,
- 3)  $k_2 > 0$  – соответствует вращению рычага  $\ell_2$  по часовой стрелке,
- 4)  $k_2 < 0$  – соответствует вращению рычага  $\ell_2$  против часовой стрелки.

Составим теорему косинусов для векторного треугольника (рисунок 2.14), образованного векторами  $\vec{\ell}_1$  и  $\vec{\ell}_2$ , а также вектором  $\vec{r_{xOy}}$ , который является проекцией вектора  $\vec{r}$  на плоскость  $xOy$ :

$$|\vec{r_{xOy}}|^2 = |\vec{\ell}_1|^2 + |\vec{\ell}_2|^2 - 2 \cdot |\vec{\ell}_1| \cdot |\vec{\ell}_2| \cdot \cos(\varphi_2). \quad (2.22)$$

Преобразуем выражение (2.22) с учетом того, что модули векторов  $\vec{\ell}_1$  и  $\vec{\ell}_2$

соответствуют длинам рычагов, то есть  $|\vec{\ell}_1| = \ell_1$  и  $|\vec{\ell}_2| = \ell_2$ , а также с учетом равенства (2.21):

$$|\vec{r}_{xOy}|^2 = (\ell_1)^2 + (\ell_2)^2 - 2 \cdot \ell_1 \cdot \ell_2 \cdot \cos(\varphi_{02} - \Delta_2 \cdot n_2 \cdot k_2). \quad (2.23)$$

Полученное выражение (2.23) позволяет определить количество шагов второго двигателя  $k_2$  для наведения манипулятора в заданную точку  $N$ :

$$k_2 = \frac{1}{\Delta_2 \cdot n_2} \cdot \left( \varphi_{02} - \arccos \left( \frac{(\ell_1)^2 + (\ell_2)^2 - |\vec{r}_{xOy}|^2}{2 \cdot \ell_1 \cdot \ell_2} \right) \right). \quad (2.24)$$

Модуль вектора  $\vec{r}_{xOy}$  найдем исходя из координат точки наведения  $N(x_{M3}, y_{M3}, z_{M3})$  (рисунок 2.14):

$$|\vec{r}_{xOy}| = \sqrt{(x_{M3})^2 + (y_{M3})^2}. \quad (2.25)$$

Необходимое количество шагов первого привода также определим при помощи теоремы косинусов, которую составим для того же векторного треугольника, но относительно угла  $\varphi_3$  (рисунок 2.14):

$$(\ell_2)^2 = (\ell_1)^2 + |\vec{r}_{xOy}|^2 - 2 \cdot \ell_1 \cdot |\vec{r}_{xOy}| \cdot \cos(\varphi_3). \quad (2.26)$$

Из рисунка 2.14 следует, что величину угла  $\varphi_3$  можно определить как разницу двух углов:

$$\varphi_3 = \varphi_1 - \varphi_r, \quad (2.27)$$

где  $\varphi_r$  – угол между положительным направлением оси  $x$  и вектором  $\vec{r}_{xOy}$ .

С учетом выражения (2.27), а также (2.20), выражение (2.26) принимает вид:

$$(\ell_2)^2 = (\ell_1)^2 + |\vec{r_{xOy}}|^2 - 2 \cdot \ell_1 \cdot |\vec{r_{xOy}}| \cdot \cos(\varphi_{01} - \Delta_1 \cdot n_1 \cdot k_1 - \varphi_r). \quad (2.28)$$

Полученное выражение (2.28) позволяет выразить количество шагов первого двигателя  $k_1$ :

$$k_1 = \frac{1}{\Delta_1 \cdot n_1} \cdot \left( \varphi_{01} - \varphi_r - \arccos \left( \frac{(\ell_1)^2 - (\ell_2)^2 + |\vec{r_{xOy}}|^2}{2 \cdot \ell_1 \cdot |\vec{r_{xOy}}|} \right) \right). \quad (2.29)$$

Величину угла  $\varphi_r$  определим исходя из координат вектора  $r_{xOy}$ , которые совпадают с координатами точки  $N$ , относительно осей  $x$  и  $y$ :

$$\varphi_r = \begin{cases} \arccos \left( \frac{x_{M3}}{|\vec{r_{xOy}}|} \right), & \text{при } y \geq 0 \\ 2 \cdot \pi - \arccos \left( \frac{x_{M3}}{|\vec{r_{xOy}}|} \right), & \text{при } y < 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

Объединяя уравнения (2.29) и (2.30), окончательно получаем число шагов, которое должен совершить первый шаговый двигатель для наведения в расчётную точку:

$$k_1 = \begin{cases} \frac{1}{\Delta_1 \cdot n_1} \cdot \left( \varphi_{01} - \arccos \left( \frac{x_{M3}}{|\vec{r_{xOy}}|} \right) - \arccos \left( \frac{(\ell_1)^2 - (\ell_2)^2 + |\vec{r_{xOy}}|^2}{2 \cdot \ell_1 \cdot |\vec{r_{xOy}}|} \right) \right), & \text{при } y \geq 0 \\ \frac{1}{\Delta_1 \cdot n_1} \cdot \left( \varphi_{01} - 2 \cdot \pi + \arccos \left( \frac{x_{M3}}{|\vec{r_{xOy}}|} \right) - \arccos \left( \frac{(\ell_1)^2 - (\ell_2)^2 + |\vec{r_{xOy}}|^2}{2 \cdot \ell_1 \cdot |\vec{r_{xOy}}|} \right) \right), & \text{при } y < 0 \end{cases} \quad (2.31)$$

При вертикальном позиционировании необходимое число шагов  $k_3$  третьего шагового двигателя определяется шагом шариковой винтовой передачи, которую обозначим как  $H_{ШВП}$ , и вертикальным перемещением, которое равно проекции радиус-вектора  $\vec{r}$  на ось  $z$ . Поэтому справедливо равенство:

$$r_z = H_{ШВП} \cdot N_3, \quad (2.32)$$

где  $r_z$  – проекция радиус-вектора  $\vec{r}$  на ось  $z$  системы координат  $xOy$ ;  $N_3$  – число оборотов третьего шагового двигателя.

Необходимое число оборотов шагового двигателя найдем исходя из величины шага  $\Delta_3$  двигателя и передаточного числа  $n_3$  редуктора:

$$N_3 = \frac{\Delta_3 \cdot k_3 \cdot n_3}{360}. \quad (2.33)$$

Проекция радиус-вектора на ось  $z$  системы координат  $xOy$  определяется как разность координат, т.е.:

$$r_z = z_{M3} - z_0, \quad (2.34)$$

где  $z_0$  – координата конца вспомогательного рычага относительно оси  $z$  в начальный момент времени.

Если в начальный момент времени рычаги манипулятора находятся в плоскости  $xOy$ , то координата  $z_0$  равна нулю, а значит:

$$r_z = z_{M3}, \quad (2.35)$$

Объединяя (2.32), (2.33) и (2.35), получаем выражение, определяющее число шагов третьего шагового двигателя, необходимое для вертикального позиционирования:

$$k_3 = \frac{z_{M3} \cdot 360}{H_{ШВП} \cdot \Delta_3 \cdot n_3}. \quad (2.36)$$

Выражения (2.31) и (2.24) для расчёта числа шагов шаговых двигателей, обеспечивающих позиционирование в плоскости, получены по отношению к системе координат, связанной с манипулятором. Они могут быть преобразованы и

обобщены на случай, когда система координат связана со станком роботизированной установки преддоильной подготовки вымени.

Для этого необходимо учесть положение манипулятора по отношению к станку установки, которое можно задать радиус-вектором  $\overrightarrow{r_{МАН}}$  в системе координат  $x_{стан}O_{стан}y_{стан}$  (рисунок 2.15). Координаты этого вектора равны координатам точки О, являющейся основанием грузового рычага манипулятора, в системе координат  $x_{стан}O_{стан}y_{стан}$ . Эти координаты можно определить исходя из проведенного кинематического исследования. Согласно рисунку 2.11, получаем:

$$\begin{cases} x_O = 148,3 \text{ см} \\ y_O = -27,3 \text{ см} \end{cases} \Rightarrow \overrightarrow{r_{МАН}} = (x_O; y_O; z_O) = (148,3; -27,3; z_O). \quad (2.37)$$

Пусть при помощи машинного зрения системы позиционирования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени в системе координат  $x_{стан}O_{стан}y_{стан}$ , связанной со станком, определена точка  $M(x, y, z)$  для наведения манипулятора. Тогда справедливо векторное равенство (рисунок 2.15):

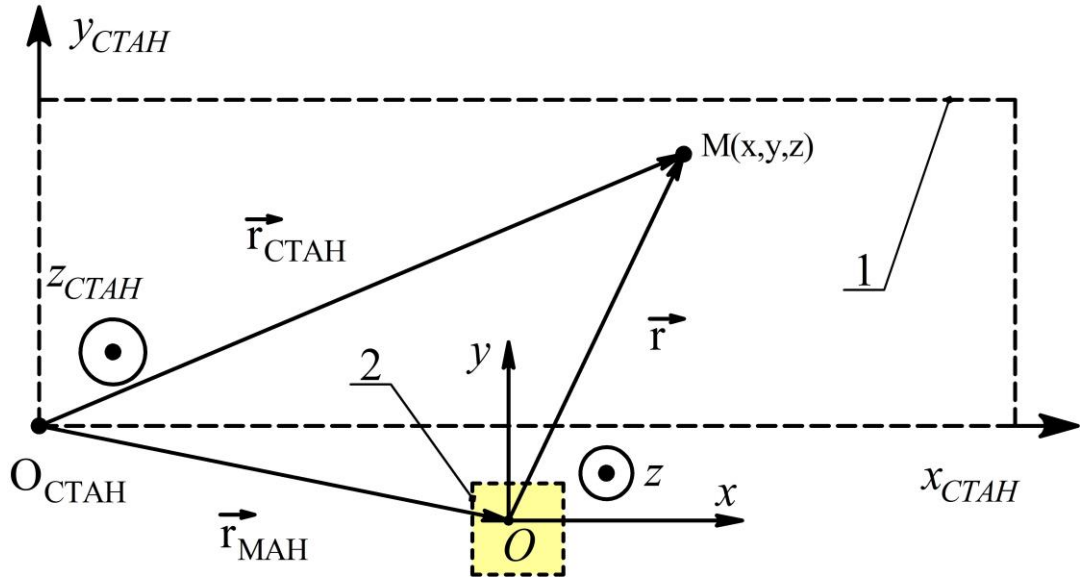
$$\overrightarrow{r_{СТАН}} = \overrightarrow{r_{МАН}} + \vec{r}, \quad (2.38)$$

где  $\overrightarrow{r_{СТАН}}$  – радиус-вектор, определяющий положение точки  $M$  в системе координат  $x_{стан}O_{стан}y_{стан}$ ;  $\overrightarrow{r_{МАН}}$  – радиус-вектор, определяющий положение манипулятора в системе координат  $x_{стан}O_{стан}y_{стан}$ ,  $\vec{r}$  – радиус-вектор, определяющий положение точки  $N$  в системе координат  $xOy$ .

Спроектируем уравнение (2.38) на ось  $x_{стан}$  и  $y_{стан}$  системы координат  $x_{стан}O_{стан}y_{стан}$ :

$$\begin{cases} x = x_0 + x_{xOy}, \\ y = y_0 + y_{xOy}, \\ z = z_0 + z_{xOy}. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_{xOy} = x - x_0, \\ y_{xOy} = y - y_0, \\ z_{xOy} = z - z_0. \end{cases} \quad (2.39)$$

где  $x_{xOy}$ ,  $y_{xOy}$  и  $z_{xOy}$  – координаты точки  $M$  в системе координат  $xOy$ .



1 – Границы станка; 2 – манипулятор.

Рисунок 2.15 – К определению угловых перемещений рычагов для наведения в заданную точку в системе координат, связанной со станком установки.

Выражение (2.39) позволяет преобразовать ранее полученные выражения для расчета количества шагов (2.24), (2.25), (2.31) и (2.36), совершаемых шаговыми двигателями при наведении в заданную точку:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = \begin{cases} \frac{1}{\Delta_1 \cdot n_1} \cdot \left( \varphi_{01} - \arccos \left( \frac{x - x_0}{|\vec{r}_{xOy}|} \right) - \arccos \left( \frac{(\ell_1)^2 - (\ell_2)^2 + |\vec{r}_{xOy}|^2}{2 \cdot \ell_1 \cdot |\vec{r}_{xOy}|} \right) \right), & \text{при } y \geq 0 \\ \frac{1}{\Delta_1 \cdot n_1} \cdot \left( \varphi_{01} - 2 \cdot \pi + \arccos \left( \frac{x - x_0}{|\vec{r}_{xOy}|} \right) - \arccos \left( \frac{(\ell_1)^2 - (\ell_2)^2 + |\vec{r}_{xOy}|^2}{2 \cdot \ell_1 \cdot |\vec{r}_{xOy}|} \right) \right), & \text{при } y < 0 \end{cases} \\ k_2 = \frac{1}{\Delta_2 \cdot n_2} \cdot \left( \varphi_{02} - \arccos \left( \frac{(\ell_1)^2 + (\ell_2)^2 - |\vec{r}_{xOy}|^2}{2 \cdot \ell_1 \cdot \ell_2} \right) \right), \\ k_3 = \frac{(z - z_0) \cdot 360}{H_{ШВП} \cdot \Delta_3 \cdot n_3}, \\ |\vec{r}_{xOy}| = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}. \end{array} \right. \quad (2.40)$$

где  $x, y, z$  – координаты точки наведения манипулятора в системе координат, связанной со станком роботизированной установки,  $x_0, y_0, z_0$ , координаты основания грузового рычага в системе координат, связанной со станком

роботизированной установки.

Таким образом, полученные уравнения (2.40) позволяют рассчитать необходимое количество шагов, которые должны совершить шаговые двигатели манипулятора для наведения в заданную точку с координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Данные уравнения могут быть использованы при создании блока управления и программного обеспечения ЭВМ для управления манипулятором.

## 2.5. Машинное зрение на основе двух 2D камер

Машинное зрение роботизированной установки преддоильной подготовки вымени образуют две видеокамеры, которые расположены на боковых стенках станка роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров. Съемка вымени осуществляется в двух пересекающихся плоскостях, а координаты сосков определяются по смещению их контуров на двух изображениях относительно их центра (рисунок 2.16). Поэтому необходимо получить уравнения, связывающие величину этого смещения с координатами сосков [143, 159, 160].

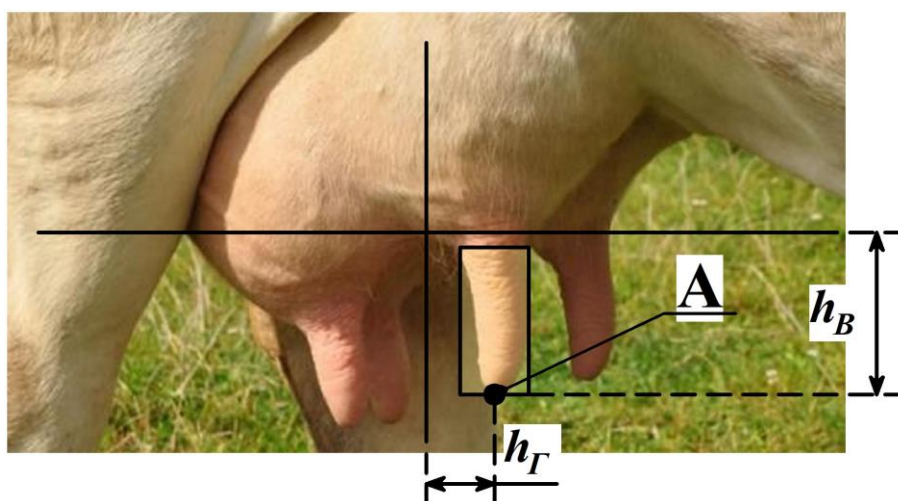
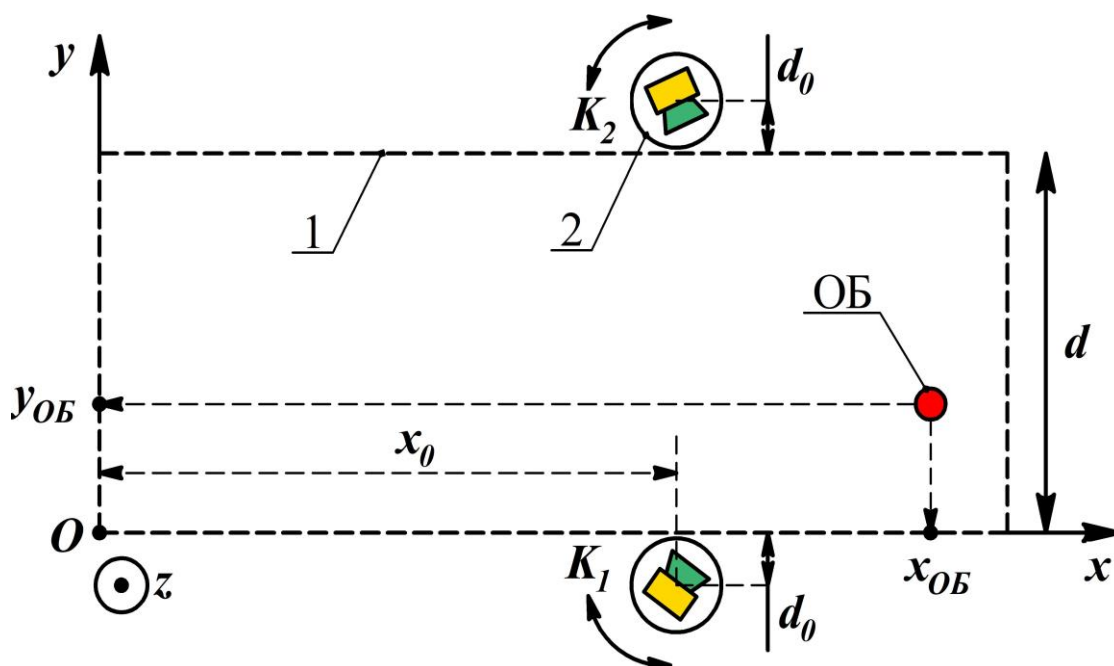


Рисунок 2.16 – Смещение сосков вымени относительно центра изображения

На рисунке 2.16 показаны границы и смещение соска относительно центра изображения по горизонтали  $h_Г$  и вертикали  $h_В$ . Горизонтальное смещение  $h_Г$  позволяет определить координаты соска в плоскости, а вертикальное определяет высоту, т.е. координату  $z$ . В случае успешного определения границ соска на

изображении могут быть вычислены координаты любой точки контура. Например, точка  $A$ , соответствующая концу соска (рисунок 2.16).



1 – границы станка роботизированной установки преддоильной подготовки вымени; 2 – поворотный механизм камер;  $K_1$  – первая камера;  $K_2$  – вторая камера; ОБ – объект съёмки, координаты которого необходимо определить;  $d_0$  – расстояние от боковой стенки станка до оптического центра объектива камеры;  $x_0$  – расстояние, определяющее положение камер по оси  $x$ ;  $d$  – ширина станка.

Рисунок 2.17. Система координат роботизированной установки преддоильной подготовки вымени.

Свяжем со станком роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров прямоугольную систему координат и рассмотрим некоторый объект, расположенный в поле зрения камер (рисунок 2.17). Также разметим плоскость станка, обозначив координаты основных элементов. В этом случае определению подлежат координаты  $x_{ОБ}$ ,  $y_{ОБ}$ ,  $z_{ОБ}$ .

Решим эту задачу исходя из принципа формирования изображения на матрице видеокамеры. Объектив камеры является оптической системой с фокусным расстоянием  $F$ . С некоторыми допущениями для данной системы

должна выполняться формула тонкой линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}, \quad (2.41)$$

где  $a$  – расстояние от оптического центра объектива до объекта,  $b$  – расстояние от оптического центра объектива до матрицы камеры (рисунок 2.18).

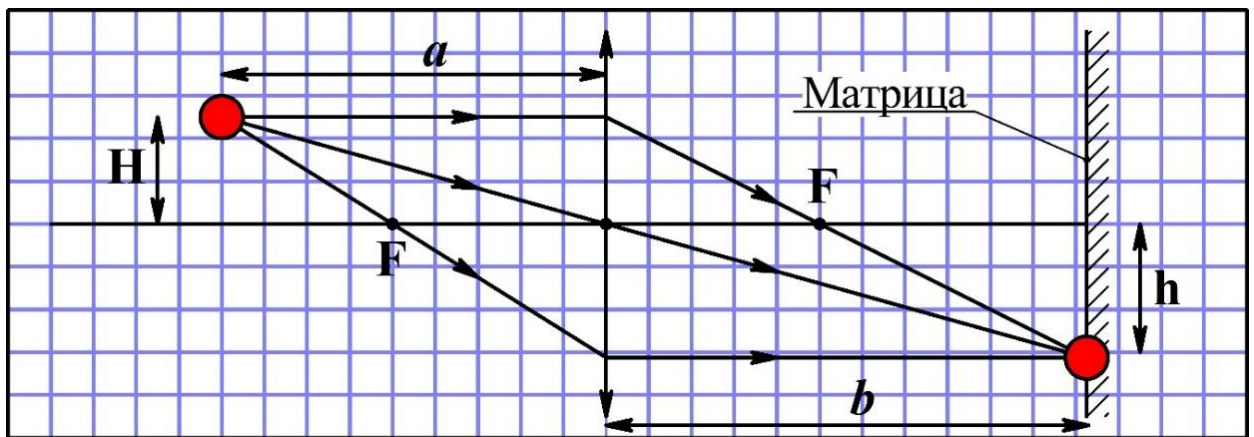


Рисунок 2.18 – Формирование изображения на матрице камеры.

При формировании изображения на матрице камеры оно смещено относительно главной оптической оси на некоторое расстояние, которое определяется увеличением оптической системы  $\Gamma$ . В этом случае справедливо равенство:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{b}{a}, \quad (2.42)$$

где  $h$  – смещение объекта съёмки относительно главной оптической оси объектива камеры;  $H$  – смещение изображение на матрице камеры относительно главной оптической оси объектива.

Объединяя выражения (2.41) и (2.42) относительно величины  $a$ , равной расстоянию от оптического центра линзы до матрицы, получаем:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{b} \cdot \left( \frac{H}{h} + 1 \right). \quad (2.43)$$

Точки, в которых расположены камеры, обозначим как  $K_1$  и  $K_2$ . Согласно выбранным обозначениям, данные точки будут иметь координаты (рисунок 2.17):

$$\begin{aligned} &K_1(x_0, -d_0); \\ &K_2(x_0, d + d_0), \end{aligned} \quad (2.44)$$

где  $d$  является шириной станка, а  $d_0$  определяет расстояние между камерой и боковой стенкой.

Плоскости, в которых расположены матрицы камер, пересекаются и образуют косоугольную систему координат  $x_1O_1y_1$  с вершиной в точке  $O_1$ . В этом случае положение объекта определяется двумя радиус-векторами  $\vec{r}$  и  $\vec{r}_1$ , где  $\vec{r}$  - радиус-вектор определяющий положение точки  $O_1$  в системе координат  $xOy$  и  $\vec{r}_1$  - радиус-вектор, проведенный в точку расположения объекта съёмки в системе координат  $x_1O_1y_1$  (рисунок 2.19).

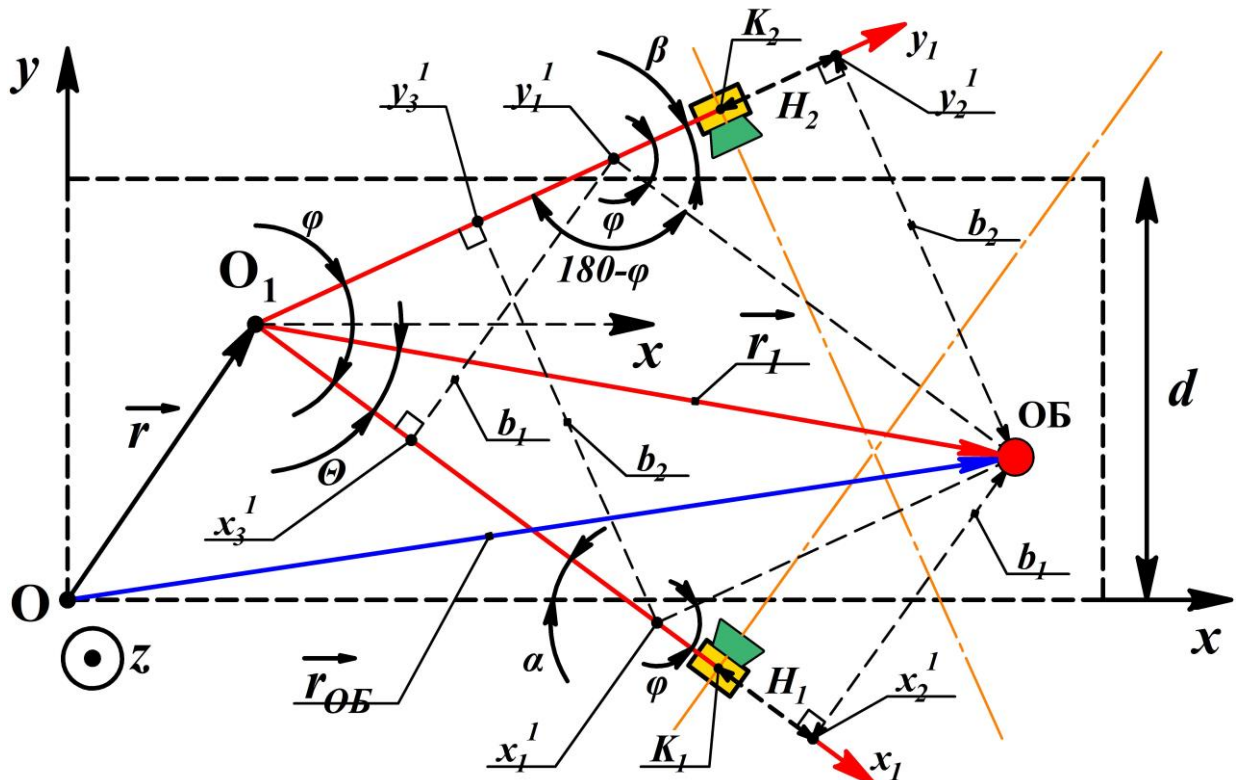


Рисунок 2.19. К расчёту координат объекта.

Координаты точки  $O_1$  определим как точку пересечения двух прямых, проходящих через плоскости матриц камер и образующих систему координат  $x_1O_1y_1$ . Составим уравнения этих прямых при помощи уравнение прямой, проходящей через данную точку с известным угловым коэффициентом:

$$y - y_0 = k \cdot (x - x_0). \quad (2.45)$$

где  $k$  – угловой коэффициент прямой;  $x_0$  и  $y_0$  – координаты точки, через которую проходит прямая.

Угловой коэффициент  $k$  определяет тангенс угла наклона прямой относительно положительного направления оси  $x$ , то есть:

$$k = \operatorname{tg}(\gamma), \quad (2.46)$$

где  $\gamma$  – угол наклона прямой, относительно положительного направления оси  $x$ .

Тогда для прямых  $x_1$  и  $y_1$  получаем два уравнения следующего вида:

$$\begin{cases} y + d_0 = -\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (x - x_0), \\ y - d - d_0 = \operatorname{tg}(\beta) \cdot (x - x_0). \end{cases} \quad (2.47)$$

Решая систему (2.47) относительно неизвестных  $x$  и  $y$ , получим координаты точки пересечения прямых  $O_1$  и, соответственно, радиус-вектора  $\vec{r}$ :

$$\begin{cases} x_{O1} = \frac{x_0 \cdot (\operatorname{tg}(\alpha) + \operatorname{tg}(\beta)) - d - 2 \cdot d_0}{\operatorname{tg}(\alpha) + \operatorname{tg}(\beta)}, \\ y_{O1} = \frac{\operatorname{tg}(\beta) \cdot (d + d_0) - d_0 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\operatorname{tg}(\alpha) + \operatorname{tg}(\beta)}. \end{cases} \quad (2.48)$$

Проекции точки, в которой находится объект ОБ, на оси  $x_1$  и  $y_1$  системы координат  $x_1O_1y_1$  определяют расстояние от него до оптического центра объектива камер, а отрезки  $H_1$  и  $H_2$  равны смещению объекта относительно главной оптической оси камер (рисунок 2.19). Это позволяет составить выражение вида

(2.43) для обеих камер:

$$\begin{aligned}\frac{1}{F} &= \frac{1}{b_1} \cdot \left(1 + \frac{H_1}{h_1}\right), \\ \frac{1}{F} &= \frac{1}{b_2} \cdot \left(1 + \frac{H_2}{h_2}\right),\end{aligned}\tag{2.49}$$

где  $h_1$  и  $h_2$  горизонтальное смещение изображения объекта на матрице первой и второй камеры относительно главной оптической оси (рисунок 2.16).

Линия  $y_1^1\text{ОБ}$  параллельна оси  $x_1$ , а линия  $x_1^1\text{ОБ}$  параллельна оси  $y_1$ . Поэтому треугольники  $y_1^1y_2^1\text{ОБ}$  и  $x_1^1x_2^1\text{ОБ}$  являются прямоугольными и в целом имеют равные углы (рисунок 2.19). Составим для этих треугольников выражения для тангенсов углов  $\angle y_1^1y_2^1\text{ОБ}$  и  $\angle x_1^1x_2^1\text{ОБ}$ , обозначенных на рисунке 2.19 как  $\varphi$ :

$$\begin{aligned}tg(\varphi) &= \frac{b_1}{x_1^1x_2^1} \Rightarrow x_1^1x_2^1 = \frac{b_1}{tg(\varphi)}, \\ tg(\varphi) &= \frac{b_2}{y_1^1y_2^1} \Rightarrow y_1^1y_2^1 = \frac{b_2}{tg(\varphi)}.\end{aligned}\tag{2.50}$$

Согласно построениям (рисунок 2.19), положение точек  $x_1^1$  и  $y_1^1$  на осях  $x_1$  и  $y_1$  определим исходя из равенства:

$$\begin{aligned}O_1x_1^1 &= O_1K_1 + H_1 - x_1^1x_2^1, \\ O_1y_1^1 &= O_1K_2 + H_2 - y_1^1y_2^1.\end{aligned}\tag{2.51}$$

Угол между осями  $x_1$  и  $y_1$  систем координат  $x_1O_1y_1$ , согласно построениям, равен сумме углов разворота камер, то есть  $\varphi = \alpha + \beta$  (рисунок 2.19). Такое же значение имеют и углы  $\angle y_1^1y_2^1\text{ОБ}$  и  $\angle x_1^1x_2^1\text{ОБ}$ , то есть:

$$\varphi = \alpha + \beta = \angle y_1^1y_2^1\text{ОБ} = \angle x_1^1x_2^1\text{ОБ}\tag{2.52}$$

Это позволяет определить отрезки  $O_1x_1^1$  и  $O_1y_1^1$  из треугольников  $O_1x_1^1y_3^1$  и  $O_1x_1^1y_3^1$ , где они являются гипотенузой. Составим выражения для синуса угла  $\varphi$ , в

обоих треугольниках:

$$\begin{aligned}\sin(\varphi) &= \frac{b_2}{O_1x_1^1} \Rightarrow O_1x_1^1 = \frac{b_2}{\sin(\varphi)}, \\ \sin(\varphi) &= \frac{b_1}{O_1y_1^1} \Rightarrow O_1y_1^1 = \frac{b_1}{\sin(\varphi)}.\end{aligned}\tag{2.53}$$

Отрезки  $O_1K_1$  и  $O_2K_2$  определяются координатами точки  $O_1$  (выражение (2.48)) и координатами точек  $K_1$  и  $K_2$ , в которых расположены камеры:

$$\begin{aligned}O_1K_1 = d_1 &= \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (-d_0 - y_1)^2}, \\ O_1K_2 = d_2 &= \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (d + d_0 - y_1)^2}.\end{aligned}\tag{2.54}$$

Объединив выражения (2.49) с выражениями (2.50), (2.51), (2.53), (2.54) и преобразовав их, получаем систему из двух линейных уравнений с двумя неизвестными  $b_1$  и  $b_2$ , равными расстоянию от объекта съёмки до плоскости, в которой находится оптический центр соответствующей камеры:

$$\begin{cases} b_1 \cdot B - b_2 \cdot A = h_1 - d_1, \\ -b_1 \cdot A - b_2 \cdot C = h_2 - d_2. \end{cases}\tag{2.55}$$

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.

Решением системы (2.55) являются уравнения следующего вида:

$$\begin{aligned}b_1 &= \frac{C \cdot (h_1 - d_1) + A \cdot (h_2 - d_2)}{B \cdot C - A^2}, \\ b_2 &= \frac{B \cdot (h_2 - d_2) + A \cdot (h_1 - d_1)}{B \cdot C - A^2}.\end{aligned}\tag{2.56}$$

Из треугольника  $O_1y_1^1OB$  определим модуль вектора  $\vec{r}_1$ , применив для этого

треугольника теорему косинусов:

$$|\vec{r}_1| = \sqrt{(O_1 y_1^1)^2 + (y_1^1 OB)^2 + 2 \cdot (O_1 y_1^1) \cdot (y_1^1 OB) \cdot \cos(\varphi)}. \quad (2.57)$$

Зная модуль вектора  $\vec{r}_1$ , можно вычислить его координаты в системе координат  $xOy$ , найдя его проекции на соответствующие оси системы координат:

$$\begin{cases} x_{r1} = |\vec{r}_1| \cdot \cos(\alpha - \Theta), \\ y_{r1} = -|\vec{r}_1| \cdot \sin(\alpha - \Theta). \end{cases} \quad (2.58)$$

Величину угла  $\Theta$  найдем из прямоугольного треугольника  $O_1 x_2^1 OB$ , составив выражения для синуса этого угла (рисунок 2.19):

$$\sin(\Theta) = \frac{b_1}{|\vec{r}_1|} \Rightarrow \Theta = \arcsin\left(\frac{b_1}{|\vec{r}_1|}\right). \quad (2.59)$$

Объединяя выражения (2.58) и (2.59), получаем, что в системе координат  $xOy$  вектор  $\vec{r}_1$  имеет координаты:

$$\begin{cases} x_{r1} = |\vec{r}_1| \cdot \cos\left(\alpha - \arcsin\left(\frac{b_1}{|\vec{r}_1|}\right)\right), \\ y_{r1} = -|\vec{r}_1| \cdot \sin\left(\alpha - \arcsin\left(\frac{b_1}{|\vec{r}_1|}\right)\right). \end{cases} \quad (2.60)$$

Положение объекта съёмки в системе координат, связанной со станком роботизированной установки, определяется суммой двух векторов  $\vec{r}$  и  $\vec{r}_1$  (рисунок 2.19), то есть справедливо векторное равенство  $\vec{r}_{OB} = \vec{r} + \vec{r}_1$ , проектируя которое на оси  $x$  и  $y$  системы координат  $xOy$ , окончательно получим:

$$\begin{cases} x_{OB} = x_{O1} + x_{r1}, \\ y_{OB} = y_{O1} + y_{r1}. \end{cases} \quad (2.61)$$

Зная расстояния от объекта до плоскости, в которых расположен оптический центр объектива камеры, можно определить и третью координату объекта съёмки  $z_{OB}$ . В этом случае необходимо рассмотреть вертикальное смещение объекта на изображении, полученном с камер. Причем координату  $z_{OB}$  можно определить как по отношению к первой камере, используя расстояние  $b_1$ , так и ко второй камере, используя расстояние  $b_2$ .

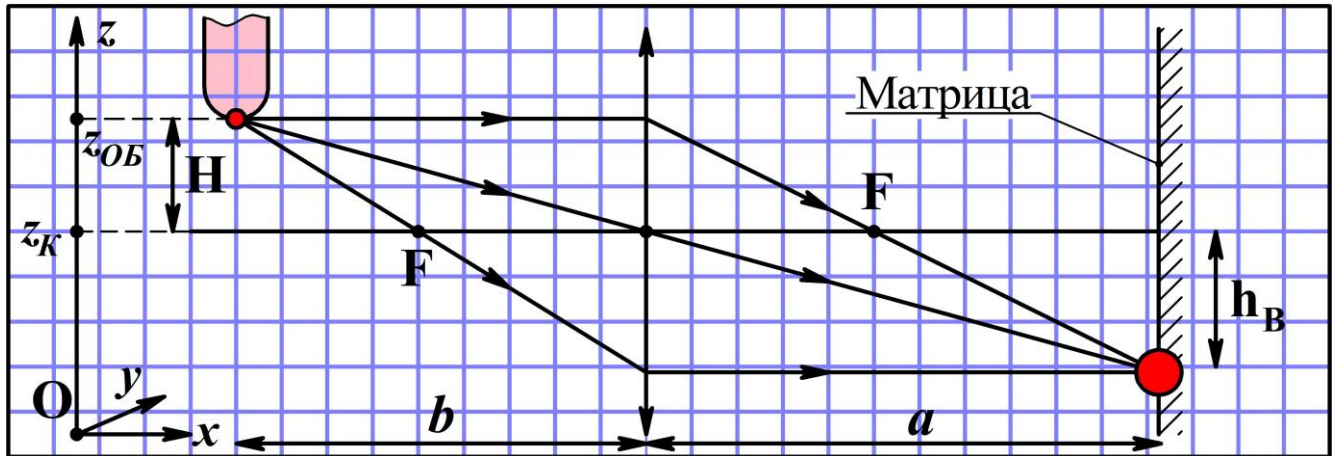


Рисунок 2.20 – К определению координаты  $z$  объекта.

Пусть камера находится на высоте, где главная оптическая ось объектива имеет координату  $z_K$ . В этом случае координата объекта будет определяться соотношением:

$$z_{OB} = z_K + H_z, \quad (2.62)$$

где  $H_z$  – смещение объекта относительно главной оптической оси объектива.

Величину  $H_z$  найдем исходя из уравнения (2.43), которое также должно выполняться. Выразив  $H_z$ , получаем:

$$H = \frac{h}{F} \cdot (b - F). \quad (2.63)$$

Тогда с учётом (2.63) выражение для координаты  $z_{OB}$  (2.62) принимает вид:

$$z_{\text{ОБ}} = z_{\text{К}} \pm \frac{h_{\text{В1}}}{F} \cdot (b_1 - F) \text{ или } z_{\text{ОБ}} = z_{\text{К}} \pm \frac{h_{\text{В2}}}{F} \cdot (b_2 - F). \quad (2.64)$$

В формулах (2.64) знак « $\pm$ » учитывает то, что объект съёмки может находиться как выше оптической оси камеры, так и ниже неё, а величины  $h_{\text{В1}}$  и  $h_{\text{В2}}$  определяют вертикальное смещение объекта на матрице первой или второй камер.

Таким образом, проведенный анализ предложенной системы машинного зрения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров позволил получить систему уравнений, включающую выражения (2.48), (2.54), (2.56), (2.57), (2.60), (2.61), (2.64), последовательное применение которых позволяет на основе данных о вертикальном ( $h_{\text{В1}}$  или  $h_{\text{В2}}$ ) и горизонтальном ( $h_1$  и  $h_2$ ) смещении объекта относительно центра изображения вычислить его координаты ( $x_{\text{ОБ}}$ ,  $y_{\text{ОБ}}$ ,  $z_{\text{ОБ}}$ ) в привязке к системе координат, связанной со станком установки. Данные выражения в целом получены для одного объекта, находящегося в поле зрения двух камер. Однако в случае рассмотрения четырех сосков вымени эти формулы могут быть применены отдельно для каждого соска.

## 2.6. Выводы по главе

- 1) В соответствии с результатами проведенного литературного обзора, разработана функциональная схема роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров (рисунок 2.1) и конструкция манипулятора, осуществляющего подведение рабочего органа в рабочую область (рисунок 2.3).
- 2) Применение данной установки позволяет снизить затраты труда при доении коров, что наглядно показывают построенные циклограммы (рисунок 2.7).
- 3) На основе анализа временных интервалов, затрачиваемых на выполнение отдельных операций при доении коров на доильных установках типа «Карусель» с применением роботизированной установки преддоильной подготовки вымени (таблица 2.1), установлено, что при продолжительности рабочего цикла роботизированной установки, равной  $T_{\text{Ц РУППВ}} = 40 - 46$  с, достигается согласованная работа обеих установок и выполняются зоотехнические требования к технологии машинного доения коров. Продолжительность данного цикла может

быть сокращена до значений  $T_{Ц РУППВ} = 34 - 40$  с за счёт оптимизации времени на выполнение некоторых операций (таблица 2.1).

4) На основе анализа продолжительности рабочего цикла доильной установки и роботизированной установки преддоильной подготовки вымени (таблица 2.2) установлено, что наиболее оптимально использовать роботизированную установку с доильными установками, на платформе которых установлено до 40 станков. В этом случае поточное обслуживание животных обеспечит одна или две роботизированные установки.

5) В зависимости от продолжительности рабочего цикла доильной установки применение роботизированной установки преддоильной подготовки вымени позволяет повысить пропускную способность доильной установки на 4,5 – 1,5 %.

6) На основе кинематического исследования определены предварительные размеры станка роботизированной установки преддоильной подготовки вымени – 2500 мм×900 мм. Проведённые исследования позволили определить оптимальные длины рычагов манипулятора: грузовой – 630 мм, вспомогательный – 380 мм. Из анализа различных положений коровы в станке определено оптимальное положение манипулятора относительно станка (рисунок 2.11).

7) Исследование перемещения рычагов манипулятора за счёт применения шаговых двигателей позволило получить аналитические выражения (2.40), связывающие координаты точки наведения манипулятора с числом шагов, которые необходимо совершить каждому шаговому двигателю для наведения в данную точку.

8) В результате теоретических исследований получены аналитические выражения (2.48), (2.54), (2.56), (2.57), (2.60), (2.61), (2.64), последовательное применение которых позволяет определить координаты сосков вымени по смещению их контура относительно центра изображений, получаемых с камер.

9) Для оценки точности предложенного способа определения координат сосков вымени необходимо провести экспериментальные исследования. Поэтому необходимо разработать программное обеспечение для ЭВМ и блока управления с использованием полученных аналитических уравнений, а также создать лабораторную установку для проведения испытаний машинного зрения.

## **ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **3.1 Программа и методика лабораторных и натурных исследований**

В соответствии с поставленными задачами была разработана следующая программа проведения исследований:

- 1)** разработать лабораторную установку, моделирующую работу роботизированной установки преддоильной подготовки вымени и её системы позиционирования;
- 2)** разработать программное обеспечение для работы с машинным зрением и манипулятором системы позиционирования лабораторной установки;
- 3)** определить размеры и положение рабочей области, в пределах которой могут находиться соски вымени коровы, а также определить положение камер машинного зрения, исключающих образование слепых зон, относительно станка;
- 4)** разработать методику измерения погрешности в определении координат машинным зрением лабораторной установки и провести измерения погрешности в различных точках рабочей области;
- 5)** разработать методику подбора угловых поправок на угол разворота камер машинного зрения лабораторной установки и провести измерения погрешности в определении координат с учётом подобранных угловых поправок;
- 6)** провести трёхуровневый трёхфакторный эксперимент и на основе его результатов построить математические модели  $\Delta\alpha = f_1(x, y, z)$  и  $\Delta\beta = f_2(x, y, z)$ , описывающие распределение угловых поправок на угол разворота камер машинного зрения лабораторной установки для различных точек рабочей области;
- 7)** разработать методику двухуровневого определения координат на основе математических моделей  $\Delta\alpha = f_1(x, y, z)$  и  $\Delta\beta = f_2(x, y, z)$ , и провести измерение погрешности в определении координат для различных точек рабочей области с использованием данной методики;
- 8)** провести испытания предложенного способа определения координат сосков вымени в лабораторных условиях и натурные испытания в производственных условиях.

### 3.2. Лабораторная установка

Роботизированная установка преддоильной подготовки вымени и её система позиционирования были смоделированы при помощи лабораторной установки, которая позволила провести лабораторные и натурные испытания в производственных условиях. Её внешний вид представлен на рисунке 3.1 [161].



1 – станок; 2 – входная дверца; 3 – выходная дверца; 4 – манипулятор; 5 – камера; 6 – блок управления; 7 – экран калибровки; 8 – алюминиевый профиль.

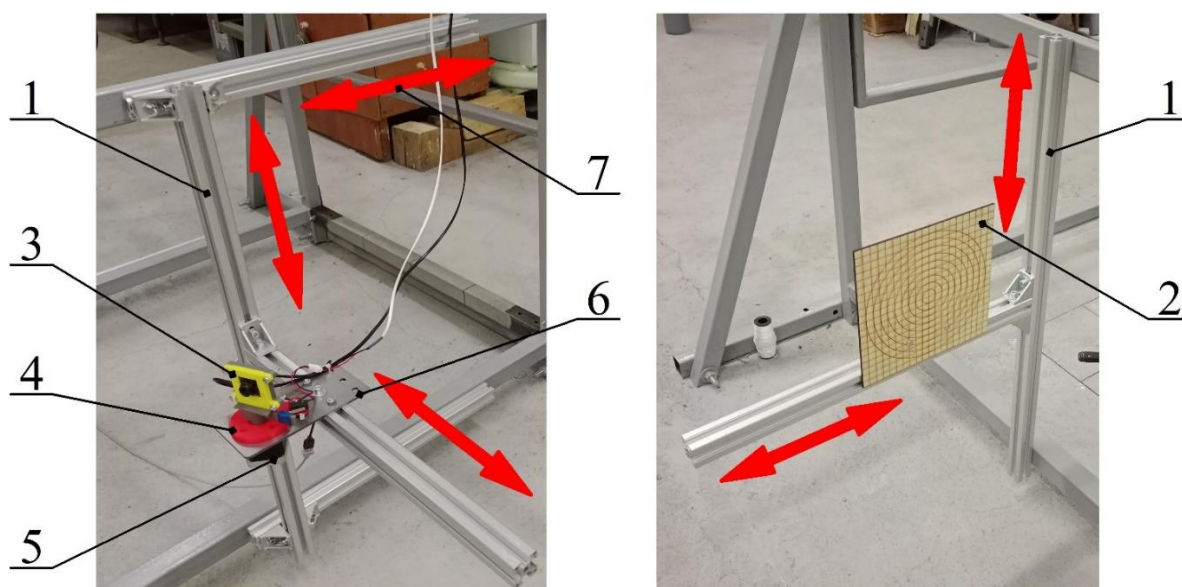
Рисунок 3.1 – Внешний вид лабораторной установки.

Основу лабораторной установки составляет полногабаритный станок 1 с входной 2 и выходной 3 дверцами. Размеры станка лабораторной установки соответствуют размерам, определенным кинематическим исследованием, и равным 2500 мм х 900 мм.

Система позиционирования лабораторной установки состоит из манипулятора 4 и машинного зрения, построенного на базе двух видеокамер 5. Для

манипулятора был изготовлен подрамник, благодаря которому удалось объединить манипулятор и станок в единую конструкцию. Кроме того, положение подрамника с манипулятором также соответствует положению, определенному из кинематического анализа (рисунок 2.11).

Управление манипулятором и поворотным механизмом камер машинного зрения осуществляется при помощи блока управления 6, а также ЭВМ, в качестве которой был использован ноутбук с разработанным программным обеспечением.



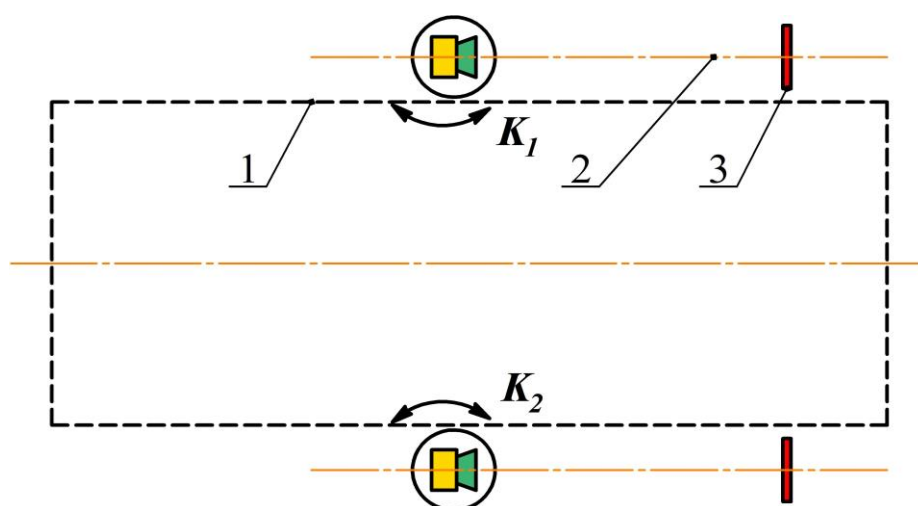
1 – алюминиевый профиль; 2 – экран калибровки положения камер; 3 – камера; 4 – поворотный механизм для шагового двигателя с камерой; 5 – шаговый двигатель; 6 – кронштейн; 7 – возможные направления перемещения камер и экрана калибровки.

Рисунок 3.2 – Крепление камер и экранов калибровки к боковым стенкам станка.

Камеры машинного зрения и экраны для их калибровки 7 прикреплены к боковым стенкам станка при помощи алюминиевого профиля 8, который сыграл роль направляющих и позволил осуществить регулировку положения камер и экранов калибровки по трем осям. Конструкция крепления камер и экранов калибровки приведены на рисунке 3.2.

Экраны калибровки в сочетании с поворотным механизмом камер позволяют проводить калибровку их положения. Калибровка подразумевает установку камер

до проведения измерений в положение, при котором главная оптическая ось линз их объектива параллельна оси осевой линии лабораторной установки (рисунок 3.3). Поэтому экраны устанавливаются таким образом, чтобы их центр находился на таком же расстоянии от боковой стенки станка лабораторной установки, как и оптический центр линзы объектива камеры.



1 – границы станка; 2 – главная оптическая ось объектива; 3 экран калибровки.

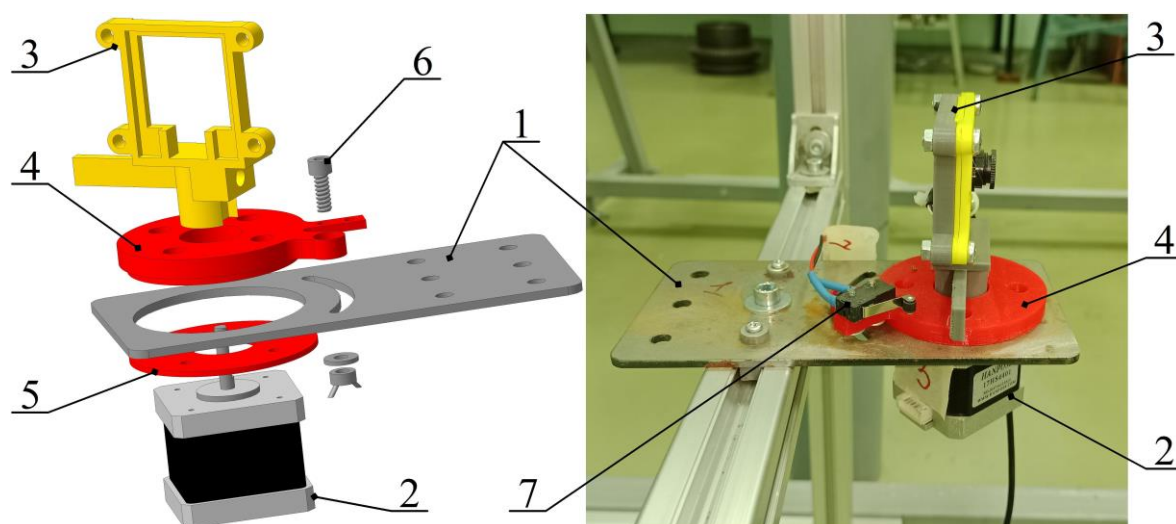
Рисунок 3.3 – Калибровка положения камер.

На рисунке 3.4 приведена конструкция поворотного механизма. Он включает в себя металлический кронштейн 1, при помощи которого весь механизм крепится к алюминиевому профилю, и шаговый двигатель 2 (17HS4401), который применяется для разворота камер машинного зрения лабораторной установки на заданный угол. Камеры при помощи кронштейна 3 крепятся на валу двигателя, который позволяет разворачивать камеру на углы, кратные угловому шагу  $1,8^\circ$ .

Шаговый двигатель крепится непосредственно к верхнему 4 и нижнему 5 поворотным дискам, за счёт которых он удерживается в круглом вырезе кронштейна 1. До проведения всех измерений шаговый двигатель вместе с камерой разворачивается в этом вырезе до совмещения мишени на изображении, получаемого с камеры, с мишенью экранов калибровки, после чего положение дисков фиксируется винтом 6.

Также на верхнем поворотном диске крепится концевой датчик 7. При

проведении калибровки шаговый двигатель разворачивает камеру до касания кронштейном 3 концевого датчика, затем осуществляется разворот в обратном направлении на одну и ту же угловую величину, то есть на одинаковое число шагов. Это позволяет устанавливать камеру всегда в одно и то же положение относительно поворотного диска и экрана калибровки.



1 – кронштейн для крепления механизма к алюминиевому профилю; 2 – шаговый двигатель; 3 – кронштейн камеры; 4 – верхний поворотный диск; 5 – нижний поворотный диск; 6 – винт фиксации поворотного механизма; 7 – концевой датчик.

Рисунок 3.4 – Поворотный механизм камер машинного зрения.

В качестве камер машинного зрения были использованы модули HBV-1615. Некоторые технические характеристики данных модулей приведены в таблице 3.1. При проведении экспериментальных исследований изображения, получаемые с камер, имели разрешение 640 x 480 пикселей.

Манипулятор лабораторной установки изготовлен в соответствии со схемой, приведенной в главе 2 (рисунок 2.3). Его внешний вид представлен на рисунке 3.5. Данный манипулятор имеет три степени свободы и позволяет перемещать рабочий орган в пространстве вдоль трех осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  системы координат, связанной со станком лабораторной установки. Длины грузового и вспомогательного рычага соответствуют длинам, определенным из кинематического анализа.

Позиционирование манипулятора в пространстве обеспечивают три шаговых

двигателя 86HS156-5004. При этом шаговый двигатель, обеспечивающий привод грузового рычага, оснащен редуктором с передаточным числом  $n = 0,1$ . Для вертикального позиционирования применяется шариковая винтовая передача, винт, которой имеет шаг  $H = 5$  мм.

Таблица 3.1. Основные характеристики модуля HBV-1615.

|                                      |                                  |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| Размер модели                        | 28 мм × 28 мм × 11,5 мм ± 0,5 мм |
| Температура (стабильное изображение) | От 0° С до 50° С                 |
| Расстояние до объекта                | 30см-бесконечность               |
| Разрешение                           | 600LW / PH (Центр)               |
| Интерфейс                            | USB 2.0                          |
| Датчик                               | HM1355 (1/6")                    |
| Максимальное разрешение              | 1280 x 1024                      |
| Размер пикселя                       | 1,75 x 1,75 мкм                  |
| Конструкция линз                     | 2G2P                             |
| FOV                                  | 55°                              |



1 – манипулятор; 2 – грузовой рычаг; 3 – редуктор; 4 – подрамник; 5 – габаритный макет рабочего органа; 6 – пульт для ручного управления; 7 – блок управления; 8 – датчик конца; 9 – вспомогательный рычаг.

Рисунок 3.5 – Манипулятор лабораторной установки.

Перед проведением измерений производится калибровка манипулятора, то есть его рычаги устанавливаются в нулевое положение. Для этого на несущих элементах конструкции манипулятора установлены «датчики конца», при касании которых рычагами и подвижной платформой определяется исходное положение.

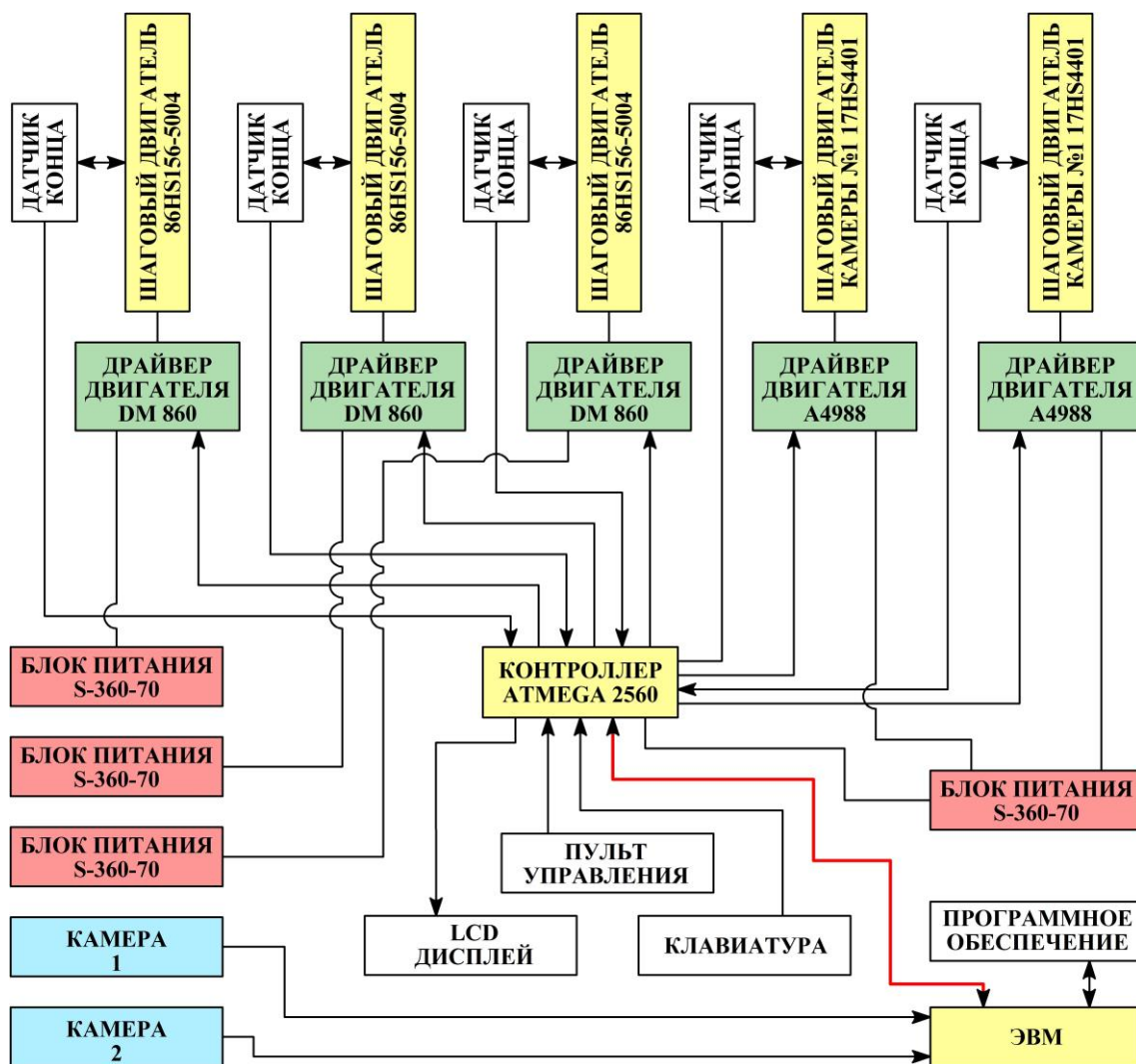


Рисунок 3.6 – Схема блока управления лабораторной установки.

Блок управления манипулятором построен на база программируемого контроллера Atmega2560 (рисунок 3.6). Взаимодействие шаговых двигателей манипулятора с данным контроллером осуществляется при помощи драйверов шаговых двигателей DM860, а взаимодействие шаговых двигателей поворотного механизма камер машинного зрения с контроллером осуществляется при помощи драйверов A4988. Также в состав блока управления входят блоки питания шаговых

двигателей манипулятора и поворотного механизма. При этом питание каждого шагового двигателя манипулятора осуществляется отдельным блоком питания S-360-70.

Все электронные компоненты блока управления смонтированы в специальный шкаф, внешний вид которого приведён на рисунке 3.5, а для выбора режима работы и установки необходимых настроек применяется LCD дисплей и клавиатурный модуль (рисунок 3.7).



1 – аварийный выключатель; 2 – конка управления питанием электропривода манипулятора; 3 – конка управления питанием поворотного механизма камер; 4 – лампы индикации питания; 5 – LCD дисплей; 6 – клавиатурный модуль.

Рисунок 3.7 – Дисплей и клавиатурный модуль блока управления.

На основе уравнений (2.40) для блока управления было разработано программное обеспечение. Оно позволяет производить калибровку манипулятора, управлять манипулятором в ручном режиме, а также работать манипулятору в режиме измерений. Кроме того, разработанное программное обеспечение блока управления позволяет программно управлять частотой вращения валов шаговых двигателей манипулятора и, как следствие, изменять скорость его позиционирования.

Драйверы шаговых двигателей манипулятора позволяют изменять величину шага, поэтому в программном обеспечении предусмотрена возможность изменения настроек данного параметра, так как величина шага шаговых двигателей входит в

уравнения (2.40) и определяет количество шагов, которые должны совершить двигатели для наведения манипулятора в данную точку.

Ручной режим подразумевает управление манипулятором при помощи пульта (рисунок 3.5). При этом отдельно осуществляется управление в горизонтальной плоскости и вертикальное перемещение.

Режим измерений подразумевает работу блока управления совместно с программным обеспечением ЭВМ. В этом случае блок управления обеспечивает разворот камер на заданный угол, а после расчёта координат перемещает габаритный макет рабочего органа в рабочую область согласно определённым координатам.

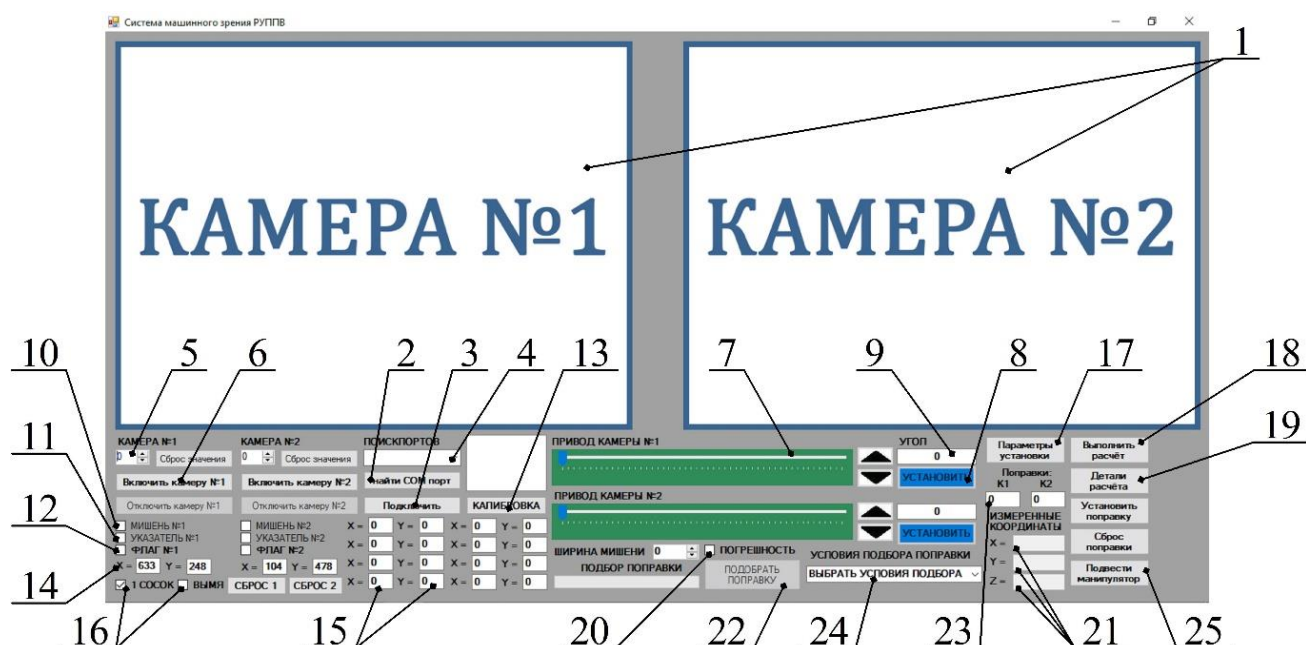


Рисунок 3.8 – Внешний вид главного окна программы системы машинного зрения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени.

### 3.3. Программное обеспечение ЭВМ

Блок управления лабораторной установки позволяет осуществлять ручное управление манипулятором и его калибровку без использования ЭВМ. Однако для проведения экспериментальных исследований необходимо его взаимодействие с ЭВМ, где происходит обработка графического материала, поступающего с камер и расчёт координат.

Для проведения исследований предложенного способа определения координат сосков вымени (раздел 2.5) разработано программное обеспечение ЭВМ. Разработка данного программного обеспечения осуществлялась при помощи среды разработки Visual Studio 2019 на языке программирования C++ [162].

Внешний вид главного окна разработанной программы приведен на рисунке 3.8. Окно состоит из двух частей. В первой части расположены графические ячейки 1, на которые выводятся изображения с камер лабораторной установки. Вторая часть окна программы представляет собой панель инструментов, которая содержит инструменты для управления камерами и обработки графического материала.

Кнопка 2 панели инструментов инициализирует поиск доступных COM-портов, а кнопка 3 выполняет непосредственное подключение выбранного устройства, в частности блока управления. Все доступные порты отражаются в ячейке 4. Элементы 5 используются для выбора порта, к которому подключена данная камера, а при помощи кнопок 6 выполняется их подключение.

| ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВКИ                                |         | ДИАПАЗОН ПОИСКА ПОПРАВКИ                                 |     |
|----------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------|-----|
| ФОКУС F =                                          | 0.00145 | МИНИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ                                     | -3  |
| ШИРИНА СТАНКА d =                                  | 0.897   | МАКСИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ                                    | 3   |
| ПОЛОЖЕНИЕ КАМЕР X_0 =                              | 0.720   | ШАГ ПОПРАВКИ                                             | 0.1 |
| ПОЛОЖЕНИЕ КАМЕР d_0 =                              | 0.260   | <input type="checkbox"/> ОДНОУРОВНЕВЫЙ РАСЧЕТ            |     |
| ПОЛОЖЕНИЕ КАМЕР Z_0 =                              | 0.400   | <input checked="" type="checkbox"/> ДВУХУРОВНЕВЫЙ РАСЧЕТ |     |
| <input type="button" value="СОХРАНИТЬ ПАРАМЕТРЫ"/> |         |                                                          |     |

Рисунок 3.9 – Окно с параметрами установки.

Для разворота камер на выбранный угол используется TrackBar 7 и кнопка 8, а информация о величине установленного угла выводится в текстовое поле 9. На изображении, выводимого с камер, могут быть отмечены такие элементы как мишень – применяется для калибровки камер, указатель – отмечает положение курсора на изображении и флаг – отмечает положение соска вымени. Данные элементы могут быть включены для отображения или скрыты, при помощи

элементов 10, 11 и 12 соответственно. Калибровка камер запускается по нажатию на кнопку 13.

Информация о положении указателя на изображении в данный момент времени отражается в ячейках 14, а данные о положении флага выводятся в ячейки 15. Положение указателя и флага выражается расстоянием от нижней левой границы изображения, которое выражено в пикселях. Программа имеет два режима, переключение между которыми осуществляется при помощи элементов 16 панели инструментов. Первый режим подразумевает работу с одним соском, а второй позволяет делать расчёт координат всех четырёх сосков.

ПОДРОБНОСТИ РАСЧЁТА

Угол первой камеры: 45  
Угол первой камеры: 27

Поправка на угол первой камеры: -0,23  
Поправка на угол второй камеры: -0,18

Сумма углов:  $f = 71,5825153943986$

Постоянная А для решения системы:  $A = 1,05420806694808$   
Постоянная В для решения системы:  $B = -0,456801887616537$   
Постоянная С для решения системы:  $C = -0,0899053358923991$

Расстояние от камеры №1 до вершины косоугольной системы координат:  $d1 = 1,33331386803785$   
Расстояние от камеры №2 до вершины косоугольной системы координат:  $d2 = 1,06101930110969$

Координаты косоугольной системы координат:  $x1 = -0,227020750655758$   
Координаты косоугольной системы координат:  $y1 = 0,678550781007324$

Расстояние b1:  $b1 = 0,932717633023527$   
Расстояние b2:  $b2 = 0,86076479632141$

Модуль радиус-вектора:  $r = 1,53464089570285$

Координаты объекта в системе координат, связанной с косоугольной системой координат:  $x2 = 1,52134231157305$   
Координаты объекта в системе координат, связанной с косоугольной системой координат:  $y2 = -0,195364531713064$

Итого:  $x1 = 1,2943215609173$   
Итого:  $y1 = 0,48318624929426$   
Итого:  $z1 = 0,266250700291621$   
Итого:  $z2 = 0,295252489409752$

АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

☐ 1 СОСОК УСПЕШНО ОПРЕДЕЛЕН  
☐ 2 СОСОК УСПЕШНО ОПРЕДЕЛЕН  
☐ 3 СОСОК УСПЕШНО ОПРЕДЕЛЕН  
☐ 4 СОСОК УСПЕШНО ОПРЕДЕЛЕН

ВСЕ СОСКИ УСПЕШНО  
ВСЕ СОСКИ НЕ ОПРЕДЕЛЕНЫ

СОХРАНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ В ФАЙЛ

ЗАКРЫТЬ

Название опыта:

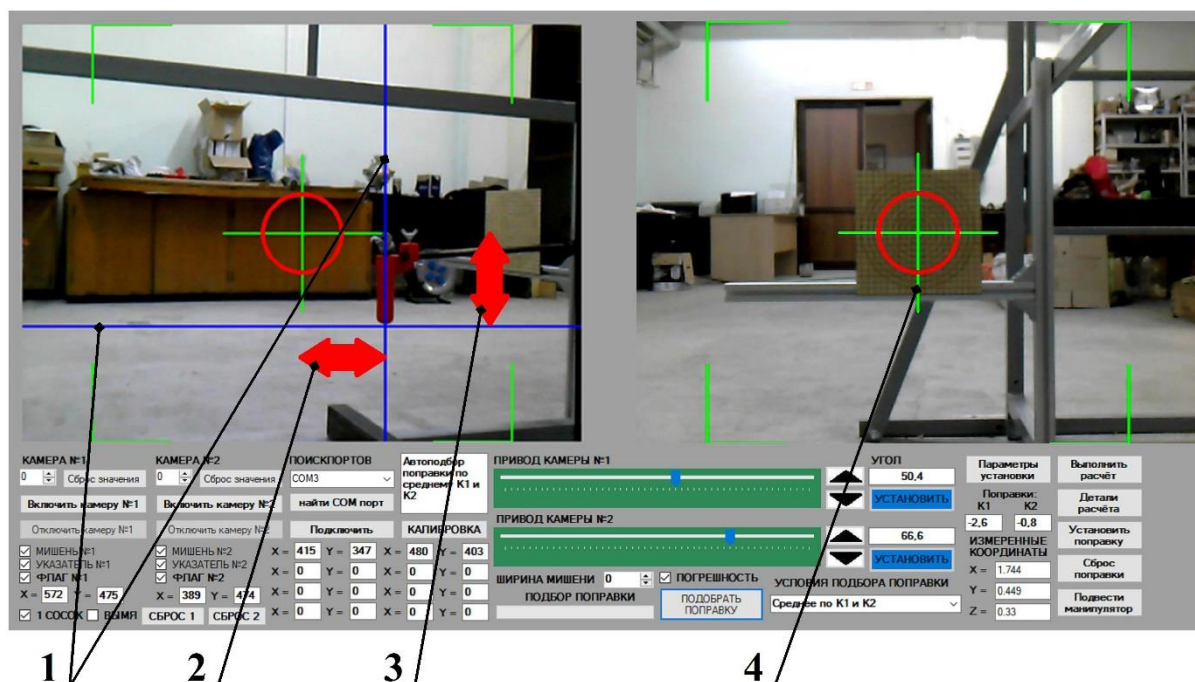
Номер опыта:

Заполнить шапку  
Сохранить

Рисунок 3.10 – Окно с результатами расчёта координат.

Кнопка 17 вызывает окно, в котором указываются параметры установки (рисунок 3.9), а кнопка 18 запускает расчёт координат при помощи уравнений (2.48), (2.54), (2.56), (2.57), (2.60), (2.61), (2.64) исходя из положения флага и угла разворота камер. Результаты расчёта координат, а также вспомогательные данные, полученные из уравнений (2.48), (2.54), (2.56), (2.57), (2.60), (2.61), (2.64), выводятся в отдельное окно (рисунок 3.10) по нажатию на кнопку 19. Все полученные данные могут быть сохранены в отдельный файл, который доступен для открытия в табличном редакторе Excel.

Программа позволяет одновременно с расчётом координат вычислить и погрешность их определения. Данный функционал подключается элементом 20 панели инструментов, однако для этого также необходимо заполнить поля 21 данными о реальных координатах объекта, которые можно определить при помощи измерительного инструмента. В частности, в проведенных экспериментах с системой машинного зрения был использован лазерный дальномер.



1 – указатели флага, отмечающие положение соска, 2 – горизонтальное смещение соска; 3 – вертикальное смещение соска; 4 – калибровка камеры по мишени.

Рисунок 3.11 – Работа с камерами машинного зрения лабораторной установки.

В данной программе реализован алгоритм подбора поправок на угол поворота камер и расчёта координат с их учётом. Это позволяет значительно повысить точность вычисления координат. Запускается поиск поправок кнопкой 22, а результаты расчёта выводятся в текстовые ячейки 23. Поправки вычисляются на основании данных о реальном положении объекта, а в выпадающем списке 24 можно выбрать условие подбора. В частности, условием подбора является минимум погрешности в определении координат по отношению к первой камере, второй камере или средней между ними.

Кнопка 25 позволяет выполнить подведение манипулятора в точку с вычисленными координатами. На рисунке 3.11 приведен фрагмент работы с программой. В области зрения первой камеры находится макет соска с указанием его положения при помощи линий флага. Вторая камера откалибрована и нацелена на экран калибровки.

### **3.4. Методика измерения погрешности**

Исследования предложенного для роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров способа определения координат с использованием двух 2D видеокамер проходили в три этапа. На первом этапе была произведена оценка точности машинного зрения по величине погрешности в определении координат, а на втором рассмотрен двухступенчатый алгоритм определения координат, позволивший повысить точность.

Для проведения исследований, исходя из кинематического анализа, было установлено положение камер относительно станка и определены размеры рабочей области, в пределах которой может находиться вымя коровы в станке установленных размеров.

Положение камер определено графически исходя из условия, согласно которому в их область зрения не должны попадать передние ноги коровы, а вымя должно просматриваться при любом положении коровы в станке. Камеры, используемые в лабораторной установке, имеют угол обзора  $55^{\circ}$  (таблица 3.1, параметр FOV). На рисунке 3.12 изображены различные положения коровы в станке, а также отмечено положение камеры, при котором достигаются обозначенные условия. Таким образом, камеры были установлены в точке, отстоящей от боковой стенки станка на расстоянии 0,26 м, и отстоящей от стенки, в которой располагается входная дверца на расстоянии 0,72 м.

По технологии машинного доения коров минимально допустимое расстояние от пола до основания сосков вымени должно составлять 45 см. При этом, согласно данным о средних размерах коров, максимальное расстояние от пола до основания соска равно 60 см. Поэтому камеры машинного зрения могут быть установлены на

высоте в интервале  $45 < z < 60$  см. В лабораторной установке отсчёт высоты осуществляется от уровня нижней перекладки и камеры установлены в точку с координатой  $z = 40$  см. Относительно пола – это расстояние соответствует высоте 52 см, что практически совпадает с серединой указанного интервала.

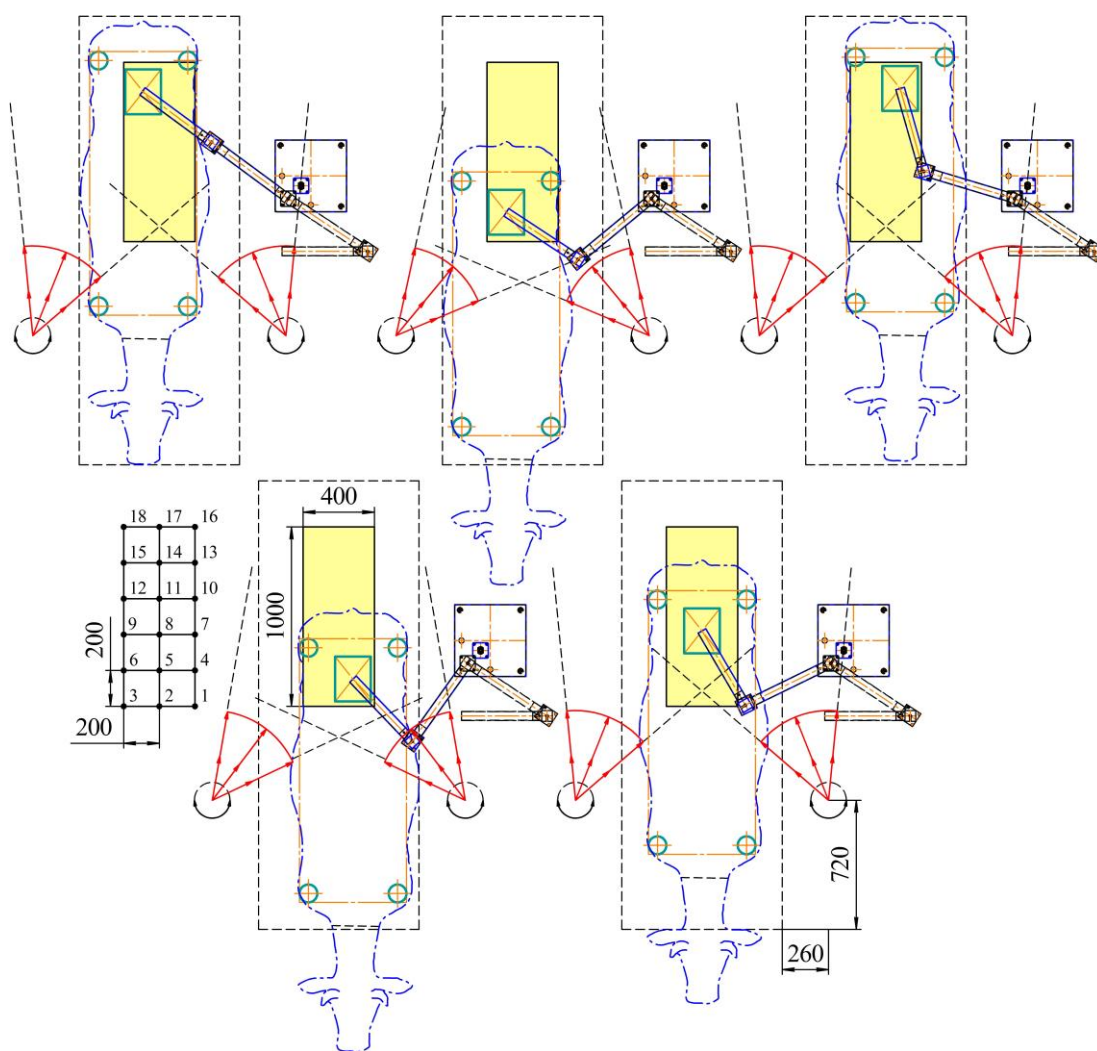
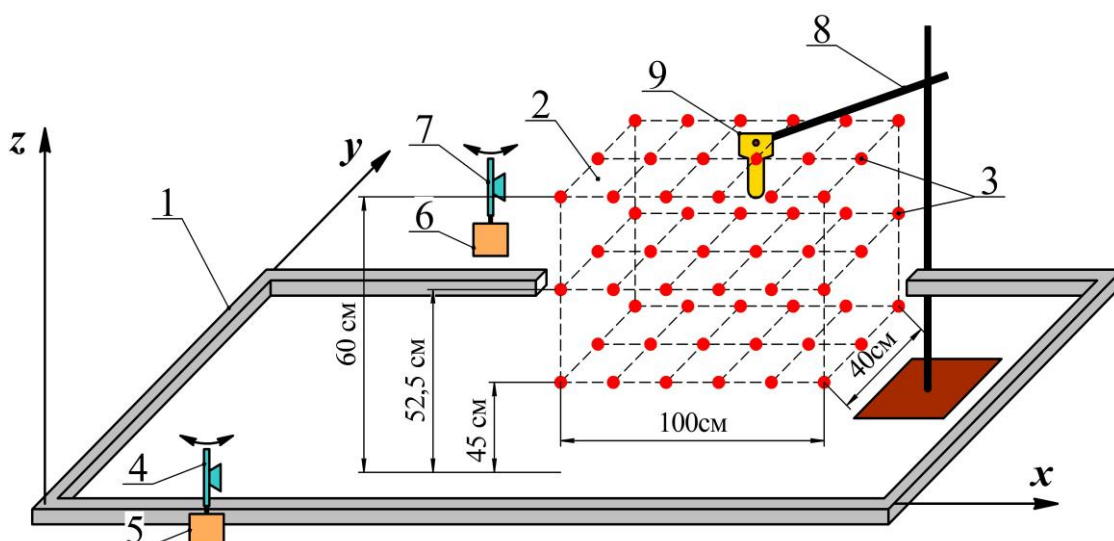


Рисунок 3.12 – К определению положения камер.

Исходя из различных положений коровы в станке, при помощи графического способа установлено, что вымя коровы может находиться в пределах прямоугольной области с размерами 100 см на 40 см (рисунок 3.12). Данная область была разбита на квадраты со стороной 20 см, что позволило получить сетку с 18 узлами. При оценке величины погрешности было рассмотрено три таких плоскости, которые расположены на высоте 45 см, 52,5 см и 60 см (рисунок 3.13). Так как каждая такая плоскость содержит 18 точек, то всего было исследовано 54 точки [161].



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

Рисунок 3.13 – Положение и размеры рабочей области.

В каждую узловую точку рабочей области устанавливался макет соска вымени коровы и производилась оценка погрешности в определении координат машинным зрением лабораторной установки. Погрешность вычислялась как расстояние между двумя точками. Первая точка определяется координатами соска, вычисленными при помощи машинного зрения, а вторая фактическими координатами, которые были измерены при помощи лазерного дальномера (рисунок 3.14). В этом случае справедливо соотношение:

$$\Delta_r = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}, \quad (3.1)$$

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

Координата  $z$ , согласно методике расчёта координат, приведенной в разделе 2.5, может быть вычислена по отношению к первой или второй камере. Поэтому при расчёте величины полной погрешности  $\Delta_r$  координата  $z$  вычислялась как

среднее арифметическое между двумя значениями, полученными по отношению к первой и второй камерам:

$$z_1 = \frac{z_{K1} + z_{K2}}{2}, \quad (3.2)$$

где  $z_{K1}$  – координата  $z$ , вычисленная по отношению к первой камере, (м);  $z_{K2}$  – координата  $z$ , вычисленная по отношению ко второй камере, (м).

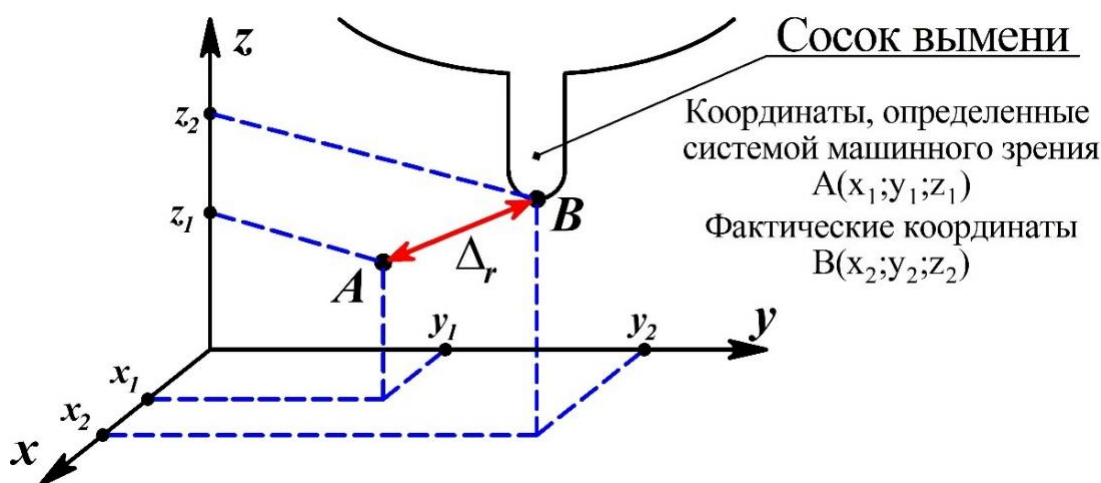


Рисунок 3.14 – Методика расчёта погрешности в определении координат.

Также были произведены расчёты погрешности в определении отдельных координат  $x$  и  $y$ , а также вычислена погрешность определения координат в плоскости  $xOy$  при помощи следующих соотношений:

$$\Delta_x = |x_1 - x_2|, \quad (3.3)$$

$$\Delta_y = |y_1 - y_2|, \quad (3.4)$$

$$\Delta_{xOy} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \quad (3.5)$$

где  $\Delta_x$  – ошибка в определении координаты  $x$ , (м);  $\Delta_y$  – ошибка в определении координаты  $y$ , (м);  $\Delta_{xOy}$  – ошибка определения координат в плоскости  $xOy$ , (м).

Кроме того, вычислена ошибка определения координаты  $z$ . Расчёт этой ошибки осуществлен как по отношению к первой камере, так и ко второй. Это

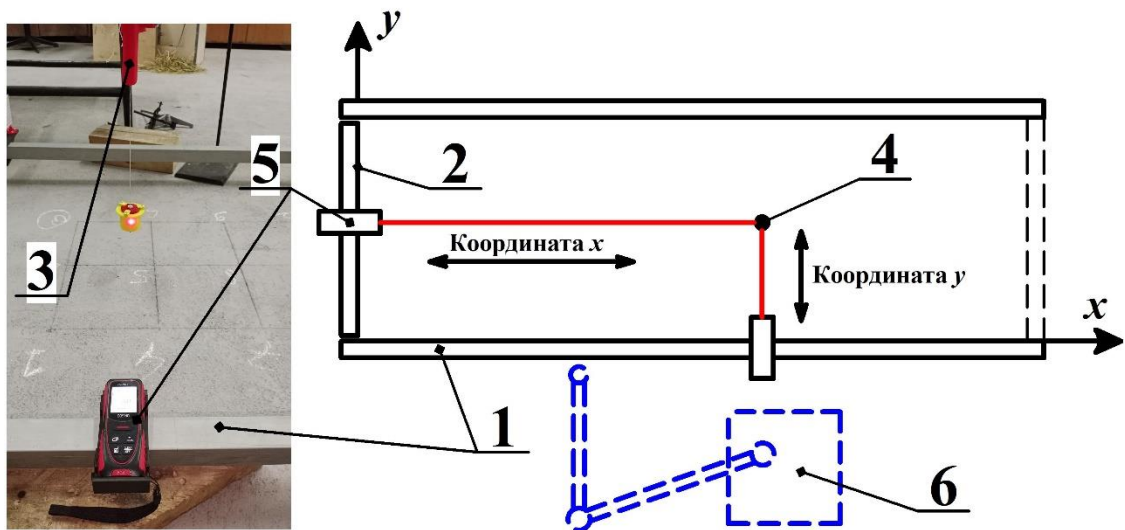
также позволило определить среднее значение ошибки в определении координаты  $z$  по отношению к обеим камерам. Для этого были использованы следующие соотношения:

$$\Delta_{ZK1} = |z_{K1} - z_2|, \quad (3.6)$$

$$\Delta_{ZK2} = |z_{K2} - z_2|, \quad (3.7)$$

$$\Delta_{ZCP} = \frac{\Delta_{ZK1} + \Delta_{ZK2}}{2}. \quad (3.8)$$

где  $\Delta_{ZK1}$  – ошибка в определении координаты  $z$  по отношению к первой камере, (м);  
 $\Delta_{ZK2}$  – ошибка в определении координаты  $z$  по отношению ко второй камере, (м);  
 $\Delta_{ZCP}$  – среднее значение ошибки в определении координаты  $z$ , (м).



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

Рисунок 3.15 – Схема измерения фактических координат соска.

Одним из этапов расчёта координат является определение расстояний от объекта съёмки до камер  $b_1$  и  $b_2$  при помощи уравнения (2.56). На основании данных об этих расстояниях определялась величина относительно ошибки  $\varepsilon_{\Delta r}$ :

$$\varepsilon_{\Delta r} = \frac{\Delta_r}{b} \cdot 100\%. \quad (3.9)$$

Для измерения фактических координат макета соска в плоскости был использован отвес, нить которого была пропущена через осевое отверстие соска. При этом длина нити подбиралась таким образом, чтобы груз отвеса находился в области видимости лазерного дальномера (рисунок 3.15).

Дальномер при помощи изготовленного кронштейна устанавливается на нижней перекладине боковой стенки и съёмной перекладине, устанавливаемой в проём выходной дверцы станка лабораторной установки. Благодаря кронштейну дальномер имеет возможность свободно перемещаться вдоль перекладин, фактически выполняющих роль координатных осей (рисунок 3.15). Применяемый при измерениях лазерный дальномер внесен в государственный реестр средств измерений (свидетельство об утверждении типа измерения CN.C.27.314.A №68555 от 29.12.2017) и фиксирует расстояние с точностью до 1,5 мм.

Измерение координаты  $z$  осуществлялось при помощи рулетки. Расстояние, соответствующее данной координате, также откладывалось от нижней перекладины боковой стенки, уровень которой был принят за нулевую отметку.

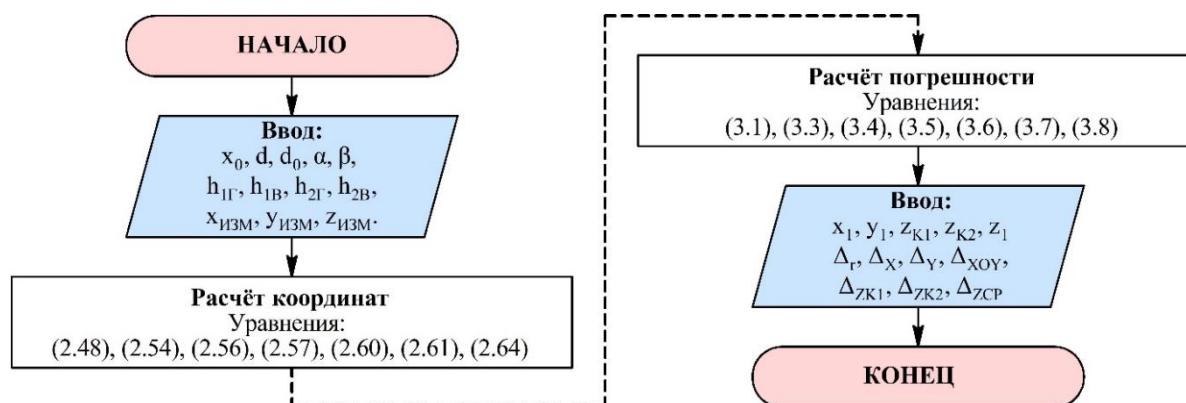


Рисунок 3.16 – Блок-схема алгоритма расчёта координат и погрешности.

На данном этапе проведения исследований положение макета соска на изображениях, получаемых с камер, отмечалось вручную (рисунок 3.11). В каждой точке расчёт координат и погрешности осуществлялись пять раз при различных углах разворота камер. Всего с учётом общего числа исследуемых точек было выполнено 270 измерений. Для проведения измерений в программном обеспечении был реализован алгоритм, блок-схема которого приведена на рисунке 3.16.

### 3.5. Методика расчёта угловых поправок, и методика двухступенчатого расчёта координат

Формулы для расчёта координат (2.48), (2.54), (2.56), (2.57), (2.60), (2.61), (2.64) содержат угловые величины, определяемые углом разворота камер. Кроме того, сюда входят параметры, определяемые геометрическими размерами станка и положением камер относительно него.

Предварительные испытания предложенного способа определения координат показали адекватность уравнений (2.48), (2.54), (2.56), (2.57), (2.60), (2.61), (2.64) и позволили сделать вывод о существенном влиянии на величину погрешности точности установки камер. Поэтому возникло предположение о том, что повысить точность в определении координат можно, введя в расчёт поправки на угол поворота камер, которые компенсируют неточности в работе поворотного механизма и установки камер относительно станка. Угловые поправки представляют из себя некоторую угловую величину, которая добавляется к углу поворота камер при расчёте координат.

На втором этапе экспериментальных исследований было изучено влияние угловых поправок на точность расчёта координат машинным зрением. Для расчёта угловых поправок в программном обеспечении ЭВМ был реализован алгоритм их подбора. Блок-схема данного алгоритма приведена на рисунке 3.17. Подбор поправок осуществляется в пределах отрезка  $[\Delta\alpha_{\min}; \Delta\alpha_{\max}]$  и  $[\Delta\beta_{\min}; \Delta\beta_{\max}]$  с шагом  $h\alpha$  и  $h\beta$  соответственно. Данные параметры устанавливаются вручную в настройках программы для работы с камерами машинного зрения (рисунок 3.9). На каждом шаге алгоритма расчётные координаты сравниваются с фактическими координатами. Таким образом, подбираются значения угловых поправок  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$ , обеспечивающих минимальную погрешность в определении координат.

При помощи данного алгоритма производился расчёт угловых поправок на угол поворота камер  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$  в каждой узловой точке рабочей области. В этих же точках, с учётом полученных значений поправок, рассчитывалась величина погрешности. Измерения погрешности и расчёт поправок в каждой точке проводились с пятикратной повторностью при различных углах разворота камер.

Подбор поправок осуществлялся в пределах отрезка  $[-5;5]$  градусов с шагом  $0,1$  градуса. При этом критерием подбора поправки был минимум полной погрешности по трём координатам, где координата  $z$  бралась как среднее относительно обеих камер (3.8).

Проведенные исследования показали, что использование угловых поправок значительно снижает погрешность в определении координат. Установлено, что в различных точках рабочей области величина поправки на угол поворота камер имеет несколько различное значение, а значит их можно рассматривать как функцию координат:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= f_1(x, y, z), \\ \Delta\beta &= f_2(x, y, z),\end{aligned}\tag{3.10}$$

где  $\Delta\alpha$  – поправка на угол поворота первой камеры,  $\Delta\beta$  – поправка на угол поворота второй камеры.

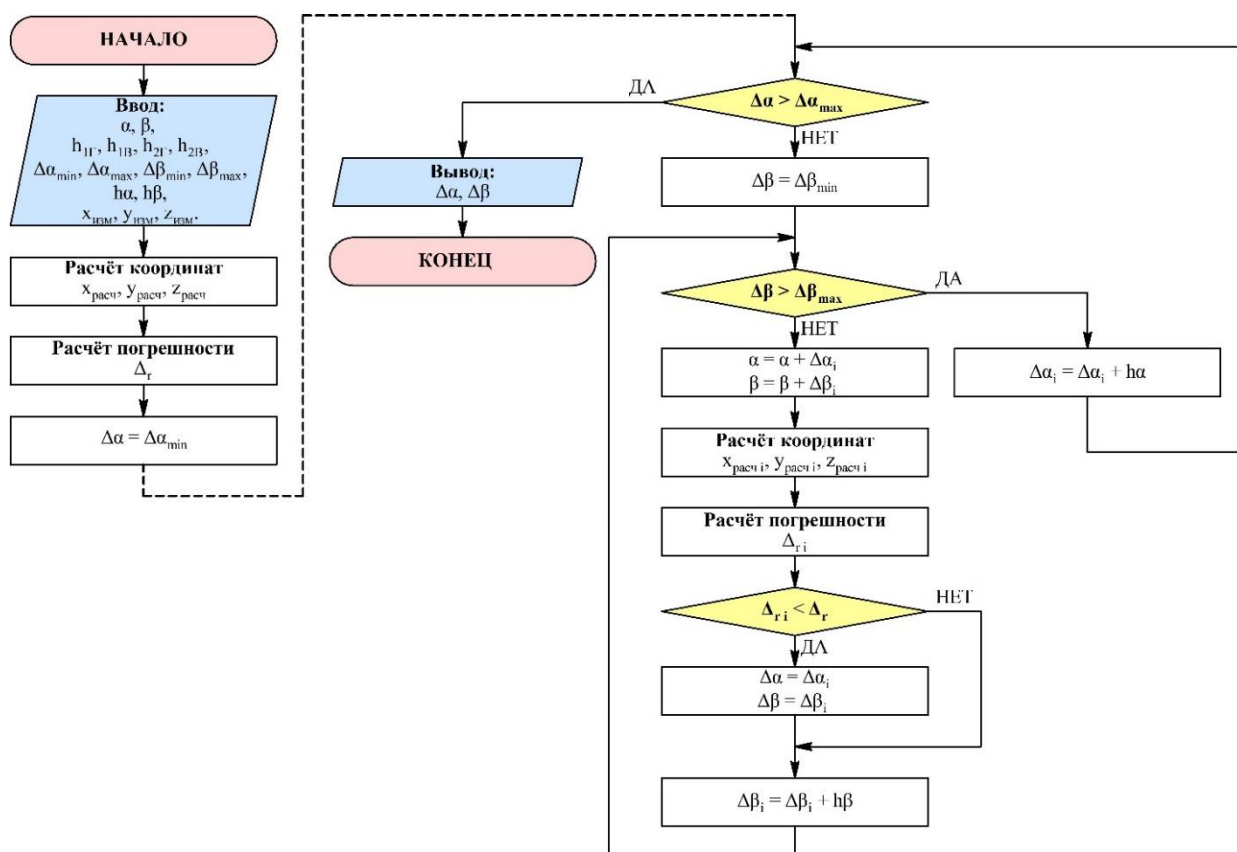


Рисунок 3.17. Блок-схема алгоритма подбора поправок.

Таким образом, применение функций (3.10) позволит автоматически вычислять и использовать при расчёте координат угловые поправки в любой точке рабочей области. Однако для этого необходимо определить явный вид этих функций.

Поиск явного вида функций (3.10) был рассмотрен с точки зрения задачи оптимизации, решение которой позволило построить математические модели в виде уравнений регрессии, описывающих распределение величины угловых поправок  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$  в пространстве. Данные модели были получены на основе экспериментальных данных трёхуровневого трёхфакторного эксперимента (рисунок 3.18), для проведения которого был определён критерий оптимизации, факторы, влияющие на него и уровни их варьирования (Приложение Г).

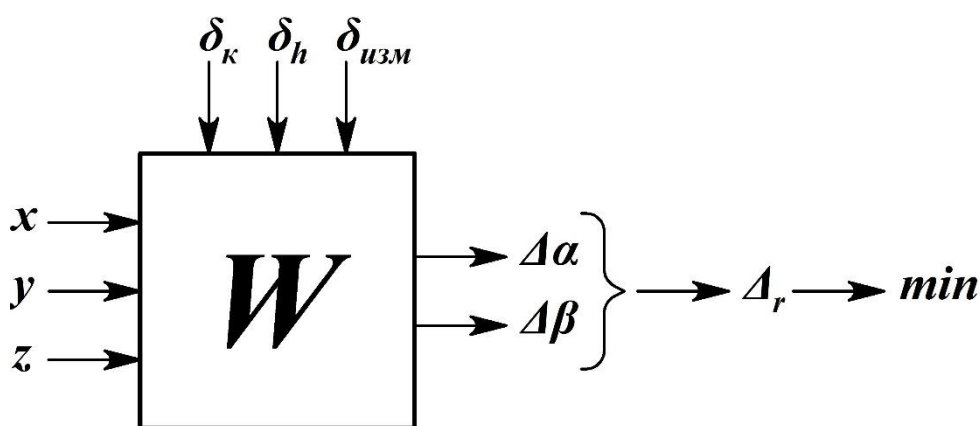


Рисунок 3.18. Факторы, определяющие распределение угловых поправок.

Критерием оптимизации в данном случае является величина погрешности в определении координат сосков вымени  $\Delta_r$ . Так как величина угловых поправок имеет пространственное распределение в пределах рабочей области, то в качестве факторов, влияющих на величину погрешности, были приняты координаты  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Уровни варьирования факторов были определены исходя из размеров и положения рабочей области в границах станка роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров (таблица 3.2). Сочетание факторов в каждой точке плана эксперимента фактически обозначало координаты точки, в которую помещался макет соска и производился расчёт поправок  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$ .

На рисунке 3.13 показаны границы рабочей области по высоте, соответствующие расстоянию от пола до основания соска. При проведении экспериментов координата  $z$  измерялась для конца соска. Кроме того, для удобства установки макета соска в заданную точку отсчёт высоты осуществлялся от нижних перекладин боковых стенок (рисунок 3.1). Поэтому значения уровней варьирования фактора  $X_3$  отличаются от схемы рабочей области, приведенной на рисунке 3.13, и составляют 0,255, 0,33 и 0,405 м соответственно.

При проведении факторного эксперимента расчёт поправок в каждой точке плана эксперимента был осуществлен в пределах  $[-3;3]$  с шагом 0,01 градуса.

Таблица 3.2. Уровни варьирования факторов и их кодированное обозначение.

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

На заключительном этапе экспериментальных исследований были произведены измерения аналогичные тем, методика которых описана в разделе 3.3. Однако в этом случае координаты рассчитывались в два этапа. На первом этапе вычислялись предварительные координаты макета соска, и при помощи полученных математических моделей  $\Delta\alpha = f_1(x, y, z)$  и  $\Delta\beta = f_1(x, y, z)$  осуществлялся расчёт поправок  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$ , соответствующих данной точке. После этого производился повторный расчёт координат и оценка погрешности. Подобные измерения были проведены во всех узловых точках рабочей области.

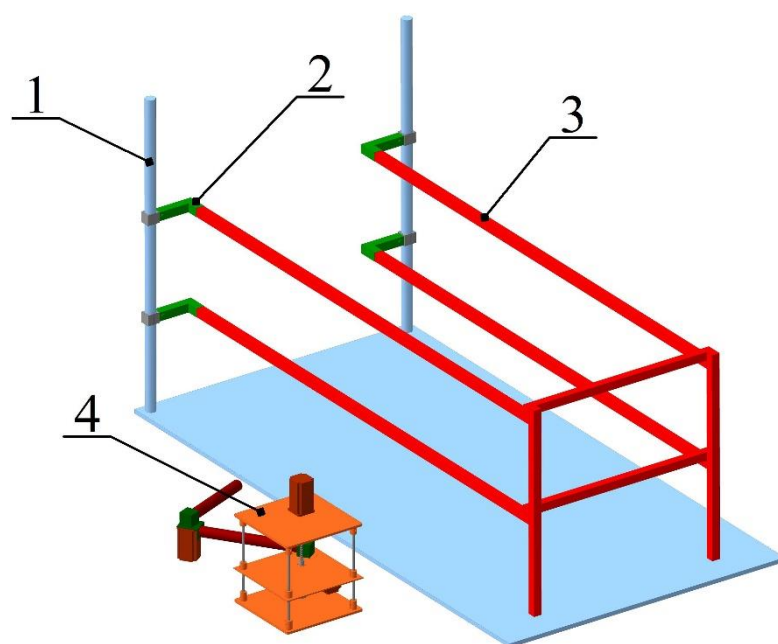
### 3.6. Апробация результатов кинематического исследования

Проведенное кинематическое исследование позволило определить примерные герметические размеры станка, позволяющие разметить в нём животное. Также определены длины рычагов манипулятора, которые позволят при

любом расположении животного в станке подвести рабочий орган в рабочую область. Кроме того, исходя из размеров станка и длин рычагов определено место, где должен располагаться манипулятор по отношению к станку (см. пункт 2.5).

Для проверки полученных результатов были проведены натурные испытания манипулятора лабораторной установки на базе АО УЧХОЗ «Чернореченский» Ивановской области.

Для проведения экспериментов в помещении для содержания животных двора №3 был смонтирован станок, размеры которого соответствуют результатам кинематического анализа, а также, согласно рассчитанным координатам, размещен манипулятор. Конструкция станка приведена на рисунке 3.19. Основная конструкция станка 3 при помощи кронштейнов 2 крепится к водопроводной сети коровника 1.



1 – водопроводная сеть коровника, 2 – кронштейн для крепления горизонтальных перекладин станка, 3 – перекладины станка, 4 – манипулятор.

Рисунок 3.19 – Станок для проведения натурных испытаний.

При проведении испытаний животное помещалось в станок, и при помощи ручного управления механическая рука манипулятора подводилась в рабочую

область, где располагается вымя коровы. При этом фиксировалось реакция животного на работу манипулятора, а также отслеживалась траектория перемещения механической руки с целью недопущения её столкновения с ногами и выменем коровы. Кроме того, оценивалась возможность манипулятора дотянуться в рабочую область при различных положениях коровы в станке.

### **3.7. Испытания машинного зрения в лабораторных и производственных условиях**

Для проведения производственных испытаний и оценки возможности применения предложенного способа определения координат сосков вымени в роботизированной установке преддоильной подготовки вымени предварительно были проведены лабораторные испытания с макетом коровы. Его внешний вид представлен на рисунке 3.20. Это также позволило проверить правильность расчёта положения камер, при котором в их поле зрения не попадают передние ноги и отсутствуют слепые зоны.

Расстояние между ногами макета коровы соответствуют размерам, использованным при проведении кинематического исследования, а размеры вымени определены исходя из среднестатистических данных о размерах вымени коров (рисунок 3.21). Конструкция подвеса вымени за счёт использования телескопического устройства позволяет изменять высоту его расположения.



Рисунок 3.20 – Габаритный макет коровы и вымени.

Для проведения лабораторных испытаний был изготовлен габаритный макет рабочего органа в виде кольца, который был закреплен на вспомогательном рычаге манипулятора (рисунок 3.5). Алгоритм расчёта координат в программном обеспечении был обобщен на четыре соска (рисунок 3.8). На основе данных о координатах всех сосков определялись координаты точки, в которую подводился габаритный макет рабочего органа. При этом расчётная точка совмещалась с центром кольца.

Оценка работы машинного зрения осуществлялась по успешному подведению габаритного макета в расчётную точку рабочей области, при котором все четыре соска попадают во внутреннюю область кольца.

Точка подведения габаритного макета рабочего органа определялась как центр прямоугольника, который был построен на касательных, проведенных к сечению сосков (рисунок 3.20). Её координаты определялись усреднением данных о координатах всех четырёх сосков:

$$\begin{aligned} x_{PACЧ} &= \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4}, \\ y_{PACЧ} &= \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4}, \\ z_{PACЧ} &= \frac{z_{K1}^1 + z_{K2}^1 + z_{K1}^2 + z_{K2}^2 + z_{K1}^3 + z_{K2}^3 + z_{K1}^4 + z_{K2}^4}{8}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

где  $x_{PACЧ}$ ,  $y_{PACЧ}$ ,  $z_{PACЧ}$  – координаты точки подведения габаритного макета,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  – координата  $x$  четырёх сосков;  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ ,  $y_4$  – координата  $y$  четырёх сосков;  $z_{K1}^1$ ,  $z_{K1}^2$ ,  $z_{K1}^3$ ,  $z_{K1}^4$  – координата  $z$  четырёх сосков относительно первой камеры;  $z_{K2}^1$ ,  $z_{K2}^2$ ,  $z_{K2}^3$ ,  $z_{K2}^4$  – координата  $z$  четырёх сосков относительно второй камеры.

Диаметр кольца был принят равным 244 мм. Эти размеры были определены исходя из размеров макета вымени с учётом величины погрешности машинного зрения в определении координат и погрешности позиционирования манипулятора. Ранее проведенные испытания манипулятора показали, что на различных режимах работы в среднем ошибка в позиционировании манипулятором лабораторной установки составляет 20 мм [163]. При этом в 80% случаев ошибка в расчёте

координат машинным зрением не превышает 10 мм. Обе погрешности были объединены геометрическим сложением, в результате чего получена величина полной погрешности, которая оказалась равной 22 мм:

$$\Delta_{\text{ПОЛН}} = \sqrt{(\Delta_{\text{МШ}})^2 + (\Delta_{\text{МАН}})^2}, \quad (3.12)$$

где  $\Delta_{\text{ПОЛН}}$  – полная погрешность,  $\Delta_{\text{МШ}}$  – погрешность машинного зрения;  $\Delta_{\text{МАН}}$  – погрешность манипулятора.

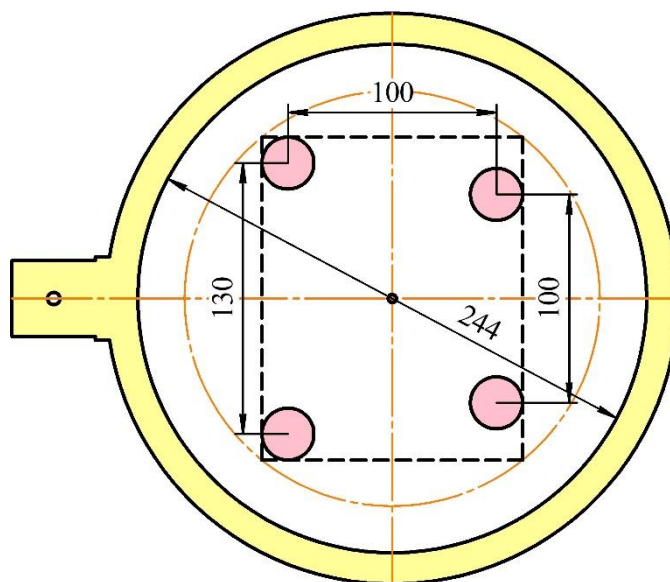
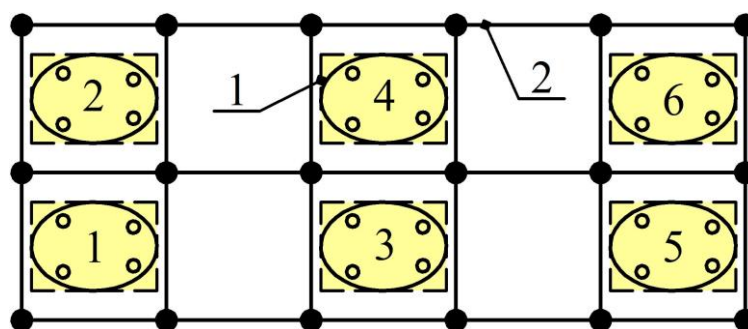


Рисунок 3.20 – Габаритный макет рабочего органа.

При проведении лабораторных испытаний макет коровы размещался в станке лабораторной установки. Макет вымени при этом устанавливался в трёх положениях, соответствующих высотам 45 см, 52,5 см и 60 см, измеряемых от пола. Для каждого положения вымени по высоте было рассмотрено 6 положений макета коровы в станке при которых макет вымени попадал в различные части рабочей области (рисунок 3.21).

Натурные испытания были проведены на базе сельскохозяйственного предприятия ООО «Бычок-1», расположенного в деревне Михеево Комсомольского района Ивановской области. На данном предприятии

беспривязным способом содержатся коровы голштинизированной чёрно-пёстрой породы в количестве 200 голов.



1 – положение макета вымени; 2 – границы рабочей области.

Рисунок 3.21 – Различные положения макета вымени.

Лабораторная установка была установлена в коровнике данного предприятия на площадке преддоильного накопителя, расположенного перед входом в доильный зал (рисунок 3.22). Для проведения натурных испытаний было отобрано несколько коров с различными параметрами вымени. Каждая корова помещалась в станок лабораторной установки, после чего были проведены испытания машинного зрения по методике, аналогичной методике лабораторных испытаний, описанных выше.



Рисунок 3.22 – Расположение лабораторной установки в коровнике хозяйства.

В каждом случае расчёт координат и подведение манипулятором габаритного макета рабочего органа в рабочую область осуществлялись с трёхкратной повторностью. При этом фиксировалось и попадание всех сосков вымени в границы кольца габаритного макета.

### **3.8. Выводы по главе**

- 1) Разработана лабораторная установка, моделирующая работу роботизированной установки преддоильной подготовки вымени и её системы позиционирования. Данная установка позволяет провести как лабораторные исследования, так и натурные испытания
- 2) На основе результатов главы 2, в частности уравнений (2.40) (2.48), (2.54), (2.56), (2.57), (2.60), (2.61), (2.64), разработано программное обеспечение для контроллера блока управления и ЭВМ. Данное программное обеспечение позволяет осуществлять расчёт координат сосков вымени, а также перемещать габаритный макет рабочего органа в рабочую область.
- 3) В качестве камер машинного зрения подобраны модули HBV-1615. Для данных камер разработан поворотный механизм, а их положение относительно станка лабораторной установки определено на основе результатов кинематического исследования.
- 4) Разработана методика расчёта угловых поправок, использование которых позволяет значительно повысить точность расчёта координат. На её основе составлена программа экспериментальных исследований, позволяющих получить функции  $\Delta\alpha = f_1(x, y, z)$  и  $\Delta\beta = f_1(x, y, z)$ , которые описывают распределение величины угловых поправок в пространстве, ограниченном размерами рабочей области.
- 5) Разработана методика лабораторных и натурных испытаний машинного зрения, позволяющих оценить возможность применения предложенного способа определения координат сосков вымени в роботизированной установке преддоильной подготовки вымени.

## ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1. Результаты экспериментальных исследований величины погрешности в различных точках рабочей области

При проведении экспериментов по оценке величины погрешности предложенного способа определения координат угол разворота первой камеры  $\alpha$  изменился в пределах от  $12,6^0$  до  $88,2^0$ , а угол разворота второй камеры  $\beta$  изменялся от  $12,6^0$  до  $86,6^0$ . При этом угол  $\varphi$ , образованный плоскостями, в которых расположен объектив камер (рисунок 2.19), изменялся от минимального значения  $41,4^0$  до максимального  $165,6^0$ . Данные диапазоны обеспечили попадание макета соска вымени в поле зрения камер при его любом расположении в пределах рабочей области (приложение Д).

В таблице 4.1 приведены результаты измерения погрешности в определении координат машинным зрением лабораторной установки во всех узловых точках рабочей области. По результатам измерений установлено, что среднее значение ошибки по всем трём координатам  $\Delta_r$  составляет 0,014 м. Данное значение сопоставимо с величиной погрешности в определении координаты  $x$  и в целом в определении координат в плоскости  $xOy$ , которые составляют 0,011 м и 0,013 м соответственно. Погрешность в определении координаты  $y$ , а также координаты  $z$  по отношению к обеим камерам имеет практически в два раза меньшие значения. Это, вероятно, связано с тем, что диапазон изменения данных координат при проведении измерений меньше. Также меньше абсолютная величина этих координат.

На рисунке 4.1 приведено распределение величины погрешности по узловым точкам рабочей области. Как видно из рисунка погрешности, менее 1 см имеют точки рабочей области, координаты которых расположены в пределах области  $1,244 \leq x \leq 1,644$  м. Это точки, расположенные ближе всего к камерам. При дальнейшем удалении макета от камер погрешность значительно увеличивается и превышает значения в 1,5 см. В точках последнего ряда рабочей области погрешность при определении координат увеличивается до 2 см.

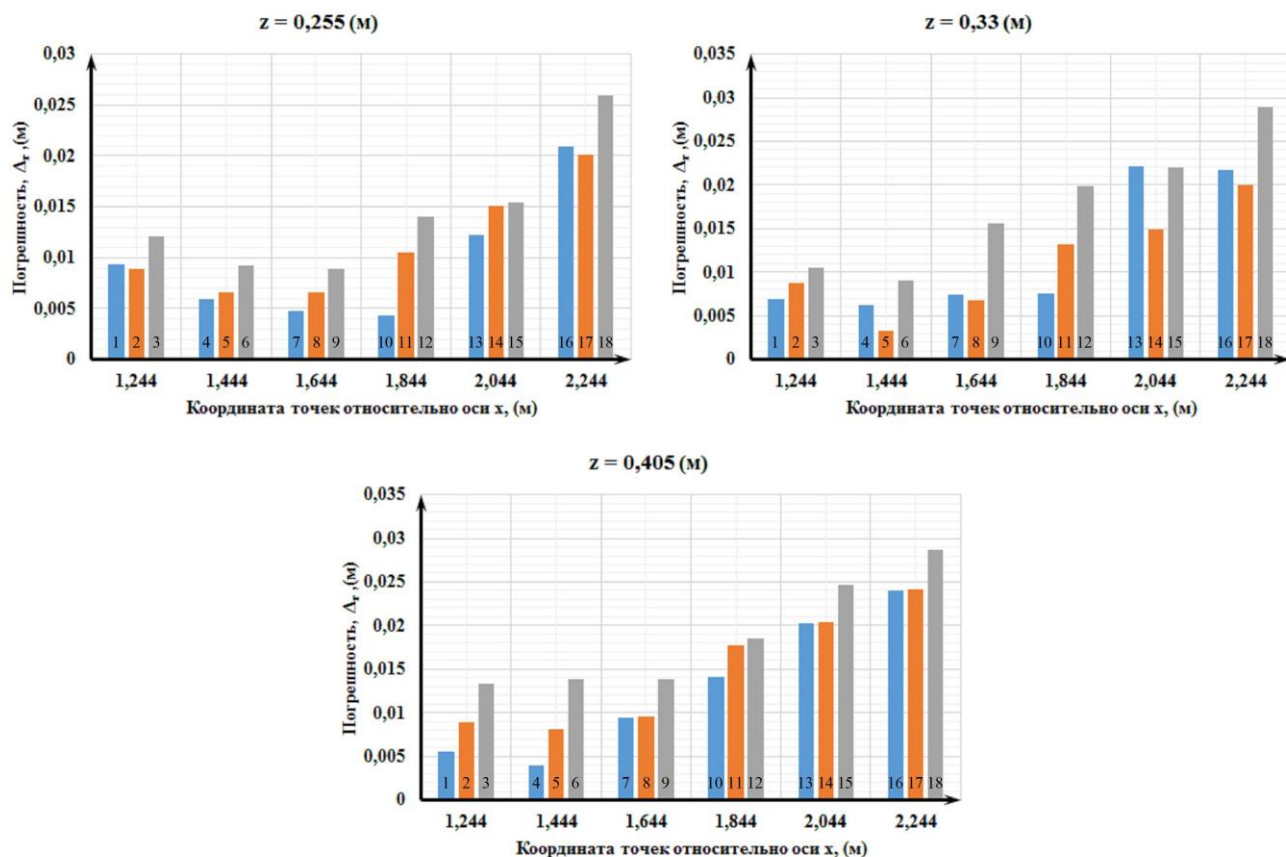


Рисунок 4.1 – Среднее значение погрешности в различных точках рабочей области без учёта поправок на угол поворота камер.

Алгоритм расчёта координат подразумевает вычисление на промежуточном этапе при помощи формул (2.56) расстояния от объекта съёмки до камер  $b_1$  и  $b_2$ . Согласно полученным данным, минимальное расстояние было от макета соска до камер составляло 0,7 м, а максимальное 1,8 м. На основе данных об этих расстояниях также были вычислены относительные погрешности в определении координат  $\epsilon_{\Delta r}$ .

Установлено, что среднее значение величины относительной погрешности определения координат  $\epsilon_{\Delta r}$  без использования поправок на угол поворота камер составляет 1,1 %, при этом максимальное значение относительной погрешности не превышает 3,2 %.

Анализ зависимости величины погрешности в определении координат машинным зрением лабораторной установки от угла  $\varphi$  (рисунок 2.19), равного сумме углов разворота камер, показал, что с увеличением данного угла

погрешность также имеет тенденцию к увеличению. Из графика, приведенного на рисунке 4.2, следует, что погрешность имеет наименьшее значение в случаях, когда угол  $\varphi$  находится в пределах от  $56^\circ$  до  $84^\circ$ . В этом случае углы разворота камер  $\alpha$  и  $\beta$  находятся в пределах  $19,8^\circ - 50,4^\circ$ .

Согласно аппроксимирующей линии, минимум погрешности приходится на угол  $\varphi$ , равный  $70^\circ$ . Данный угол достигается в случае, когда первая и вторая камеры имеют угол разворота  $\alpha$  и  $\beta$ , равный  $34^\circ - 36^\circ$ . Для данных углов расстояние от объекта съёмки до камер  $b_1$  и  $b_2$  находится в пределах  $0,7 - 1,2$  м. Данные расстояния соответствуют случаям, когда объект съёмки находится в первой половине рабочей области, в точках, координата  $x$  которых находится в пределах отрезка  $1,244 \leq x \leq 1,644$  м (рисунок 4.1). Эти точки соответствуют только 4-ому и 5-ому положению коровы в станке установки (рисунок 2.10 и 3.12).

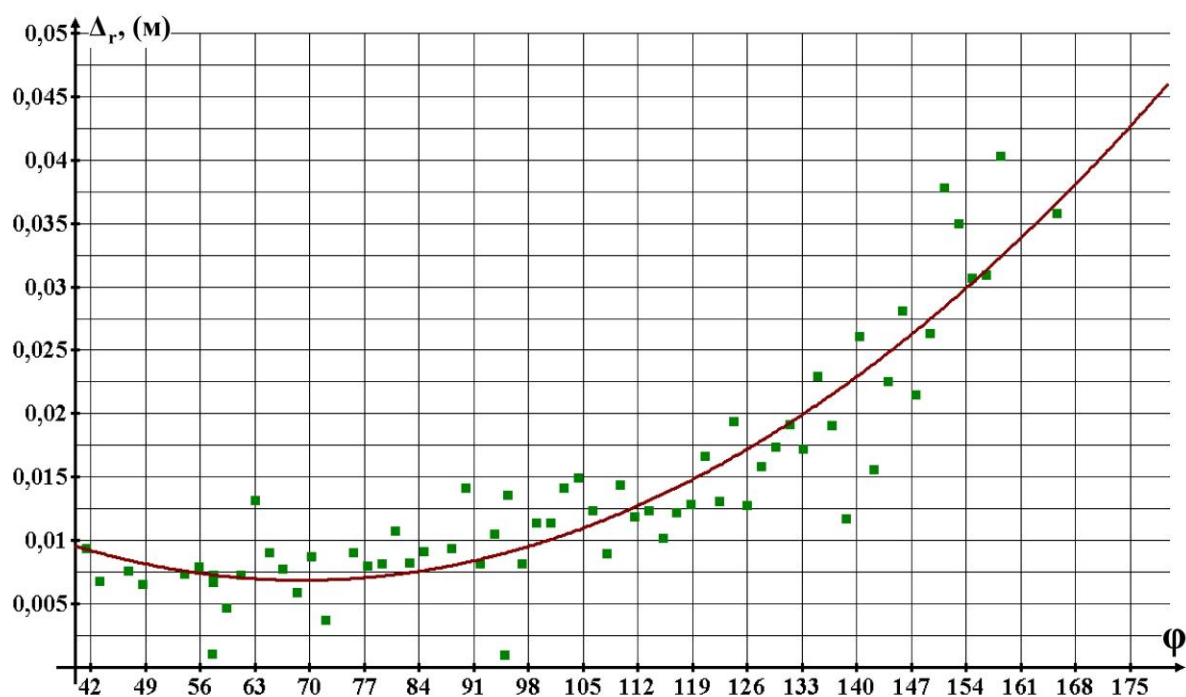


Рисунок 4.2 – Зависимость погрешности от угла, образованного плоскостями, в которых расположены матрицы камер.

С увеличением угла  $\varphi$  положение камер приближается к положению классической стереопары, когда главные оптические оси объектива камер

параллельны друг другу. Однако в силу большого базового расстояния это приводит к увеличению погрешности при расчёте координат. Поэтому наиболее целесообразно при работе с машинным зрением данного типа устанавливать камеры в положение, при котором их угол разворота обеспечивает наименьшую погрешность, а именно  $19,8^0 \leq \alpha \leq 50,4^0$  и  $19,8^0 \leq \beta \leq 50,4^0$ .

#### **4.2. Результаты экспериментальных исследований влияния угловых поправок на величину погрешности в различных точках рабочей области**

В результате проведенных исследований установлено, что для обеих камер машинного зрения во всех точках рабочей области можно подобрать угловую поправку на угол поворота камер. Данные поправки значительно снижают ошибку при расчёте координат.

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

При использовании данных поправок для расчёта координат среднее значение погрешности, рассчитанное по всем точкам рабочей области, снизилось практически в 3,8 раза и составляет 0,0036 м. Значительно снижаются и ошибки в определении отдельных координат (таблица 4.1). При этом 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.

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

Наибольшее изменение величины погрешности при использовании угловых

поправок наблюдается для координат  $x$  и  $y$ . Погрешность расчёта машинным зрением лабораторной установки координаты  $x$  составляет 0,001 м. Аналогичное значение имеет и погрешность расчёта координаты  $y$ . В результате также значительно снижается погрешность определения координат в плоскости  $\Delta_{xOy}$ , которая оказалась равной 0,0015 м.

Таблица 4.1 - Результаты измерения погрешности с учётом поправки и без неё.

| Параметр                                                                                | Расчёт погрешности без поправки | Расчёт погрешности с учётом поправки |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Погрешность определения координат, $\Delta_r$ , (м)                                     | 0,014                           | 0,0036                               |
| Погрешность определения координаты $x$ , $\Delta_x$ , (м)                               | 0,011                           | 0,0010                               |
| Погрешность определения координаты $y$ , $\Delta_y$ , (м)                               | 0,0058                          | 0,0010                               |
| Погрешность определения координаты $z$ относительно первой камеры, $\Delta_{zK1}$ , (м) | 0,0060                          | 0,0059                               |
| Погрешность определения координаты $z$ относительно второй камеры, $\Delta_{zK2}$ , (м) | 0,0032                          | 0,0036                               |
| Погрешность определения координаты $z$ , $\Delta_{ZCP}$ , (м)                           | 0,0032                          | 0,0032                               |
| Погрешность определения координат в плоскости $xOy$ , $\Delta_{xOy}$ , (м)              | 0,013                           | 0,0015                               |

Наибольший вклад в погрешность  $\Delta_r$  при определении координат машинным зрением лабораторной установки с использованием угловых поправок вносит погрешность определения координаты  $z$ , которая для обеих камер имеет значения, сравнимые со значениями, полученными при определении координат без использования угловых поправок (таблица 4.1).

Из таблицы 4.1 видно, что среднее значение погрешности расчёта координаты  $z$  имеет наименьшую величину в случае, когда она определяется как среднее значение по отношению к обеим камерам (выражение (3.8)). В этом случае погрешность  $\Delta_{ZCP}$  равна 0,0032 м как при использовании поправок, так и без их учёта.

Погрешность в определении координаты  $z$  по отношению к первой камере

$\Delta_{ZK1}$  имеет наибольшее среднее значение, которое равно 0,006 м также в обоих случаях, в то время как данная погрешность по отношению ко второй камере  $\Delta_{ZK2}$  имеет практически вдвое меньшую погрешность, равную 0,0032 м. Это может свидетельствовать о более точной установке второй камеры.

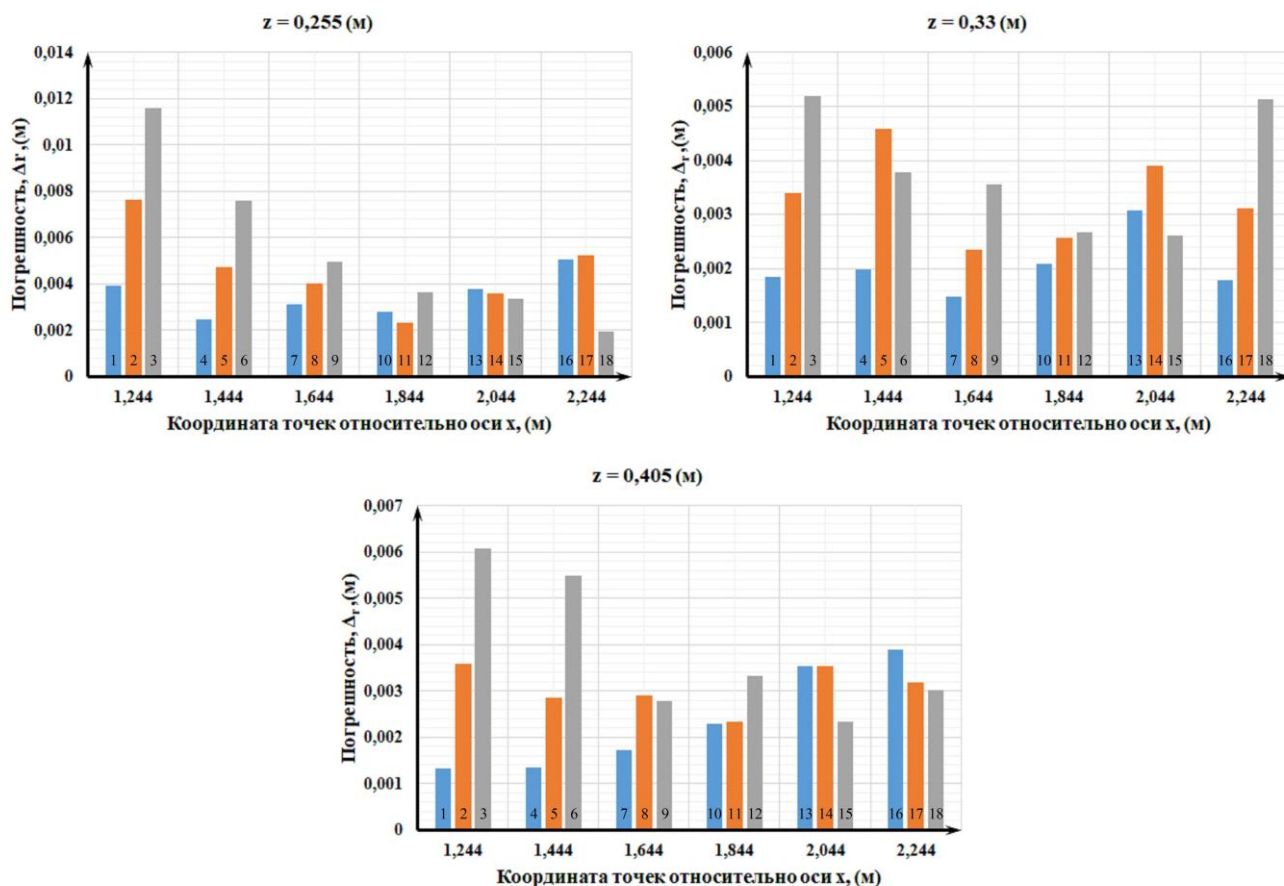


Рисунок 4.3 – Среднее значение погрешности в различных точках рабочей области с учётом поправок на угол поворота камер.

Снижение погрешности  $\Delta_r$  связано с тем, что угловые поправки позволяют учесть при расчёте координат неточности в развороте камер на заданный угол, а также компенсируют неточность их установки относительно станка.

Снижение погрешностей  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$  в определении координаты  $x$  и  $y$  при использовании угловых поправок, в первую очередь, связано с тем, что они компенсируют неточности положения главных оптических осей камер в плоскости при их развороте на заданный угол. Для улучшения показателей погрешности в определении координаты  $z$  необходимо повысить точность вертикальной

установки камер или ввести в алгоритм расчёта координат дополнительные поправки, компенсирующие неточности при установке камер.

На рисунке 4.3 приведено распределение среднего значения погрешности по узловым точкам рабочей области при использовании угловых поправок. Из рисунка видно, что практически во всех точках исследуемой области погрешность  $\Delta_r$  в случае использования поправок не превышает 1 см, независимо от углов разворота камер.

Таким образом, применение угловых поправок позволяет значительно повысить точность расчёта координат. При своем относительно небольшом значении угловые поправки увеличивают точность расчёта координат в несколько раз. Поэтому применение закона  $\Delta\alpha = f_1(x, y, z)$  и  $\Delta\beta = f_1(x, y, z)$ , описывающего распределение угловых поправок в пространстве, при расчёте координат позволит повысить точность предложенного метода для определения координат в роботизированной установке преддоильной подготовки вымени.

#### **4.3. Результаты исследования двухуровневого расчёта координат**

Проведенный трёхфакторный трёхуровневый эксперимент позволил получить данные о величине угловой поправки  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$  для обеих камер машинного зрения лабораторной установки в точках, определенных согласно плану эксперимента (Приложение Е). В результате статистической обработки экспериментальных данных получены математические модели  $\Delta\alpha = f_1(x, y, z)$  и  $\Delta\beta = f_1(x, y, z)$ , адекватно описывающие распределение угловых поправок в пределах рабочей области (Приложение Ж):

$$\Delta\alpha = 3,63 - 1,84 \cdot x - 3,60 \cdot y - 5,45 \cdot z + 1,25 \cdot x \cdot y + 2,76 \cdot x \cdot z, \quad (4.1)$$

$$\Delta\beta = -0,56 + 0,088 \cdot x + 1,04 \cdot y + 0,61 \cdot x \cdot y - 2,68 \cdot y^2, \quad (4.2)$$

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

Из уравнений (4.1) и (4.2) 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 4.4 приведены поверхности отклика уравнения (4.1) 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.

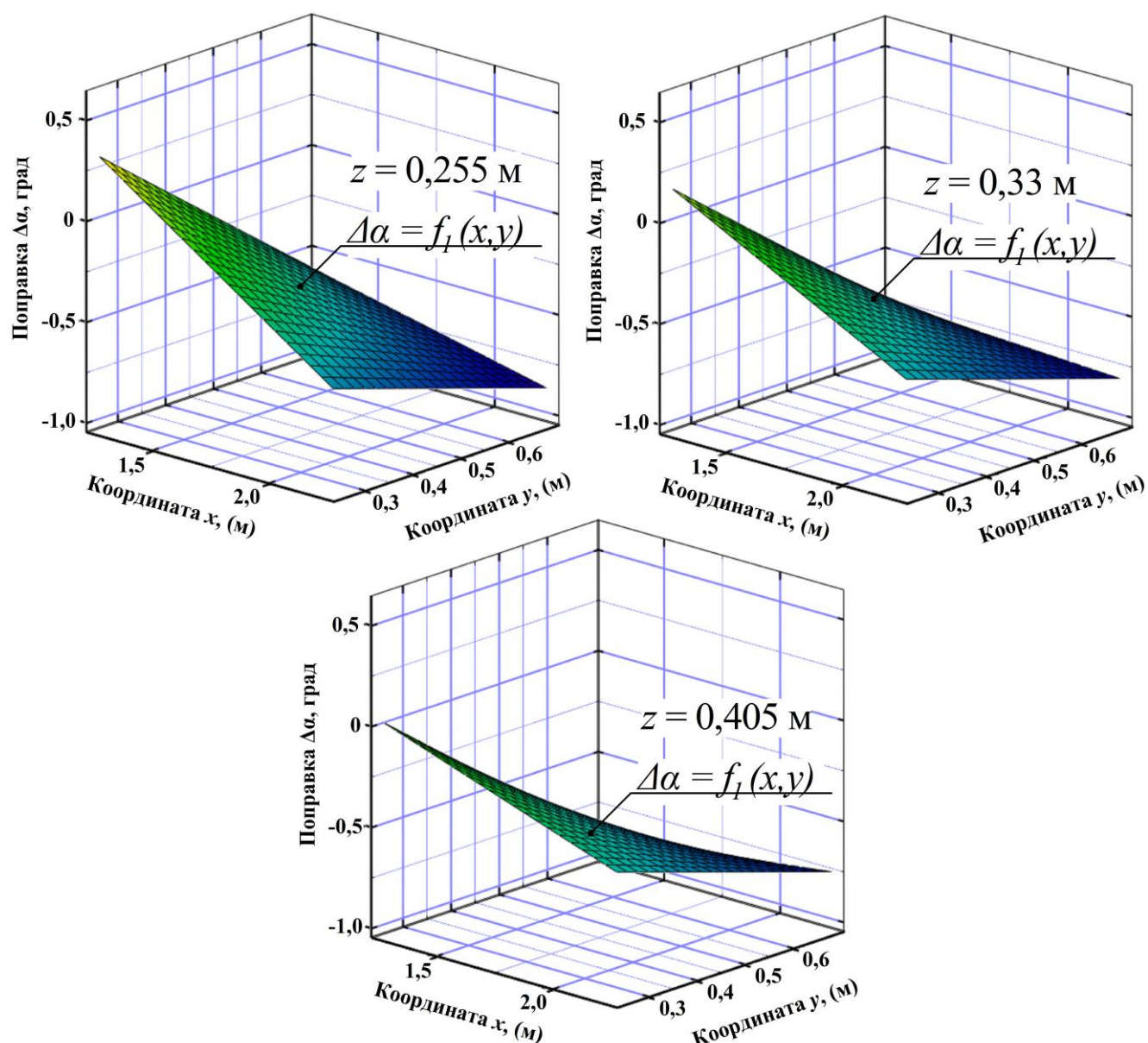


Рисунок 4.4. – Характер распределение угловой поправки  $\Delta\alpha$  первой камеры.

В пределах координат рабочей области угловая поправка первой камеры  $\Delta\alpha$  меняется от положительных значений до отрицательных. Причём с увеличением координаты  $x$  и  $y$  рабочей области, что соответствует удалению объекта съёмки от

первой камеры, значение поправки увеличивается в сторону отрицательных значений до величины порядка  $-1^0$ . Положительное значение угловая поправка для первой камеры имеет только в области 1, 2, 4, 5 и 7 узловых точек рабочей области (рисунок 3.12). В пределах этой же области существуют точки, для которых угловая поправка равна нулю.

С увеличением координаты  $z$ , значения угловой поправки  $\Delta\alpha$  первой камеры стремятся к отрицательным значениям. Так при  $z = 0,405$  м из рисунка 4.4 видно, что практически все значения  $\Delta\alpha$  находятся в отрицательной области с пределом изменения от  $0^0$  до  $-0,7^0$ .

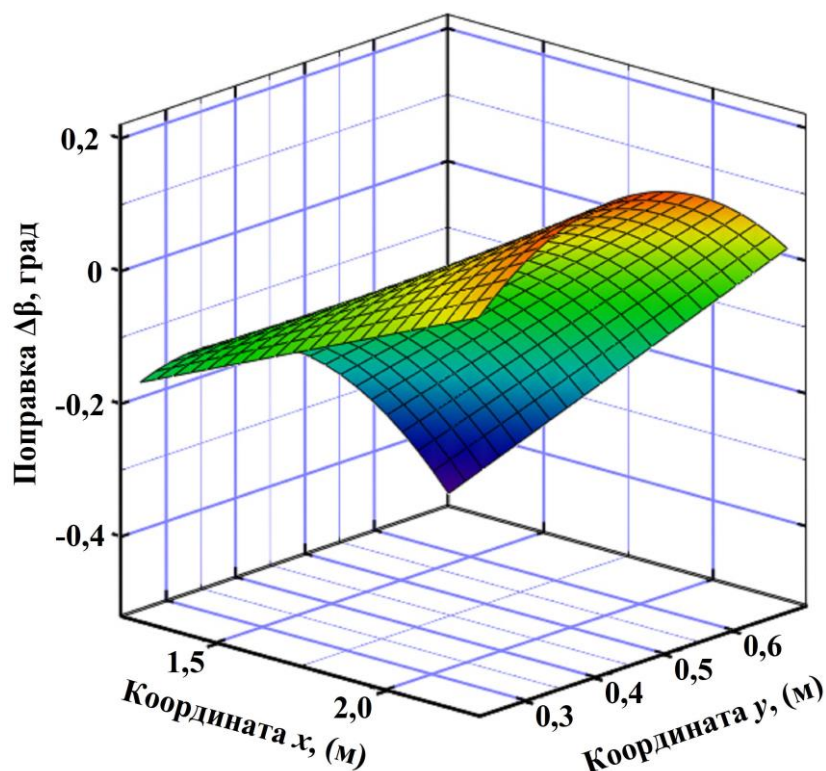


Рисунок 4.5 – Распределение угловой поправки  $\Delta\beta$  второй камеры.

На рисунке 4.5 приведена поверхность отклика для зависимости (4.2). Как видно из рисунка, большинство точек поверхности  $\Delta\beta = f_2(x, y)$  находятся в отрицательной области, то есть поправки имеют отрицательное значение. 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 составляет величину порядка  $-0,5^0$ .

Положительные значения угловая поправка  $\Delta\beta$  имеет в точках, наиболее удаленных от второй камеры, для которых координата  $x$  равна 2,244 м. Это точки рабочей области с номерами 16, 17 и 18 (рисунок 3.12). Здесь угловая поправка не превышает значения  $0,1^0$ . Таким образом, для угловой поправки  $\Delta\beta$  существует тренд, согласно которому при удалении точек рабочей области угловая поправка изменяется от отрицательных значений к положительным. Наиболее интенсивно это изменение происходит для ряда крайних точек рабочей области, с координатой  $y$  равной 0,694 м, расположенных ближе всего ко второй камере (точки 3, 6, 9, 12, 15, 18, рисунок 3.12).

Также распределение угловой поправки  $\Delta\beta$  для второй камеры характеризуется тем, что для центрального ряда точек рабочей области с координатой  $y$ , равной 0,449 м, эта поправка имеет меньшее значение, чем для крайних рядов точек рабочей области с координатой  $y$ , равной 0,249 м и 0,694 м.

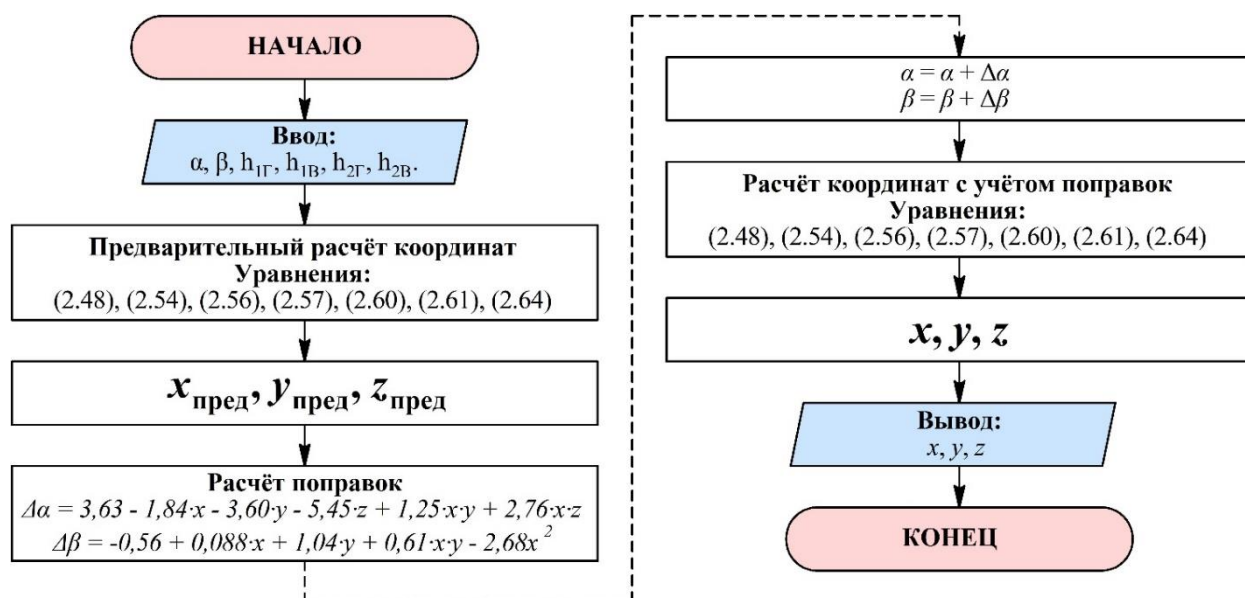


Рисунок 4.6. – Блок-схема алгоритма двухступенчатого расчёта координат.

Уравнения (4.1) и (4.2) были добавлены в программное обеспечение, и на их основе реализован алгоритм двухступенчатого определения координат. Блок-схема данного алгоритма приведена на рисунке 4.6.

На первом этапе данного алгоритма при помощи соотношений (2.48), (2.54), (2.56), (2.57), (2.60), (2.61), (2.64) вычисляются предварительные координаты точки

объекта съёмки  $x_{ПРЕД}$ ,  $y_{ПРЕД}$ ,  $z_{ПРЕД}$ . На основе полученных данных о координатах при помощи соотношений (4.1) и (4.2) вычисляются поправки на угол поворота камер  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$ , соответствующие данной точке. После этого осуществлялся второй этап расчёта координат с учетом полученных поправок на угол поворота камер и уравнений (2.48), (2.54), (2.56), (2.57), (2.60), (2.61), (2.64).

Таблица 4.2 – Результаты измерения погрешности с применением двухуровневого алгоритма.

| Параметр                                                                                 | Одноуровневый расчёт | Двухуровневый расчёт |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Погрешность определения координат, $\Delta r$ , (м)                                      | 0,014                | 0,0073               |
| Погрешность определения координаты $x$ , $\Delta x$ , (м)                                | 0,011                | 0,0046               |
| Погрешность определения координаты $y$ , $\Delta y$ , (м)                                | 0,0058               | 0,0031               |
| Погрешность определения координаты $z$ относительно первой камеры, $\Delta z_{K1}$ , (м) | 0,0060               | 0,0042               |
| Погрешность определения координаты $z$ относительно второй камеры, $\Delta z_{K2}$ , (м) | 0,0032               | 0,0036               |
| Погрешность определения координаты $z$ , $\Delta z_{CP}$ , (м)                           | 0,0032               | 0,0030               |
| Погрешность определения координат в плоскости $XOY$ , $\Delta x_{OY}$ , (м)              | 0,013                | 0,0061               |

При проведении экспериментов с двухуровневым расчётом координат угол разворота камер первой камеры  $\alpha$  менялся в пределах интервала от  $14,4^\circ$  до  $88,2^\circ$ , а для второй камеры  $\beta$  – в пределах интервала от  $14,4^\circ$  до  $84,6^\circ$ . Угол  $\varphi$ , равный сумме углов  $\alpha$  и  $\beta$ , а также соответствующий углу между плоскостями, в которых расположены объективы камер, изменялся в интервале от  $39^\circ$  до  $162^\circ$ . Данные значения в целом совпадают по порядку величины с углами разворота камер в экспериментах по оценке погрешности без использования угловых поправок.

Измерение погрешности во всех точках рабочей области с использованием алгоритма двухступенчатого расчёта координат показало, что его применение позволяет значительно снизить величину ошибки при расчёте координат

машинным зрением лабораторной установки. Среднее значение погрешности  $\Delta_r$  в определении координат, рассчитанное по всем исследуемым точкам рабочей области, составило 0,0073 м со средним квадратическим отклонением 0,0036 м. Среди всех 270 измерений погрешности  $\Delta_r$  в 80% случаев её величина не превышала 0,01 м. В отдельных измерениях максимальное значение погрешности составило 0,024 м (Приложение 3).

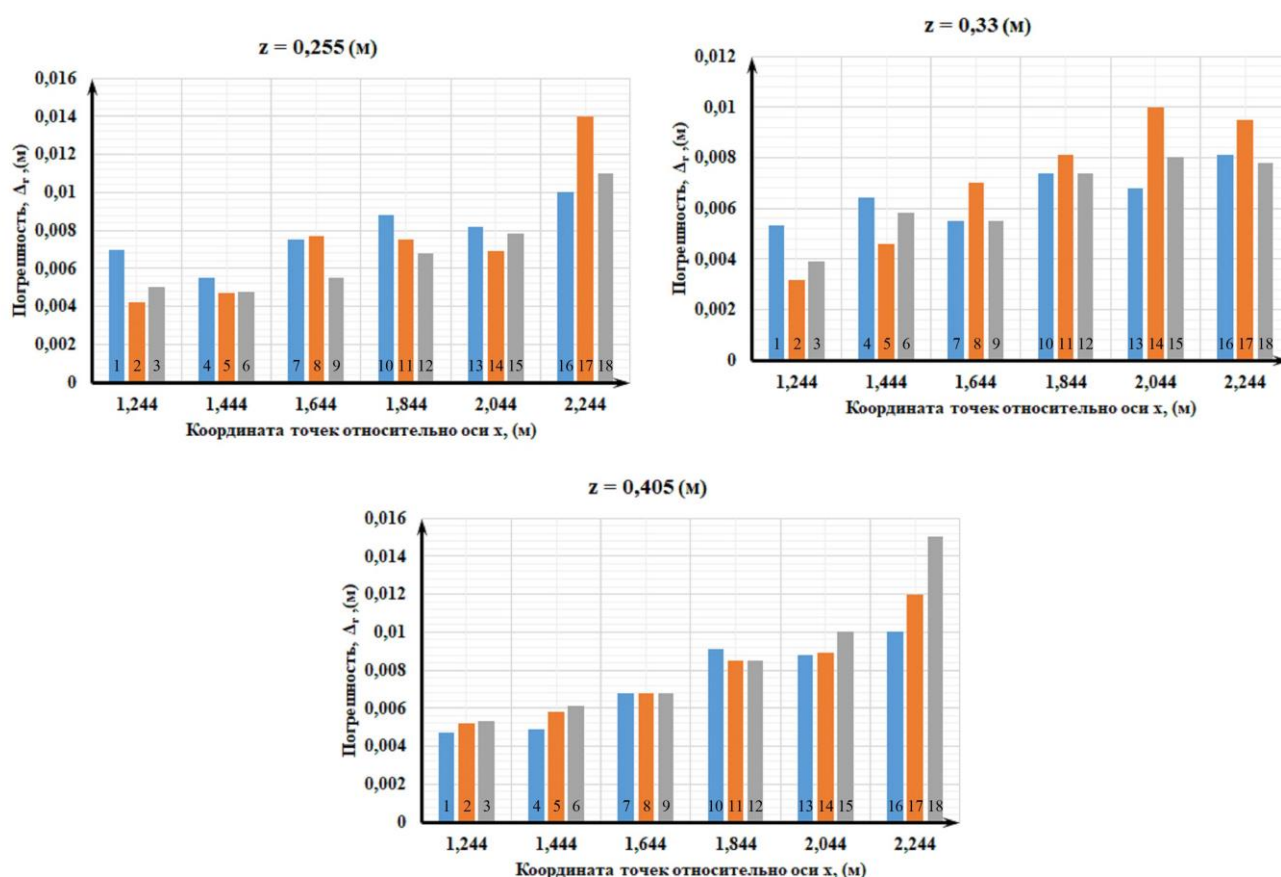


Рисунок 4.7 – Среднее значение погрешности в различных точках рабочей области при двухуровневом расчёте координат.

В таблице 4.2 приведены данные о величине полной погрешности  $\Delta_r$ , а так же данные о средних значениях погрешности по отдельным координатам в сравнении с результатами, полученными при одноуровневом расчёте. Из таблицы следует, что при использовании для расчёта координат уравнений (4.1) и (4.2) практически в два раза снижаются средние значения погрешностей  $\Delta_r$ ,  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$  и  $\Delta_{xoy}$ . При этом также, как и в предыдущем случае, имеют сравнимые показатели погрешности в

определении координаты  $z$  -  $\Delta_{ZK1}$ ,  $\Delta_{ZK2}$  и  $\Delta_{ZCP}$ .

Среднее значение относительной ошибки  $\varepsilon_{\Delta_r}$  при определении координат машинным зрением лабораторной установки при использовании двухуровневого расчёта составило 0,6 %, что тоже в два раза меньше аналогичной величины, полученной при расчёте координат без использования угловых поправок.

На рисунке 4.7 приведены графики, отражающие распределение погрешности в различных точках рабочей области при использовании двухуровневого расчёта координат. Как видно из рисунка 4.7, точки, в которых погрешность  $\Delta_r$  в определении координат не превышает 1 см, расположены в пределах  $1,244 \leq x \leq 2,044$ . Только в точках последнего ряда рабочей области среднее значение погрешности превышало значение в 1 см. При этом во всех точках плоскости с координатой 0,33 м погрешность в определении координат не превышает 1 см.

Таким образом, алгоритм двухуровневого определения координат позволяет расширить границы области, в точках которой погрешность  $\Delta_r$  при расчёте координат машинным зрением не превышает 1 см. Протяженность данной области относительно оси  $x$  в случае применения одноуровневого расчёта координат составляет 40 см, в то время как использование алгоритма с поправками, позволило получить область с протяженностью 80 см, что практически в два раза больше. Благодаря этому можно расширить область станка роботизированной установки преддоильной подготовки вымени, в пределах которой может быть зафиксировано животное для осуществления подготовительных операций, что, в свою очередь, позволяет снизить требования к размерам коров, для которых преддоильная подготовка вымени осуществляется при помощи данного робота.

Полученное значение погрешности достаточно для осуществления преддоильной подготовки вымени коров. При использовании данного способа определения координат сосков вымени в роботизированной установке преддоильной подготовки вымени погрешность  $\Delta_r$  величиной 1 см может быть нивелирована за счёт ворса роликовых щёток рабочего органа, а алгоритм подбора угловых поправок можно рассматривать как инструмент для настройки камер

машинного зрения робота.

#### 4.4. Результаты апробации кинематического анализа

Для анализа и проверки результатов кинематического исследования в АО Учхоз «Чернореченский» было отобрано 5 коров с различными размерами. Данные о животных, участвовавших в проведении измерений, приведены в таблице 4.3.

Отобранные коровы размещались в собранном станке согласно схеме, приведенной на рисунке 3.19. Размещение и внешний вид собранного станка приведены на рисунке 4.8. Непосредственно сбоку от станка размещался манипулятор, положение которого относительно станка определялось результатами кинематического исследования (рисунок 2.12).

Таблица 4.3 - Данные коров, используемых при проведении испытаний манипулятора.

| № п/п | Хозяйство                 | Порода коров  | № коровы | Масса коровы (кг) |
|-------|---------------------------|---------------|----------|-------------------|
| 1     | АО Учхоз «Чернореченский» | Черно-пёстрая | 2365     | 525               |
| 2     |                           |               | 2363     | 490               |
| 3     |                           |               | 2722     | 485               |
| 4     |                           |               | 2746     | 490               |
| 5     |                           |               | 2699     | 493               |

Проведенные испытания позволили сделать вывод о том, что определенные размеры станка позволяют разместиться в нём достаточно крупным животным, ограничивать их перемещение относительно осевой линии влево и вправо.

Коровы имеющие меньшие размеры, могут перемещаться в станке прижимаясь к задней, передней и боковым стенкам станка, согласно пяти схемам, определенным при проведении кинематического анализа (рисунок 2.13). Тем не менее, при проведении испытаний во всех случаях длины рычагов позволили беспрепятственно подводить механическую руку манипулятора в рабочую область. Для контроля захода механической руки в рабочую область был изготовлен специальный указатель. Результаты исследований представлены в таблице 4.4.



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

Рисунок 4.8 – Проведение испытаний в АО Учхоз «Чернореченский»

Таблица 4.4 - Результаты апробации кинематического анализа.

| №<br>п/п | Номер коровы | Подведение механической руки в рабочую область при различных положениях коровы в станке («+» – успешно, «-» – неуспешно) |   |   |   |   |
|----------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|
|          |              | 1                                                                                                                        | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1        | 2365         | +                                                                                                                        | + | + | + | + |
| 2        | 2363         | +                                                                                                                        | + | + | + | + |
| 3        | 2722         | +                                                                                                                        | + | + | + | + |
| 4        | 2746         | +                                                                                                                        | + | + | + | + |
| 5        | 2699         | +                                                                                                                        | + | + | + | + |

Отдельно следует отметить восприятие коровой манипулятора. При первых запусках и подведении манипулятора в рабочую область животные испытывали беспокойство и пытались наблюдать за его движениями. Так же некоторые коровы пытались перемещаться в области станка, удаляясь от движущейся механической руки манипулятора. В нескольких случаях животные пытались нанести удар ногой по механической руке манипулятора. Однако подобное поведение наблюдалось незначительное время. После нескольких повторений (5 – 10) подведения

манипулятора в рабочую область животные привыкали, а после дачи порции корма (200 – 300 г комбикорма) не отвлекались на движения механической руки манипулятора.

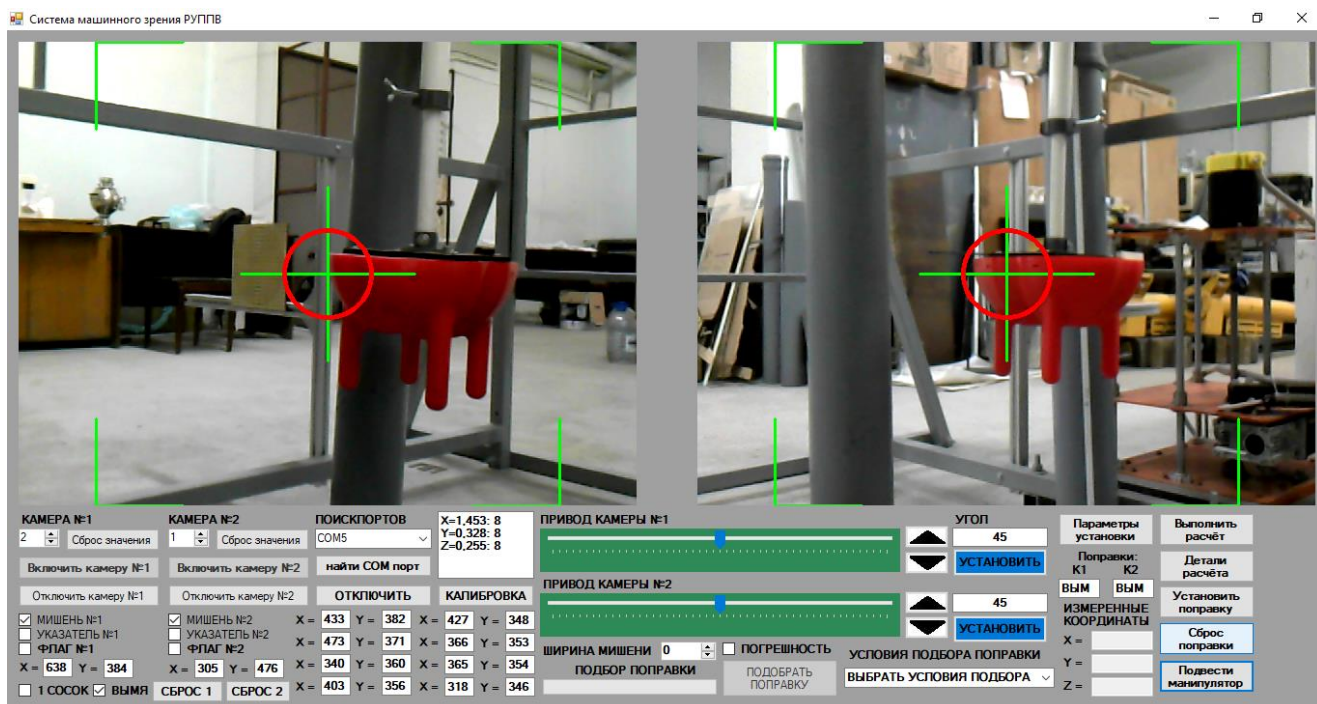


Рисунок 4.9 – Пример работы с программным обеспечением при работе с макетом коровы.

#### 4.5. Результаты лабораторных испытаний машинного зрения

В результате предварительно проведённых лабораторных испытаний машинного зрения лабораторной установки, выявлено, что предложенный способ определения координат сосков вымени позволяет определять координаты всех сосков при любом положении коровы в пределах станка установленных размеров.

Для всех положений макета коровы, охватывающих границы рабочей области, находилось угловое положение камер, при котором в поле их зрения попадали все четыре соска макета вымени. Это позволяет сделать вывод об отсутствии слепых зон у камер машинного зрения, а также подтверждает справедливость расчёта положения камер относительно станка.

В процессе проведения экспериментов было рассмотрено 18 положений макета вымени, а угол разворота обеих камер изменялся в пределах от  $30,6^0$  до

73,8°. Для 6 положений макета вымени на изображениях, получаемых с камер машинного зрения наблюдалось перекрытие одного соска другим, что можно видеть на рисунке 4.9. Перекрытие сосков было отмечено в тех случаях, когда макет вымени попадал в первую или вторую часть рабочей области согласно схеме, приведенной на рисунке 3.21. В этих положениях расстояние между камерами и макетом минимально (Приложение И).

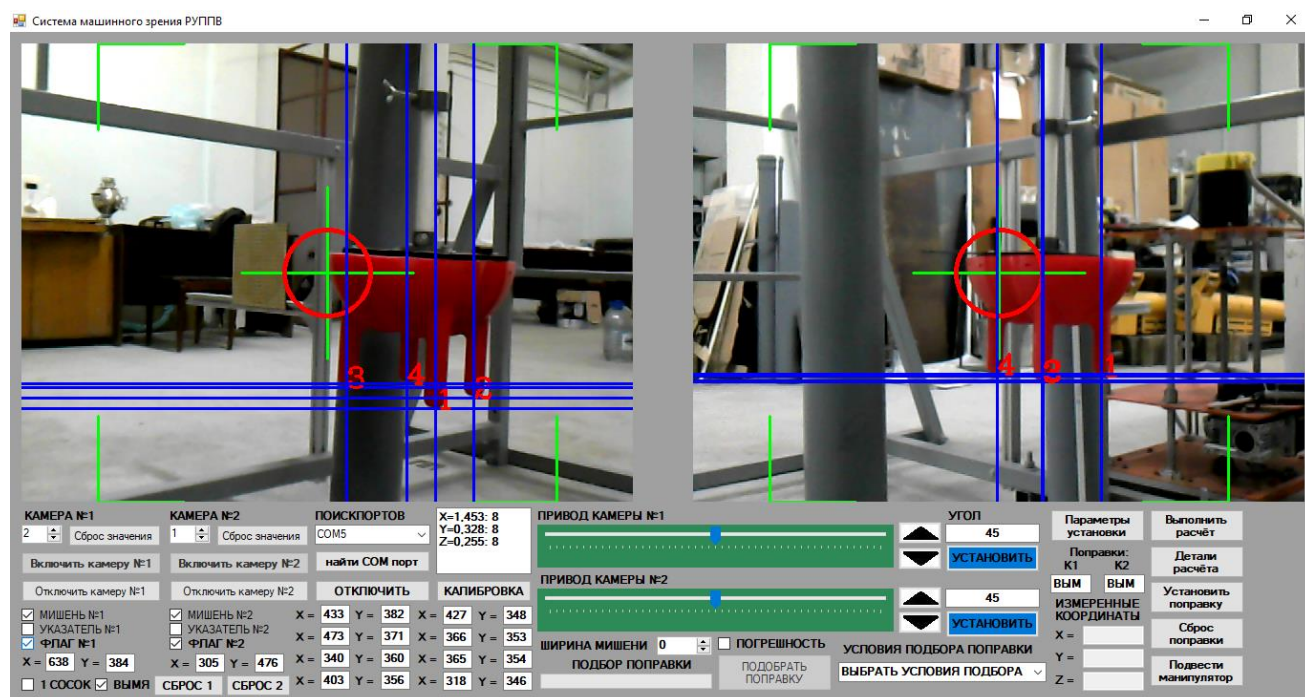


Рисунок 4.10 – Указатели, отмечающие положение сосков на изображении.

Однако даже в этих случаях удавалось осуществить расчёт координат точки наведения манипулятором габаритного макета рабочего органа. Перекрывание сосков друг другом говорит лишь о том, что оба соска имеют одинаковое смещение относительно центра изображения. Поэтому указатели, отмечающие положение перекрывающихся друг друга сосков, устанавливались практически в одну точку. В результате линии указателей совпадали, но их положение позволяло вычислить величину горизонтального и вертикального смещения для обоих сосков (рисунок 4.10).

Для остальных положений макета вымени в пределах рабочей области перекрытия сосков друг другом не наблюдалось или было частичным, что

позволяло отметить положения всех сосков на изображении при помощи указателя (рисунок 3.11).

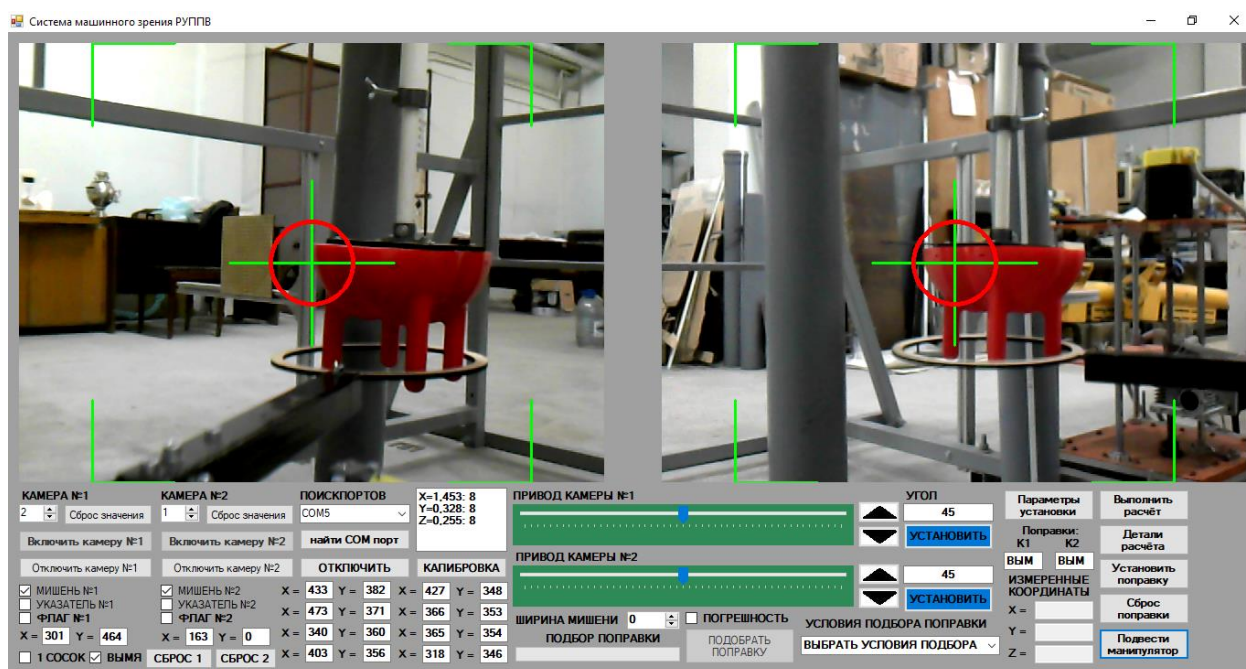


Рисунок 4.11 – Подведение манипулятором габаритного макета.

При проведении испытаний в лабораторных условиях было осуществлено 90 подведений габаритного макета рабочего органа в точку, координаты которой определены по данным, полученным при расчёте координат сосков вымени макета коровы (рисунок 4.11). Результаты экспериментальных данных приведены в приложении И. Анализ полученных данных показал, что только в трёх случаях координаты рабочей области были определены неверно, в результате чего подведение габаритного макета было неудачным – только 1 или 2 соска попадали во внутреннюю область кольца. Однако после калибровки положения камер по мишеням координаты точки наведения определялись верно, и со второй попытки габаритный макет успешно подводился в расчётную точку. В двух из трёх неудачных попыток макет вымени располагался в первой и второй части рабочей области (рисунок 3.21).

Следует также отметить, что в шести опытах наблюдалось задевание сосков внутренней кромкой кольца габаритного макета рабочего органа при его

подведении манипулятором в расчётную точку. Результаты данных опытов в целом были квалифицированы как успешные, так как все четыре соска попадали во внутреннюю область кольца габаритного макета рабочего органа.

Таким образом, процент успешных подведений габаритного макета рабочего органа в расчётную точку составил 97 %. С учётом только тех экспериментов, в которых наблюдалось подведение габаритного макета рабочего органа без касания сосков, аналогичный показатель составляет 90%.

#### 4.6. Результаты натурных испытаний машинного зрения

Для проведения натурных испытаний в хозяйстве были отобраны три коровы с различными размерам и формой вымени. Номера коров и результаты натурных испытаний приведены в таблице 4.5.

Проведенные натурные испытания показали, что предложенный способ определения координат сосков вымени может быть использован для наведения рабочего органа в рабочую область. Система машинного зрения верно определяет положение сосков вымени в пространстве, что подтверждается подведением манипулятором габаритного макета в расчётную точку (таблица 4.5).

Таблица 4.5 - Результаты натурных испытаний.

| №<br>п/п | Номер коровы | Подведение габаритного макета рабочего органа<br>(«+» – успешно, «-» – неуспешно) |   |   |
|----------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---|---|
|          |              | 1                                                                                 | 2 | 3 |
| 1        | 1313         | +                                                                                 | + | + |
| 2        | 278          | +                                                                                 | + | + |
| 3        | 923          | +                                                                                 | - | - |

Результаты натурных испытаний в целом согласуются с результатами, полученными в лабораторных условиях. Для любого положения коров в станке можно подобрать углы разворота камер, при которых все соски вымени попадают в поле зрения камер, что говорит об отсутствии слепых зон. Это подтверждает правильность расчёта положения камер машинного зрения относительно станка.

Тем не менее на изображениях вымени, получаемых с камер машинного

зрения лабораторной установки, при некоторых положениях коровы в станке наблюдалось полное или частичное перекрытие сосков вымени друг другом. Это можно видеть на рисунке 4.12, где приведен пример работы с программным обеспечением. Горизонтальное и вертикальное смещение таких сосков в данных случаях совпадает, поэтому, как и в лабораторных испытаниях, указатели, при помощи которых отмечается положение сосков на изображении, устанавливались практически в одну точку. Это позволило выполнить расчёт координат точки, в которую подводился габаритный макет рабочего органа.

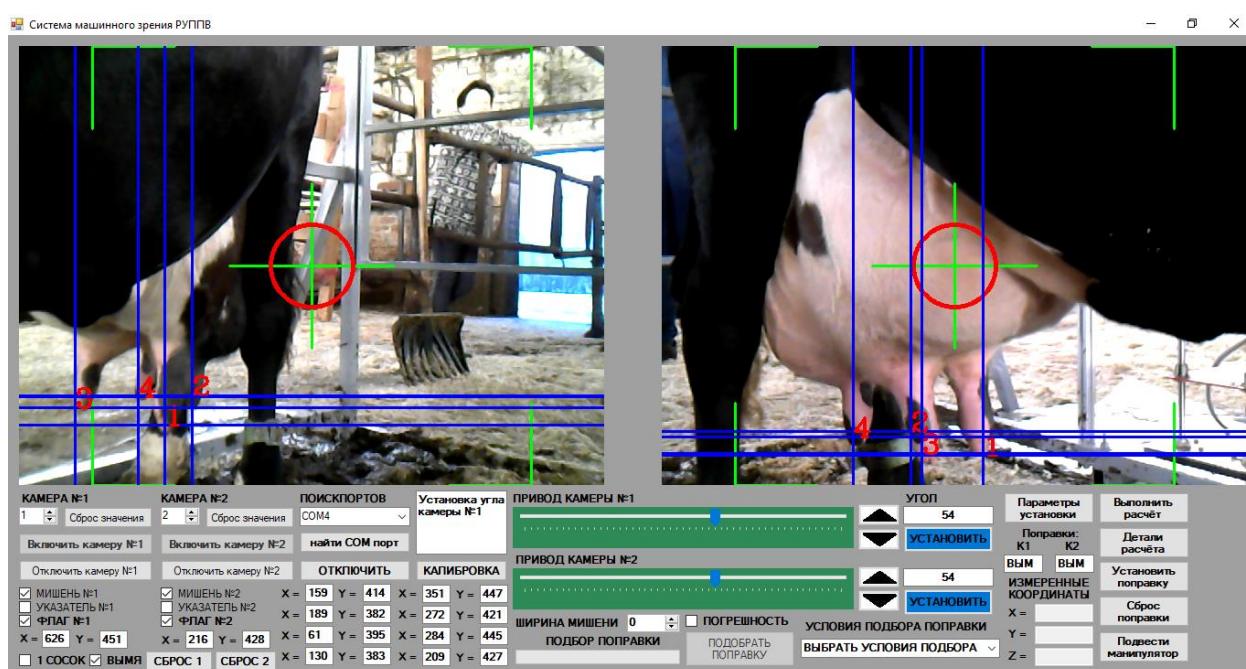


Рисунок 4.12 – Работа с программным обеспечением и расчёт координат сосков вымени.

Длины рычагов манипулятора и его положение относительно станка позволили подводить в расчётную точку габаритный макет рабочего органа, что подтверждает справедливость результатов кинематического анализа.

Всего при проведении производственных испытаний удалось выполнить 9 подведений габаритного макета в расчётную точку, из которых 7 были успешными. Таким образом, процент успешных подведений габаритного макета рабочего органа при проведении натурных испытаний оказался равным 78 %. Величина

данного показателя оказалась ниже значений аналогичного показателя, полученного в лабораторных условиях (Приложение К).

Неудачные попытки подведения габаритного макета рабочего органа в первую очередь были связаны с непрекращающимися перемещениями животного в станке, обусловленного несовершенством его конструкции. Влияние данного фактора может быть нивелировано за счёт использования станка, позволяющего ограничить перемещения животного, и реализации продолжительного периода приучения животных.

Анализ результатов натурных испытаний также позволил сформулировать следующие выводы.

Камеры машинного зрения находятся вне области станка, что позволяет исключить влияние на них воздействия агрессивной среды и в том числе животного. Использование двух камер позволяет просматривать обе стороны вымени, что может быть использовано для отслеживания повреждений вымени животных.

Предложенный способ определения координат сосков вымени может быть реализован на базе двух модульных камер, стоимость которых значительно ниже стоимости современных лазерных систем. Это также значительно упрощает обслуживание установки, оснащенной машинным зрением данного типа. Замену камер и их калибровку можно осуществить силами предприятия без привлечения сервисного специалиста.

Точность предложенного способа определения координат может быть повышена за счёт учёта дополнительных факторов, влияющих на точность модели расчёта координат. В частности, при расчёте необходимо учесть положение сосков на изображении. Кроме того, расчёт координат может быть динамическим при использовании дополнительной камеры, расположенной сверху и отслеживающей перемещение корпуса коровы относительно станка.

Проведенные натурные испытания позволяют сделать вывод о том, что роботизированная установка преддоильной подготовки вымени может работать и полуавтоматическом режиме, когда один из операторов работает с программным

обеспечением ЭВМ и указывает положение сосков. При этом программным комплексом производится расчёт координат, а манипулятор подводит рабочий орган для выполнения подготовительных операций. В этом случае число операторов доильного зала сохраняется, однако исключаются затраты труда на выполнение подмыва и массажа вымени, что также позволяет исключить влияние человеческого фактора на качество выполнения подготовительных операций.

#### **4.7. Выводы по главе**

- 1) Уравнения (2.48), (2.54), (2.56), (2.57), (2.60), (2.61), (2.64), полученные в результате теоретического исследования, адекватны и позволяют вычислять координаты сосков вымени.
- 2) Своё подтверждение по результатам экспериментальных исследований нашли уравнения (2.40), описывающие количество шагов, которые должны совершить шаговые двигатели манипулятора для наведения рабочего органа в расчётную точку.
- 3) По результатам экспериментальных исследований установлено, что среднее значение погрешности  $\Delta_r$  в определении координат предложенным способом составляет 0,014 м. Также установлена погрешность в определении отдельных координат, данные о которых приведены в таблице 4.1. Среднее значение относительной ошибки  $\varepsilon_{\Delta_r}$  в определении координат составляет 1,1 %.
- 5) Для точек рабочей области с координатой  $x$ , равной 1,244 – 1,644 м, среднее значение погрешности  $\Delta_r$  не превышает 1 см.
- 6) Использование угловых поправок на угол поворота камер значительно повышает точность метода определения координат и снижает погрешность  $\Delta_r$ . Среднее значение погрешности в определении координат  $\Delta_r$  с использованием угловых поправок составило 0,0036 м. Снижаются погрешности и в определении координат  $x$  и  $y$ , данные о которых приведены в таблице 4.1. Использование угловых поправок увеличивает границы области, в пределах которой погрешность  $\Delta_r$  не превышает 1 см.
- 7) На основе экспериментальных данных получены уравнения регрессии (4.1) и

(4.2), которые адекватно описывают распределение величины угловой поправки для точек, находящихся в пределах рабочей области. На основе данных уравнений построен алгоритм двухступенчатого определения координат (рисунок 4.6). Среднее значение погрешности  $\Delta_r$  при использовании данного алгоритма снизилось вдвое и составило 0,0061 м (таблица 4.2). Среднее значение относительной ошибки  $\varepsilon_{\Delta r}$  также уменьшилось практически в два раза и оказалось равным 0,6 %.

8) Проведенные натурные испытания в производственных условиях АО Учхоз «Чернореченский» и сельскохозяйственного предприятия ООО «Бычок-1» подтверждают результаты кинематического исследования. Установленные длины рычагов манипулятора, а также его положение относительно станка позволяют позиционировать рабочий орган относительно рабочей области при любом положении коровы в станке.

9) Установленное положение камер машинного зрения относительно станка позволяет просматривать вымя коровы и осуществлять расчёт координат сосков при любом её положении в станке, что подтверждается результатами лабораторных испытаний с макетом коровы и натурных испытаний в условиях сельскохозяйственного предприятия ООО «Бычок-1».

10) Процент успешных подведений манипулятором габаритного макета рабочего органа в лабораторных условиях составил 97 %, а при проведении натурных испытаний – 78 %. Снижение показателя успешности подведения габаритного макета связано с несовершенством конструкции станка лабораторной установки и отсутствием продолжительного периода приучения коров.

11) Для реализации предложенного способа определения координат в роботизированной установке преддоильной подготовки вымени необходимо решить задачу по автоматическому распознаванию изображений, поступающих с камер машинного зрения, и определению положения сосков на них.

## **РАЗДЕЛ 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ПРЕДДОИЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ВЫМЕНИ КОРОВ**

### **5.1. Исходные данные для расчета экономической эффективности применения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени**

Расчет экономической эффективности применения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени произведён на основе методик, согласно которым осуществляется сравнение экономических показателей исследуемого объекта с аналогичными показателями базового объекта.

В качестве базового объекта была рассмотрена конвейерно-кольцевая доильная установка типа «Карусель», обслуживание дойного стада на которой осуществляется при помощи ручного труда операторов доильного зала. Экономические показатели данной установки сравнивались с аналогичными показателями такой же конвейерно-кольцевой доильной установки, но работающей совместно с роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени [164].

Экономический эффект при использовании роботизированной установки преддоильной подготовки вымени достигается за счет снижения затрат труда при доении коров [164].

Для расчёта экономической эффективности применения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени была рассмотрена конвейерно-кольцевая доильная установка типа «Карусель», включающая 32 станка и дойное стадо в 800 голов, доение которого осуществляется два раза в день.

Оценка стоимости такой доильной установки осуществлялась при помощи каталогов производителей. В качестве исследуемой модели использовалась доильная установка, производимая ГК ООО «Агромолтехника», стоимость которой порядка 40000000 рублей [164].

Для обслуживания такой установки без применения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени необходимо 3 оператора доильного

зала [34, 155, 165].

Использование роботизированной установки преддоильной подготовки вымени для осуществления подготовительных операций перед доением позволяет сократить число операторов доильного зала до двух человек (рисунок 2.9).

Для определения необходимого количества роботизированных установок преддоильной подготовки вымени, обеспечивающих бесперебойную работу доильной установки, использованы результаты анализа их согласованной работы, которые приведены в разделе 2.2 (таблицу 2.2). Согласно данным таблицы 2.2, для организации поточного обслуживания животных на рассматриваемой доильной установке необходимо использовать 2 роботизированные установки преддоильной подготовки вымени.

В этом случае при ориентировочной стоимости роботизированной установки преддоильной подготовки в 1500000 рублей стоимость оснащения ими доильного зала составит 3000000 рублей.

Согласно результатам, полученным в разделе 2.2, применение роботизированной установки преддоильной подготовки вымени позволяет повысить пропускную способность и, как следствие, производительность доильной установки (рисунок 2.8). Рассмотрим случай, когда продолжительность рабочего цикла доильной установки составляет 660 с. В этом случае её производительность будет определяться формулой (2.14):

$$Q_{\text{БЕЗ РУППВ}} = \frac{3600}{660} \cdot 24 = 175 \frac{\text{коров}}{\text{час}}. \quad (5.1)$$

Согласно графику, приведенному на рисунке 2.8, при использовании роботизированной установки преддоильной подготовки вымени производительность доильной установки увеличивается на 2 %. В этом случае производительность доильной установки будет определяться равенством:

$$Q_{\text{С РУППВ}} = 175 \cdot 1,02 = 179 \frac{\text{коров}}{\text{час}}. \quad (5.2)$$

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета экономической эффективности применения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени.

| № П/П | Показатели                                               | Доильная установка без роботизированной установки преддоильной подготовки вымени | Доильная установка с роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени |
|-------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Число роботизированных установок (шт.)                   | 0                                                                                | 2                                                                               |
| 2     | Общая стоимость (руб.)                                   | 40000000                                                                         | 43000000                                                                        |
| 3     | Число станков доильной установки (шт.)                   | 32                                                                               | 32                                                                              |
| 4     | Поголовье (голов)                                        | 800                                                                              | 800                                                                             |
| 5     | Кратность доения (раз)                                   | 2                                                                                | 2                                                                               |
| 6     | Продолжительность доильного цикла доильной установки (с) | 660                                                                              | 647                                                                             |
| 7     | Производительность (коров/час)                           | 175                                                                              | 179                                                                             |
| 8     | Количество операторов (человек)                          | 3                                                                                | 2                                                                               |
| 9     | Продолжительность работы операторов в сутки (час.)       | 9,1                                                                              | 8,9                                                                             |
| 10    | Тарифная ставка (рублей/час)                             | 300                                                                              | 300                                                                             |
| 11    | Амортизационные отчисления (%)                           | 10                                                                               | 10                                                                              |
| 12    | Отчисления на техническое обслуживание и ремонт (%)      | 12,5                                                                             | 12,5                                                                            |
| 13    | Тариф на электроэнергию (руб/кВт·час)                    | 10,2                                                                             | 10,2                                                                            |
| 14    | Тариф на воду (руб./м³)                                  | 30                                                                               | 30                                                                              |

Продолжительность работы операторов на доильной установке определим при помощи формулы:

$$t_{оп} = \frac{N_{пог}}{Q} \cdot n_{кр.д}, \quad (5.3)$$

где  $t_{оп}$  – время, затрачиваемое операторами на выполнение ручных операций (час.),  
 $N_{пог}$  – обслуживаемое на доильной установке поголовье (голов),  $Q$  –

производительность доильной установки (коров/час),  $n_{кр,д}$  – кратность доения (доек/день).

Тогда для базового исполнения доильного зала и случая с использованием роботизированной установки преддоильной подготовки вымени с учётом (5.3) получим:

$$t_{ОП\ БЕЗ\ РУППВ} = \frac{800}{175} \cdot 2 = 9,1 \text{ часа}, \quad (5.4)$$

$$t_{ОП\ С\ РУППВ} = \frac{800}{179} \cdot 2 = 8,9 \text{ часа}. \quad (5.5)$$

Обобщенные исходные данные для расчета экономической эффективности сведем в таблицу 5.1.

## 5.2. Методика расчёта экономической эффективности применения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени

Экономический эффект от снижения затрат ручного труда при использовании роботизированной установки преддоильной подготовки вымени можно определить при помощи формулы:

$$\mathcal{E}_{год} = [(C_{БЕЗ\ РУППВ} + H_k \cdot K_{БЕЗ\ РУППВ}) - (C_{С\ РУППВ} + H_k \cdot K_{С\ РУППВ})] \cdot G_{год} - (Z_{С\ РУППВ} - Z_{БЕЗ\ УППВ}), \quad (5.5)$$

где:  $\mathcal{E}_{год}$  – годовой экономический эффект за счет снижения ручных затрат (руб.);  $G_{год}$  – число доек в год (шт.);  $H_k$  – нормативный коэффициент капитальных вложений,  $H_k = 0,1$ ;  $C_{С\ РУППВ}$  – себестоимость дойки одной коровы, проводимой на доильной установке с использованием роботизированной установки преддоильной подготовки вымени (руб.);  $C_{БЕЗ\ РУППВ}$  – себестоимость дойки одной коровы, проводимой на доильной установке без использования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени (руб.);  $Z_{С\ РУППВ}$  – затраты на дойку одной коровы, проводимой на доильной установке с использованием

роботизированной установки преддоильной подготовки вымени (руб.);  $Z_{БЕЗ\ РУППВ}$  – затраты на дойку одной коровы, проводимой на доильной установке без использования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени (руб.);  $K_{С\ РУППВ}$  – удельные капитальные вложения в производственные фонды при доении на доильной установке без использования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени ( $\frac{руб. \cdot год}{доек}$ );  $K_{БЕЗ\ РУППВ}$  – удельные капитальные вложения в производственные фонды при доении на доильной установке без использования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени ( $\frac{руб. \cdot год}{доек}$ ).

Удельные капитальные затраты в производственные фонды в обоих случаях определяются соотношениями:

$$K_{С\ РУППВ} = \frac{Z_{С\ РУППВ}}{G_{год}}, \quad (5.6)$$

$$K_{БЕЗ\ РУППВ} = \frac{Z_{БЕЗ\ РУППВ}}{G_{год}}, \quad (5.7)$$

где  $Z_{С\ РУППВ}$  – общая стоимость доильной установки и роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени (руб.);  $Z_{БЕЗ\ РУППВ}$  – стоимость доильной установки (руб.).

Для расчета годового объема доек использовалась следующая формула:

$$G_{год} = 365 \cdot N_{ПОГ} \cdot n_{КР.Д.}, \quad (5.8)$$

Себестоимости дойки одной коровы для доильной установки как с применением роботизированной установки преддоильной подготовки вымени, так и без неё определяются при помощи следующих формул:

$$C_{С\ РУППВ} = \frac{(t_{ОПС\ РУППВ} + \Delta t) \cdot B_{ч} \cdot n_{ОПС\ РУППВ} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot n_{СМ}}{N_{ПОГ} \cdot n_{КР.Д.}}, \quad (5.9)$$

$$C_{\text{БЕЗ РУППВ}} = \frac{(t_{\text{ОП БЕЗ РУППВ}} + \Delta t) \cdot B_{\text{Ч}} \cdot n_{\text{ОП БЕЗ РУППВ}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot n_{\text{СМ}}}{N_{\text{ПОГ}} \cdot n_{\text{КР.Д.}}}, \quad (5.10)$$

где  $t_{\text{ОП С РУППВ}}$  – время, затрачиваемое операторами на выполнение операций в доильном зале при использовании роботизированной установки преддоильной подготовки вымени (час.);  $t_{\text{ОП БЕЗ РУППВ}}$  – время, затрачиваемое операторами на выполнение операций в доильном зале без применения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени (час.);  $\Delta t$  – время, затрачиваемое операторами на подготовительные операции до начала смены и в конце (час.);  $B_{\text{Ч}}$  – тарифная ставка операторов (руб.);  $n_{\text{ОП С РУППВ}}$  – количество операторов, обслуживающих доильную установку с применением роботизированной установки преддоильной подготовки вымени (чел.),  $n_{\text{ОП БЕЗ РУППВ}}$  – количество операторов, обслуживающих доильную установку без применения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени (чел.),  $n_{\text{СМ}}$  – количество смен (шт.);  $K_1$  – коэффициент, учитывающий подмену операторов в выходные и больничные дни,  $K_1 = 1,1 \dots 1,3$ ;  $K_2$  – коэффициент, учитывающий начисления на заработную плату (премиальные, стажевые и другие),  $K_2 = 1,25$ ;  $K_3$  – коэффициент, учитывающий налоговые отчисления с фонда оплаты труда,  $K_3 = 1,302$ .

Затраты на дойку одной коровы определяются формулой:

$$З = S_A + S_{\text{ТОР}} + S_M + S_{\text{Э}}, \quad (5.11)$$

где  $S_A$  – амортизационные затраты (руб.);  $S_{\text{ТОР}}$  – затраты на техническое обслуживание и ремонт (руб.);  $S_M$  – затраты на расходные материалы;  $S_{\text{Э}}$  – затраты на электроэнергию (руб.).

Для расчета амортизационных расходов использована следующая формула:

$$S_A = \frac{Z \cdot \delta}{100}, \quad (5.12)$$

где  $\delta$  – нормативы амортизационных отчислений,  $\delta = 10 \%$ .

При этом расчет затрат на техническое обслуживание и ремонт определяется соотношением:

$$S_{ТОР} = \frac{Z \cdot \gamma}{100}, \quad (5.13)$$

где  $\gamma$  – нормативы отчислений на техническое обслуживание и ремонт,  $\gamma = 12,5 \%$ .

Применим формулу (5.11) для обоих рассматриваемых случаев и запишем её с соответствующими обозначениями:

$$З_{С\text{ РУППВ}} = S_{А\text{ С РУППВ}} + S_{ТОР\text{ С РУППВ}} + S_{М\text{ С РУППВ}} + S_{Э\text{ С РУППВ}}, \quad (5.14)$$

$$З_{БЕЗ\text{ РУППВ}} = S_{А\text{ БЕЗ РУППВ}} + S_{ТОР\text{ БЕЗ РУППВ}} + S_{М\text{ БЕЗ РУППВ}} + S_{Э\text{ БЕЗ РУППВ}}. \quad (5.15)$$

Вычитая из выражения (5.14) выражение (5.15), получим общую формулу для расчета разности затрат на дойку одной коровы:

$$З_{С\text{ РУППВ}} - З_{БЕЗ\text{ РУППВ}} = \Delta S_A + \Delta S_{ТОР} + \Delta S_M + \Delta S_{Э}. \quad (5.16)$$

Величины  $\Delta S_A$ ,  $\Delta S_{ТОР}$ ,  $\Delta S_M$ ,  $\Delta S_{Э}$  в уравнении (5.16) введены для упрощения расчетов и вычисляются при помощи следующих соотношений:

$$\Delta S_A = (S_{А\text{ С РУППВ}} - S_{А\text{ БЕЗ РУППВ}}), \quad (5.17)$$

$$\Delta S_{ТОР} = (S_{ТОР\text{ С РУППВ}} - S_{ТОР\text{ БЕЗ РУППВ}}), \quad (5.18)$$

$$\Delta S_M = (S_{М\text{ С РУППВ}} - S_{М\text{ БЕЗ РУППВ}}), \quad (5.19)$$

$$\Delta S_{Э} = (S_{Э\text{ С РУППВ}} - S_{Э\text{ БЕЗ РУППВ}}). \quad (5.20)$$

Выражение для расчета амортизационных затрат (5.17) также упростим, используя формулу (5.12):

$$\Delta S_A = \frac{\delta}{100} \cdot (Z_{С\text{ РУППВ}} - Z_{БЕЗ\text{ РУППВ}}). \quad (5.21)$$

Аналогично с учетом (5.13) преобразуем выражение (5.18):

$$\Delta S_{TOP} = \frac{\gamma}{100} \cdot (Z_{C \text{ РУППВ}} - Z_{БЕЗ \text{ РУППВ}}). \quad (5.22)$$

Величина  $\Delta S_M$  представляет разность в затратах материалов на доение при использовании роботизированной установки преддоильной подготовки вымени и без неё. Основным расходным материалом в этом случае является моющая жидкость (при расчетах в качестве моющей жидкости рассматривалась вода; тариф на её расход приведен в таблице 5.1). Вода расходуется и при работе доильной установки без роботизированной установки преддоильной подготовки вымени и при совместной с ней работе. Однако при использовании установки для подготовки вымени к доению расход будет выше на некоторую величину  $\Delta S_{C \text{ РУППВ}}$ . Поэтому формулу (5.19) можно представить в следующем виде:

$$\Delta S_M = (S_{M \text{ C РУППВ}} - S_{M \text{ БЕЗ РУППВ}}) = G_{\text{зод}} \cdot \Delta V_{C \text{ РУППВ}} \cdot \Pi_{\text{ВОДА}}, \quad (5.23)$$

где  $\Delta V_{C \text{ РУППВ}}$  – дополнительный расход воды, возникающий при использовании роботизированной установки преддоильной подготовки вымени ( $\text{м}^3$ );  $\Pi_{\text{ВОДА}}$  – тариф на расход воды ( $\text{руб}/\text{м}^3$ ).

Величина  $\Delta S_{\text{Э}}$  отражает дополнительные затраты на электроэнергию, возникающие при использовании роботизированной установки преддоильной подготовки вымени и её значение можно определить при помощи формулы:

$$\Delta S_{\text{Э}} = (S_{\text{Э C РУППВ}} - S_{\text{Э БЕЗ РУППВ}}) = \frac{\Delta P_{C \text{ РУППВ}} \cdot t}{3600} \cdot G_{\text{зод}} \cdot \Pi_{\text{ЭЛ}}, \quad (5.24)$$

где  $\Delta P_{C \text{ РУППВ}}$  – дополнительный расход электроэнергии, возникающий при использовании роботизированной установки преддоильной подготовки вымени ( $\text{кВт} \cdot \text{ч}$ );  $\Pi_{\text{ЭЛ}}$  – тариф на расход электроэнергии ( $\text{руб.}/\text{кВт} \cdot \text{ч}$ );  $t$  – время работы роботизированной установки преддоильной подготовки вымени (с).

### 5.3. Результаты расчета экономической эффективности применения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени

Расчёт экономической эффективности применения роботизированной установки преддоильной установки вымени приведен в приложении Л, а результаты расчёта сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2. Результаты расчёта экономической эффективности.

| № П/П | Показатели                                                                                                                                  | Единица измерения                                   | Значение показателя |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------|
| 1     | Количество доек (за год)                                                                                                                    | <i>шт.</i>                                          | 584000              |
| 2     | Удельные капитальные затраты в производственные фонды для доильной установки с роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени   | $\frac{\text{руб.} \cdot \text{год}}{\text{дойка}}$ | 73,63               |
| 3     | Удельные капитальные затраты в производственные фонды для доильной установки без роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени | $\frac{\text{руб.} \cdot \text{год}}{\text{дойка}}$ | 68,49               |
| 4     | Величина разности затрат на амортизацию                                                                                                     | <i>руб.</i>                                         | 300000              |
| 5     | Величина разности затрат на техническое обслуживание и ремонт                                                                               | <i>руб.</i>                                         | 375000              |
| 6     | Величина стоимости дополнительных затрат на расходные материалы (за год)                                                                    | <i>руб.</i>                                         | 87600               |
| 7     | Величина стоимости дополнительных затрат на электроэнергию (за год)                                                                         | <i>руб.</i>                                         | 223380              |
| 8     | Разница в затратах на доение с использованием роботизированной установки преддоильной подготовки вымени и без неё                           | <i>руб.</i>                                         | 985980              |
| 8     | Себестоимость дойки одной коровы с использованием роботизированной установки преддоильной подготовки вымени                                 | <i>руб.</i>                                         | 7,25                |
| 9     | Себестоимость дойки одной коровы без использования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени                                | <i>руб.</i>                                         | 11,1                |
| 10    | Годовой экономический эффект от снижения ручных затрат                                                                                      | <i>руб.</i>                                         | 962244              |
| 11    | Срок окупаемости роботизированной установки преддоильной подготовки вымени                                                                  | <i>год</i>                                          | 3,1                 |

Согласно полученным результатам, годовой экономический эффект при использовании роботизированной установки преддоильной подготовки вымени, достигаемый за счёт снижения трудозатрат при производстве молока, при

стоимости установки в 1,5 млн. руб. составляет 962244 руб. В этом случае срок окупаемости данной установки составляет 3,1 года.

Таким образом, применение роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров для выполнения в автоматическом режиме подмыва и массажа вымени на конвейерно-кольцевых доильных установках типа «Карусель» экономически оправдано.

#### **5.4. Выводы по главе**

- 1) Экономическая эффективность применения роботизированной установки преддоильной подготовки коров для выполнения подготовительных операций перед доением коров на конвейерно-кольцевых доильных установках типа «Карусель» достигается за счёт снижения затрат труда при производстве молока.
- 2) В результате сравнительного экономического анализа установлено, что годовой экономический эффект при использовании данной установки составляет 962244 руб., а срок её 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; методика измерения погрешности определения координат сосков вымени машинным зрением; методика подбора угловых поправок; методики лабораторных и натурных 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  $\Delta\beta = f_1(x, y, z)$ , 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 0,0061 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 натурных испытаний – 78 %.

6) 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Состояние, проблемы и перспективы производства молока в России / В. М. Зимняков, Г. В. Ильина, Д. Ю. Ильин, А. М. Зимняков // Техника и технологии в животноводстве. – 2023. – № 1(49). – С. 4-10. – DOI 10.22314/27132064-2023-1-4. – EDN GIOССР.
2. Панова, Е. О. Увеличение объемов производства молока как направление повышения продовольственной безопасности Российской Федерации / Е. О. Панова // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2020. – Т. 10, № 9-1. – С. 38-48. – DOI 10.34670/AR.2020.12.49.004. – EDN PQYTWWT.
3. Молочная отрасль-2017: [справочник] / сост.: А. С. Белов, А. А. Воронин, М. Э. Жебит [и др.] – Москва: Национальный союз производителей молока, 2017. – 380 с.
4. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2022: Р32 Стат. сб. / Росстат. – М., 2022. – 1122 с.
5. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2010: Р32 Стат. сб. / Росстат. – М., 2010. – 996 с. ISBN 978-5-89476-310-1
6. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2005: Р32 Стат. сб. / Росстат. – М., 2006. – 982 с.
7. Об утверждении рекомендаций по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям здорового питания: приказ министерства здравоохранения Российской Федерации от 19 августа 2016 г. № 614 – Доступ из справ. Правовой системы «КонсультантПлюс».
8. Российский статистический ежегодник. 2022: Стат.сб./Росстат. – Р76 М., 2022 – 691 с.
9. Российский статистический ежегодник. 2017: Стат.сб./Росстат. – Р76 М., 2017 – 686 с. ISBN 978-5-89476-440-5
- 10) Российский статистический ежегодник. 2009: Стат.сб./Росстат. – Р76 М., 2009. – 795 с. ISBN 978-5-89476-283-8
10. Морозов, Н. М. Направления развития техники для механизации и

автоматизации животноводства / Н. М. Морозов // Техника и технологии в животноводстве. – 2022. – № 2(46). – С. 11-17. – DOI 10.51794/27132064-2022-2-11. – EDN WHVEFB.

12. Направления механизации и автоматизации животноводства / Н. М. Морозов, Ю. А. Цой, В. В. Кирсанов [и др.] // Техника и технологии в животноводстве. – 2022. – № 1(45). – С. 92-102. – DOI 10.51794/27132064-2022-1-92. – EDN KFASFQ.

13. Сравнительная оценка импортных и отечественных комплексов машин для молочных ферм / Ю. А. Цой, И. Э. Мильман, Р. А. Баишева [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2015. – № 6. – С. 39-42. – EDN TXOWZB.

14. Внедрение новых технологий для автоматизации процессов животноводства / Н. Л. Лопаева, О. П. Неверова, А. Р. Ахметьянова, П. В. Шаравьев // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2022. – № 3(95). – С. 166-170. – DOI 10.37670/2073-0853-2022-95-3-166-170. – EDN XFYUIR.

15. Сироткин, И. А. Нейросетевая система управления манипулятором доильного робота / И. А. Сироткин, С. А. Воротников // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2018. – № 1(41). – С. 205-215. – EDN XWLKKL.

16. Переход сельского хозяйства к цифровым, интеллектуальным и роботизированным технологиям / Е. А. Скворцов, Е. Г. Скворцова, И. С. Санду, Г. А. Иовлев // Экономика региона. – 2018. – Т. 14, № 3. – С. 1014-1028. – DOI 10.17059/2018-3-23. – EDN XYUCDR.

17. Скворцов, Е. А. Кадровый аспект внедрения робототехники в сельском хозяйстве / Е. А. Скворцов // Аграрный вестник Урала. – 2016. – № 2(144). – С. 99-105. – EDN VNTIQR.

18. Стратегия машинно-технологического обеспечения производства продукции животноводства на период до 2020 года / Ю. А. Иванов, Н. М. Морозов, Л. М. Цой [и др.] ; Российская академия сельскохозяйственных наук, Отделение механизации, электрификации и автоматизации, Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский и проектно-

технологический институт механизации животноводства (ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии). – Подольск : Всероссийский научно-исследовательский институт механизации животноводства РАСХН, 2009. – 85 с. – EDN SGNCXR.

19. Симонов, Г. А. Преимущества роботов перед традиционной технологией доения коров / Г. А. Симонов, В. Е. Никифоров, О. Б. Филиппова // Наука в центральной России. – 2020. – № 4(46). – С. 54-62. – DOI 10.35887/2305-2538-2020-4-54-62. – EDN MVUPUS.

20. Доровских, В. И. Исследование качественных показателей использования доильных роботов / В. И. Доровских, В. С. Жариков // Наука в центральной России. – 2019. – № 6(42). – С. 35-42. – DOI 10.35887/2305-2538-2019-6-35-42. – EDN KSLESI.

21. Доровских, В. И. Исследование влияния кратности доения коров роботами на их продуктивность / В. И. Доровских, В. С. Жариков // Наука в центральной России. – 2019. – № 5(41). – С. 69-77. – DOI 10.35887/2305-2538-2019-5-69-77. – EDN NNXXLT.

22. Влияние применения доильной робототехники на качество молока / Е. А. Скворцов, Е. Г. Скворцова, А. А. Орешкин, В. Н. Потехин // Агропродовольственная политика России. – 2016. – № 9(60). – С. 44-47. – EDN WWIEOJ.

23. Роботизированная технология доения коров повышает эффективность производства молока / Г. А. Симонов, В. Е. Никифоров, Д. А. Иванова, О. Б. Филиппова // Наука в центральной России. – 2020. – № 5(47). – С. 74-81. – DOI 10.35887/2305-2538-2020-5-74-81. – EDN JGGQHQ.

24. Сравнительная оценка технологических факторов, влияющих на производство и качество молока, при различных технологиях доения / Е. А. Тяпугин, С. Е. Тяпугин, Г. А. Симонов [и др.] // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2015. – № 3. – С. 50-53. – EDN TPTJVV.

25. Особенности роботизированной технологии доения высокопродуктивных коров на современных комплексах / Е. А. Тяпугин, С. Е. Тяпугин, В. К. Углин, В. Е. Никифоров // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – Т. 29, № 2. – С. 57-58.

– EDN TMZGEN.

26. Набоков, В. И. Роботизация отечественного сельскохозяйственного производства / В. И. Набоков, К. В. Некрасов, Е. А. Скворцов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 3. – С. 155-160. – EDN VKQZMH.

27. Российские доильные роботы в работе! // Эффективное животноводство. – 2022. – № 5(180). – С. 56-57. – EDN FONRUL.

28. Ветеринарное законодательство. Т.4. Ветеринарный устав Союза ССР, положения, указания, инструкции, наставления, правила по ветеринарному делу / Под общ. Ред. А.Д. Третьякова. – М.:Агропромиздат, 1988. – 671 с. ISBN 5-10-000665-X

29. Письмо федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 16 мая 2007 года № 0100/4962-07-32 О действующих нормативных и методических документах по гигиене питания

30. Постановление правительства Российской Федерации от 16 ноября 2020 года №1850 «О признании не действующими на территории Российской Федерации актов и отдельных положений актов, изданных центральными органами государственного управления РСФСР и СССР»

31. Приказ министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 27 октября 2020 года №746н «Об утверждении правил по охране труда в сельском хозяйстве»

32. Правила машинного доения коров / Под Ред. Г.А. Зайцева – М.: Агропромиздат, 1989. – 41 с

33. Винников И.К., Бахчевников О.Н., Пахомов Ю.В., Шелушнина И.А. Технологический регламент автоматизированного доения ко-ров.- Зерноград: СКНИИМЭСХ, 2011.- 47 с.

34. Григорьев, Д. А. Технология машинного доения коров на основе конвергентных принципов управления автоматизированными процессами: монография / Д. А. Григорьев, К. В. Король. – Гродно : ГГАУ, 2017. – 216 с. – ISBN 978-985-537-105-3

35. Технология производства молока / Авт.–сост. С.Н. Александров. – М.: ООО «Издательство АСТ»: Донецк: «Сталкер», 2004. – 238 с.

36. Гаджиев, А. М. Технологические и физиологические основы машинного доения коров / А. М. Гаджиев, В. В. Усачев, Т. А. Рахманова // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2019. – № 3(35). – С. 100-108. – EDN QIAAKU.

37. Способ преддоильной подготовки вымени коров / А. С. Курак, М. В. Барановский, О. А. Кажико, А. А. Москалев // Ученые записки учреждения образования Витебская ордена Знак почета государственная академия ветеринарной медицины. – 2015. – Т. 51, № 1-2. – С. 62-65. – EDN UDVMIP.

38. Мещеряков, В. П. Влияние полноценной преддоильной подготовки вымени коров на его кровоснабжение и показатели молоковыведения / В. П. Мещеряков, Д. В. Мещеряков // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 6. – С. 90-100. – EDN TLABPN.

39. The effect of pre-milking teat-brushing on milk processing time in an automated milking system / J. G. Jago, K. L. Davis, P. J. Copeman, M. M. Woolford // Journal of Dairy Research. – 2006. – Vol. 73, No. 2. – P. 192. – DOI 10.1017/S002202990500155X. – EDN HWBLSF.

40. Обработка вымени коров // Техника и оборудование для села. – 2010. – № 6. – С. 26-28. – EDN MSNQKZ.

41. Машинное доение и аспекты профилактики заболеваний коров маститом / А. Н. Козлов, В. И. Шатруков, П. А. Плескачев, А. С. Романов // АПК России. – 2020. – Т. 27, № 2. – С. 327-332. – EDN BESNHT.

42. Андрианов, Е. А. Машинное доение и маститы коров / Е. А. Андрианов, А. М. Андрианов, А. А. Андрианов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 5-3(10-3). – С. 179-182. – DOI 10.12737/6956. – EDN TEMESR.

43. Gleeson, D. Effect of pre-milking teat disinfection on new mastitis infection rates of dairy cows / D. Gleeson, J. Flynn, B. O. Brien // Irish Veterinary Journal. – 2018. – Vol. 71, No. 1. – P. 1-8. – DOI 10.1186/s13620-018-0122-4. – EDN TRZHVБ.

44. Гиперкератоз сосков вымени у молочных коров / А. С. Баркова, А. В. Елесин, А. Г. Нежданов, Н. Т. Климов // Ветеринария. – 2019. – № 8. – С. 3-7. – DOI 10.30896/0042-4846.2019.22.8.03-07. – EDN MPYGNU.

45. Аминова, А. Л. Молочная продуктивность и воспроизводительная способность коров при различных способах содержания / А. Л. Аминова // Аграрный вестник Урала. – 2022. – № 1(216). – С. 47-55. – DOI 10.32417/1997-4868-2022-216-01-47-55. – EDN VJXENB.

46. Рубина, М. В. Продуктивность дойных коров в зависимости от условий содержания / М. В. Рубина, И. В. Щебеток // Ученые записки учреждения образования Витебская ордена Знак почета государственная академия ветеринарной медицины. – 2023. – Т. 59, № 2. – С. 108-113. – DOI 10.52368/2078-0109-2023-59-2-108-113. – EDN BHCFVK.

47. Текучев, И. К. Интеллектуальная ферма с инновационной технологией обслуживания 400 дойных коров при привязном содержании электромобильными агрегатами многофункционального назначения / И. К. Текучев, Л. П. Кормановский // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2018. – № 1(29). – С. 32-36. – EDN YTESSI.

48. Ретроспективный анализ и сравнительная оценка беспривязного и привязного содержания коров. мифы и реалии / Ю. А. Цой, Р. А. Баишева, В. В. Танифа [и др.] // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2018. – № 3(31). – С. 37-43. – EDN UZPLLW.

49. Зайцева, О. В. Эффективность производства молока при разных способах содержания коров / О. В. Зайцева, Т. Ф. Лефлер, Т. А. Курзюкова // Вестник КрасГАУ. – 2019. – № 4(145). – С. 67-74. – EDN RNORFC.

50. Усольцева, М. С. Характеристика систем содержания коров в современных условиях / М. С. Усольцева, Е. В. Шацких // Молодежь и наука. – 2023. – № 3. – EDN SBXZUV.

51. Уткина, О. С. Молочная продуктивность и качество молока при разных способах содержания коров / О. С. Уткина, Е. В. Ачкасова // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 1(69). – С. 41-47. –

DOI 10.48012/1817-5457\_2022\_1\_41. – EDN WOHTRI.

52. Производство молока при привязном и беспривязном способах содержания дойного стада / Т. А. Ковалевская, Л. М. Линник, О. В. Заяц [и др.] // Ученые записки учреждения образования Витебская ордена Знак почета государственная академия ветеринарной медицины. – 2014. – Т. 50, № 2-1. – С. 287-291. – EDN SZBLQX.

53. Вторый, С. В. Алгоритм управления машинным доением коров / С. В. Вторый, В. Ф. Вторый // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2018. – № 94. – С. 134-143. – DOI 10.24411/0131-5226-2018-10020. – EDN TJEEEE.

54. Ежегодник по племенной работе в молочном скотоводстве в хозяйствах Российской Федерации (2021 год). – Лесные Поляны : ФГБНУ "Всероссийский научно-исследовательский институт племенного дела", 2022. – 262 с. – ISBN 978-5-87958-423-3. – EDN BKFQVR.

55. Ежегодник по племенной работе в молочном скотоводстве в хозяйствах Российской Федерации (2021 год). – Лесные Поляны : ФГБНУ "Всероссийский научно-исследовательский институт племенного дела", 2022. – 254 с. – ISBN 978-5-87958-436-3

56. Хазанов, Е. Е. Обзор различных вариантов беспривязного способа содержания коров / Е. Е. Хазанов, В. Романюк // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2000. – № 71. – С. 105-109. – EDN SZTRDH.

57. Морозов, Н. М. Экономическая оценка современного уровня технического оснащения животноводства / Н. М. Морозов, И. И. Хусаинов // Научные труды ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии. – 2011. – Т. 22, № 1(1). – С. 164-179. – EDN MXCVLN.

58. Резервы повышения производительности труда за счет автоматизации подготовительно-заключительных операций при доении коров / В. К. Скоркин, Д. К. Ларкин, В. П. Аксенова, О. Л. Андрюхина // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2015. – № 3(19). –

С. 62-68. – EDN VCGRYT.

59. Поцелуев, А. А. система подмыва вымени коров / А. А. Поцелуев, Е. Л. Чепурина // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2002. – № 1(1). – С. 29-41. – EDN VHDSIH.

60. Are some teat disinfectant formulations more effective against specific bacteria isolated on teat skin than others? / S. R. Fitzpatrick, M. Garvey, J. Flynn [et al.] // Acta Veterinaria Scandinavica. – 2019. – Vol. 61, No. 1. – P. 1-5. – DOI 10.1186/s13028-019-0455-3. – EDN ZIVJNW.

61. Рыжакина, Е. А. Сравнительный анализ использования различных средств для преддоильной обработки вымени коров / Е. А. Рыжакина // Актуальные вопросы ветеринарной биологии. – 2017. – № 1(33). – С. 25-29. – EDN YGROSP.

62. Барановский, М. В. Реализация рефлекса молокоотдачи при использовании моюще-дезинфицирующих средств для преддоильной обработки вымени коров / М. В. Барановский, О. А. Кажико, А. С. Курак // Зоотехническая наука Беларуси. – 2014. – Т. 49, № 2. – С. 244-252. – EDN VCERZP.

63. Обуховский, В. Экономим время на доении / В. Обуховский, Ю. Дершень, М. Лухтан // Животноводство России. – 2017. – № 1. – С. 51. – EDN YJVLDL.

64. Березкина, Г. Ю. Скруббер - эффективное средство при подготовке коров к доению / Г. Ю. Березкина, Н. И. Вдовина // Развитие научного наследия великого учёного на современном этапе : Международная научно-практическая конференция, посвященная 95-летию члена-корреспондента РАСХН, Заслуженного деятеля науки РСФСР и РД, профессора М.М. Джамбулатова, Махачкала, 17 марта 2021 года. Том I. – Махачкала: Дагестанский государственный аграрный университет им. М.М. Джамбулатова, 2021. – С. 117-120. – EDN VXOJDH.

65. Разработка модифицированного доильного стакана модуля санитарно-гидравлической обработки сосков вымени коровы / С. С. Рузин, В. В. Кирсанов, Д. Ю. Павкин, И. М. Довлатов // Техника и технологии в животноводстве. – 2021. – № 2(42). – С. 35-41. – DOI 10.51794/27132064-2021-2-35. – EDN ZNZGHR.

66. Роботы на ферме. Два уникальных проекта будущего - в Беларуси // Наше

сельское хозяйство. – 2022. – № 2(274). – С. 14-19. – EDN PSNKBS.

67. Карпов, В. К. Роботизация и её место в цифровой экономике / В. К. Карпов // Агропродовольственная политика России. – 2017. – № 8(68). – С. 32-39. – EDN WYJIKI.

68. Рамеш Бабу, Н. Классификация и особенности робототехники в сельском хозяйстве / Н. Рамеш Бабу, В. И. Набоков, Е. А. Скворцов // Аграрный вестник Урала. – 2017. – № 2(156). – С. 14. – EDN TOEJFZ.

69. Лапкин, А. Г. Обоснование параметров устройства для преддоильной очистки сосков вымени коров на автоматических доильных установках : специальность 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лапкин Андрей Геннадиевич. – Москва, 2015. – 22 с. – EDN ZPVQHP.

70. Сельскохозяйственный энциклопедический словарь / Редкол.: В. К. Месяц (гл. ред.) и др. - Москва : Сов. энцикл., 1989. - 656 с., с ил.

71. Установочные чертежи машин и механизмов для животноводческих и птицеводческих ферм и зданий (материал для проектирования). Выпуск 1/89. Установочные чертежи машин и механизмов для ферм крупного рогатого скота. Часть 1 / разработан Гипронисельхозом // утверждены 14.04.1989, введены в действие 01.10.1989. – 153 с.

72. Текучев, И. К. Инновационные технологии и технические средства для молочного скотоводства / И. К. Текучев, М. С. Текучева // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2014. – № 2(14). – С. 69-77. – EDN RZAXQN.

73. Ведищев, С. М. Механизация доения коров : Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 110800 - «Агроинженерия» / С. М. Ведищев. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2013. – 160 с. – ISBN 978-5-8265-1226-5. – EDN ZGJZER.

74. Авторское свидетельство № 1777728 А1 СССР, МПК А01J 5/00. Автоматизированная доильная установка : № 4851078 : заявл. 12.07.1990 : опубл.

30.11.1992 / С. В. Колодезев, И. Ю. Башев, М. Ю. Слесарев, А. Б. Сушинский ; заявитель ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ ИМ.А.А.БЛАГОНПРАВОВА. – EDN FMLQDB.

75. Авторское свидетельство № 1377083 А1 СССР, МПК А01J 7/04, А01J 7/00, А61D 11/00. Автоматический манипулятор для преддоильной санитарной обработки вымени коров : № 3852595 : заявл. 11.02.1985 : опубл. 28.02.1988 / В. К. Алексеев, М. М. Шугуров, Ю. А. Александров [и др.] ; заявитель ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНЫХ ПРОБЛЕМ МАШИНОСТРОЕНИЯ ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА И КОРМОПРОИЗВОДСТВА, ЧУВАШСКИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ. – EDN РЕККВЕ.

76. Авторское свидетельство № 1500217 А1 СССР, МПК А01J 7/04, А01J 7/00. Автоматический манипулятор для преддоильной санитарной обработки вымени коров : № 3903643 : заявл. 27.03.1985 : опубл. 15.08.1989 / В. К. Алексеев, М. М. Шугуров, Ю. А. Александров, В. Н. Кантеев ; заявитель ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНЫХ ПРОБЛЕМ МАШИНОСТРОЕНИЯ ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА И КОРМОПРОИЗВОДСТВА, ЧУВАШСКИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ. – EDN WXWXHI.

77. Авторское свидетельство № 1667751 А1 СССР, МПК А01J 7/00. Преобразователь положения с автоматическим манипулятором для преддоильной санитарной обработки вымени коров : № 4258675 : заявл. 10.06.1987 : опубл. 07.08.1991 / В. К. Алексеев, В. Д. Шеповалов, М. М. Шугуров [и др.] ; заявитель ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНЫХ ПРОБЛЕМ МАШИНОСТРОЕНИЯ ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА И КОРМОПРОИЗВОДСТВА, ЧУВАШСКИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ. – EDN MDHJZB.

78. Патент № 2244417 С2 Российская Федерация, МПК А01J 5/00. Автоматизированная доильная установка : № 2003110504/12 : заявл. 11.04.2003 : опубл. 20.01.2005 / В. Ф. Ужик, А. П. Слободюк, А. Г. Свиридов, Д. Б. Клименко ; заявитель Белгородская государственная сельскохозяйственная академия. – EDN FMJLRD.

79. Патент на полезную модель № 148215 U1 Российская Федерация, МПК A01J 7/00. установка для автоматической преддоильной обработки сосков вымени коров : № 2014131802/13 : заявл. 01.08.2014 : опубл. 27.11.2014 / Ю. Г. Иванов, А. Г. Лапкин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева" (ФГБОУ ВПО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева). – EDN ZVREGD.

80. Кирсанов, В. В. Перспективы создания отечественных роботизированных доильных установок / В. В. Кирсанов, Л. П. Кормановский, А. И. Зеленцов // Инновации в сельском хозяйстве. – 2016. – № 4(19). – С. 38-48. – EDN UBDCGQ.

81. Кирсанов, В. В. Концепция создания роботизированной станочной установки с почетвертным управлением процессом доения коров / В. В. Кирсанов, Ю. А. Цой, Л. П. Кормановский // Инновации в сельском хозяйстве. – 2018. – № 1(26). – С. 289-295. – EDN XWQQIX.

82. Концептуальные технико-технологические решения роботизированной доильной установки с почетвертным управлением процессом доения / В. В. Кирсанов, Л. П. Кормановский, Д. Ю. Павкин [и др.] // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 3(82). – С. 62-73. – EDN YVASHS.

83. Патент № 2160526 C1 Российская Федерация, МПК A01J 7/00. Манипулятор для доения : № 99112059/13 : заявл. 03.06.1999 : опубл. 20.12.2000 / С. А. Соловьев, А. С. Подуруев, Е. М. Асманкин [и др.] ; заявитель Оренбургский государственный аграрный университет. – EDN CXJBVN.

84. Авторское свидетельство № 1523137 A1 СССР, МПК A01J 7/00. Манипулятор для доения : № 4229485 : заявл. 04.03.1987 : опубл. 23.11.1989 / Р. И. Хусаинов, В. А. Мелюков, О. К. Захаров [и др.] ; заявитель НОВОСИБИРСКИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ. – EDN ZSXTQY.

85. Патент № 2695868 C1 Российская Федерация, МПК A01J 7/00. Переносной манипулятор для доения коров : № 2018139401 : заявл. 06.11.2018 : опубл. 29.07.2019 / В. Ф. Ужик, О. С. Кузьмина, О. В. Китаева ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования "Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина". – EDN KYZLNO.

86. Кирсанов, В. В. Концепция создания доильного робота, совместимого с отечественным доильным оборудованием / В. В. Кирсанов, Ю. А. Цой, Л. П. Кормановский // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2016. – № 3(23). – С. 13-20. – EDN WGWNBZ.

87. Development of automatic milking systems and their classification / D. R. Sharipov, O. A. Yakimov, M. K. Gainullina [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Zernograd, Rostov Region, 27–28 августа 2020 года. – Zernograd, Rostov Region, 2021. – P. 012080. – DOI 10.1088/1755-1315/659/1/012080. – EDN ZDHWTY.

88. Luiz Marcos Simões Filho Robotic milking of dairy cows: a review / Luiz Marcos Simões Filho, Marcos Aurélio Lopes, Sergio Corrêa Brito, Giuseppe Rossi, Matteo Barbari, Leonardo Conti // SEMINA: CIENCIAS AGRARIAS. – 2020. - 41(6). - Pages: 2833-2850. DOI:10.5433/1679-0359.2020v41n6p2833

89. Артем Малышев. Как доить коров роботами и сделать на этом промышленный стартап. История разработки R-SEPT [Электронный ресурс] // Сколково: [сайт]. URL: <https://sk.ru/news/b/press/archive/2018/11/29/kak-doit-korov-robotami-i-sdelat-na-etom-promyshlennyi-startap-istoriya-razrabotki-rsept.aspx> (дата обращения 05.09.2023)

90. Еще один российский проект создания доильного робота обрел зримые черты. И нуждается в поддержке [Электронный ресурс] // RoboTrends: [сайт]. URL: <http://robotrends.ru/pub/1744/eshe-odin-rossiyskiy-proekt-sozdaniya-doilnogo-robota-obrel-zrimye-cherty.-i-nuzhdaetsya-v-podderzhke> (дата обращения 05.09.2023)

91. Патент на изобретение, WO 2015/009158 A1, Всемирная организация интеллектуальной собственности, МПК A01J 7/04 (2006.01). Cleaning device for cleaning teats of an animal for milking, milking machine provided therewith and method therefor : PCT/NL2014/050495 : заявл. 21.07.2014 : опубл. 22.01.2015 / VAN DER SLUIS, Peter Willem, BERGHUIS, Raymond Roger, HOFMAN, Henk; ROTEC ENGINEERING B.V.

92. Патент № 2587563 С9 Российская Федерация, МПК А01К 1/12. Перегородка доильной установки и Доильная установка : № 2014140857/13 : заявл. 14.03.2013 : опубл. 20.06.2016 / О. Кроне, Д. Хензель, М. Тросзель [и др.] ; заявитель ГЕА Фарм Текнолоджиз ГмбХ. – EDN KZMLZM.

93. Патент № 2753879 С2 Российская Федерация, МПК А01J 5/017. Рычажный механизм для доильной установки автоматического доения дойных животных, перегородка доильной установки и доильная установка : № 2018111519 : заявл. 30.03.2018 : опубл. 24.08.2021 / О. Кроне ; заявитель ГЕА ФАРМ ТЕКНОЛОДЖИЗ ГМБХ. – EDN THXKZB.

94. ГЕА. Работа в России продолжается [Электронный ресурс] // Аграрный бизнес-журнал «Моя сибирь»: [сайт]. URL: <https://mysibir.ru/gea-rabota-v-rossii-prodolzhaetsa/> (дата обращения 05.09.2023)

95. Опыт производства молока при использовании роботизированной доильной карусели GEA dairyprog / Н. И. Мосолова, М. А. Чеканова, И. Ф. Горлов [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2022. – № 2(66). – С. 208-220. – DOI 10.32786/2071-9485-2022-02-27. – EDN KAGXCT.

96. Кормановский, Л. П. Направления развития системы машин для молочного скотоводства / Л. П. Кормановский, Ю. А. Цой, В. В. Кирсанов // Техника и технологии в животноводстве. – 2020. – № 1(37). – С. 14-23. – EDN TQWFRK.

97. Шарафутдинов, Г. С. Эффективные системы доения коров - доильные залы типа "Карусель" / Г. С. Шарафутдинов, Р. Р. Шайдуллин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2007. – Т. 2, № 2(6). – С. 97-100. – EDN KWHNHZ.

98. Гордеев, В. В. Методика расчета технологических площадей доильных залов с установкой типа "Карусель" / В. В. Гордеев, В. Е. Хазанов, С. В. Собоная // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2019. – № 2(99). – С. 277-286. – DOI 10.24411/0131-5226-2019-10173. – EDN ZYRNKH.

99. Тареева, О. А. Некоторые аспекты внедрения конвейерных доильных установок типа "Карусель" / О. А. Тареева // Вестник НГИЭИ. – 2010. – Т. 2, № 1(1). – С. 132-142. – EDN PVEWGL.

100. Тареева, О. А. Анализ способов оптимизации работы доильных установок типа "карусель" / О. А. Тареева // Вестник НГИЭИ. – 2013. – № 4(23). – С. 122-130. – EDN QBJDWX.

101. Development of a device for cleansing cow udder teats and testing it under industrial conditions / A. Paliy, E. Aliiev, K. Ishchenko [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 1, No. 1-109. – P. 43-53. – DOI 10.15587/1729-4061.2021.224927. – EDN PMBBSF.

102. Иванов, Ю. Г. Повышение эффективности очистки сосков вымени коров при применении щеточных устройств на автоматических доильных установках / Ю. Г. Иванов, А. Г. Лапкин // Эффективное животноводство. – 2015. – № 8(117). – С. 34-35. – EDN VQPQAL.

103. Карташов, Л. П. Теоретический аспект процесса очистки кожного покрова коров / Л. П. Карташов, Ю. А. Ушаков, Л. Г. Нигматов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – № 12(146). – С. 138-143. – EDN XDRUUV.

104. Сравнительная технико-экономическая оценка автоматизированных и роботизированных доильных установок / В. В. Кирсанов, Д. Ю. Павкин, С. С. Рузин, А. А. Цымбал // Агроинженерия. – 2020. – № 3(97). – С. 39-43. – DOI 10.26897/2687-1149-2020-3-39-43. – EDN CNNRSH.

105. Патент № 2715859 С1 Российская Федерация, МПК А01J 7/00. Манипулятор доильной установки с управляемым режимом доения по четвертям вымени коровы : № 2019107891 : заявл. 19.03.2019 : опубл. 03.03.2020 / Д. Ю. Павкин, В. В. Кирсанов, А. С. Дорохов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ" (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ). – EDN ZTWVGX.

106. Цифровое сельское хозяйство: состояние и перспективы развития / В. Ф. Федоренко, Н. П. Мишуров, Д. С. Буклагин [и др.]. – Москва : ФГБНУ

"Росинформагротех", 2019. – 316 с. – ISBN 978-5-7367-1503-9. – EDN TENBVN.

107. Борисов, В. С. Технические и эксплуатационные параметры современных роботизированных систем боксового типа для доения коров / В. С. Борисов, В. И. Борисов // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции : Материалы XIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти профессора С.А. Лапшина, Саранск, 20–21 апреля 2017 года / Редколлегия: Д.В. Бочкарев (отв. секретарь) [и др.]. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2017. – С. 396-401. – EDN YKXZNG

108. Шарипов, Д. Р. Классификация роботизированных систем доения / Д. Р. Шарипов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2019. – № 1(33). – С. 77-81. – EDN BHUNKN.

109. Наumenко, А.А. Роботизированные системы в животноводстве : учеб. Пособие / А.А. Наumenко, А.А. Чигрин, А.П. Палий, С.В. Кульбаба и др. : Изд-во Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко, 2015. – 171 с.

110. Робот для доения коров ®DeLaval VMS™ V300 [Электронный ресурс] // DeLaval [сайт]. URL: <https://aviprime.by/katalog/oborudovanie/robotizirovannoe-doenie-oborudovanie/robot-doyar-delaval-vms-v300/> (дата обращения 05.09.2023)

111. Роботизированный роторный доильный зал Delaval AMR [Электронный ресурс] // МИЛКАГРОТЕХ [сайт]. URL: <https://milkagroteh.ru/product/oborudovanie-delaval/robotizirovannye-resheniya/robotizirovannyi-rotorny-doilnyy-zal-delaval-amr/> (дата обращения 05.09.2023)

112. ДОИЛЬНЫЕ РОБОТЫ ОТ BOUMATIC ROBOTICS [Электронный ресурс] // Система Агро [сайт]. URL: <http://rasagro.ru/katalog/doilnoe-oborudovanie-2/roboty/> (дата обращения 05.09.2023)

113. Доильные роботы BouMatic GEMINI [Электронный ресурс] // Livestock Service [сайт]. URL: <https://www.livestockservice.kz/robotics/boumatic-gemini> (дата обращения 05.09.2023)

114. Kim W. Development of a Multi-joint Robot Manipulator for Robot Milking System / Kim W., Lee D. W. // Journal of Biosystems Engineering. – 2005. – Volume 30 Issue 5 Serial No. 112 – Pages.293-298

115. Chengjun W. Design of a Teat Cup Attachment Robot for Automatic Milking Systems / Chengjun Wang, Fan Ding, Liuyi Ling, Shaoqiang Li, // Agriculture. – 2023. - 13(6) DOI:10.3390

116. Kyoo Jae Shin Realization of milking robot with tracking object function using fully electrical driving unit / Kyoo Jae Shin // INTERNATIONAL JOURNAL OF CURRENT RESEARCH. – 2016. - Vol. 8, Issue, 11 – Pages.40997-41008

117. Kyoo Jae Shin Design of Driving Control Unit and Milking Robot Manipulator / Kyoo Jae Shin // Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers. – 2014. - 51(9). - Pages: 238-247. DOI:10.5573

118. Патент № 2143800 С1 Российская Федерация, МПК А01J 5/017. Устройство для ориентации доильных стаканов : № 97117679/13 : заявл. 15.10.1997 : опубл. 10.01.2000 / Л. П. Карташов, В. Б. Шлейников ; заявитель Лаборатория биотехнических систем института прикладной механики Уральского отделения РАН. – EDN YDLIFU.

119. Domenico Giorgio Sorrenti Ultrasonic-Based Localization of Cow Teats for Robotized Milking / Domenico Giorgio Sorrenti, Marco Cattaneo, Vincenzo Villa // Cybernetics and Systems. – 2008. - 39(4). - Pages: 310-332 DOI:10.1080/01969720802039453

120. Schillingmann D. Automatic Milking: Development of a Robot System and Ultrasonic Teat Location / D. Schillingmann, T.T. Mottram // Cybernetics and Systems. – 1993. - 55(1). - Pages: 69-78 DOI:10.1006/jaer.1993.1033

121. Сравнительный анализ и подбор систем технического зрения в молочном животноводстве / В. В. Кирсанов, Д. Ю. Павкин, С. С. Юрочка, В. Ю. Матвеев // Вестник НГИЭИ. – 2019. – № 1(92). – С. 69-79. – EDN YWLXUL.

122. Системы позиционирования доильного оборудования на вымени коров при роботизированной технологии доения / С. К. Карпович [и др.] // Современные тенденции развития сельскохозяйственного машиностроения, оснащения и

технического сервиса в АПК : сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Минск, 6-7 июня 2023 г. - Минск : БГАТУ, 2023. - С. 58-62.

123. Рентюк, В. МАШИННОЕ ЗРЕНИЕ В 3D: ToF-СИСТЕМЫ КОМПАНИИ SICK / В. Рентюк // Control Engineering Россия. – 2020. – № 1(85). – С. 38-44. – EDN KRCUHI.

124. Peter H. RGB-D Mapping: Using Kinect-Style Depth Cameras for Dense 3D Modeling of Indoor Environments. / Peter Henry, Michael Krainin, Evan Herbst, Xiaofeng Ren, Dieter Fox // The International Journal of Robotics Research. – 2012. – 31(5). - Pages: 647 – 663. DOI:10.1177/0278364911434148

125. Akhloufi M.A. 3D vision system for intelligent milking robot automation. / M.A. Akhloufi // Conference Paper in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2013. DOI: 10.1117/12.2046072

126. Юрочка, С. С. Разработка методов определения биометрических и температурных параметров вымени лактирующих животных на основе оптических технологий : специальность 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Юрочка Сергей Сергеевич, 2022. – 170 с. – EDN ITRJPN.

127. Aymen Ben Azouz Development of a teat sensing system for robotic milking by combining thermal imaging and stereovision technique / Aymen Ben Azouz, Harry Esmonde, Brian Corcoran, Eddie O’Callaghan // Computers and Electronics in Agriculture. – 2015. – 110. – Pages: 162-170 DOI:10.1016/j.compag.2014.11.004

128. M. Kise A Stereovision-based Crop Row Detection Method for Tractor-automated / M. Kise, Q. Zhang, F. Rovira Más // Biosystems Engineering. – 2005. – 90(4). – Pages:357-367.

129. Пономарев, С. В. Методика сравнения алгоритмов стереозрения при восстановлении трехмерной модели лица человека / С. В. Пономарев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 6(88). – С. 40-45. – EDN RKOLVB.

130. Воронин, В. В. Разработка и исследование алгоритма вычисления карты

глубины стереоизображения / В. В. Воронин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11(148). – С. 58-66. – EDN RLEEXZ.

131. Котюжанский, Л. А. Вычисление карты глубины стереоизображения на графическом процессоре в реальном времени / Л. А. Котюжанский // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6-2. – С. 444-449. – EDN PAZQYT.

132. Горитов, А. Н. Построение модели внешней среды робота на основе стереозрения / А. Н. Горитов, С. И. Яковченко // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5, № 1. – С. 121-125. – DOI 10.25206/2310-9793-2017-5-1-121-125. – EDN ZTIYYT.

133. Вахитов, А. Т. Обзор алгоритмов стереозрения / А. Т. Вахитов, Л. С. Гуревич, Д. В. Павленко // Стохастическая оптимизация в информатике. – 2008. – Т. 4. – С. 151-169. – EDN KYJCXB.

134. Геворгян, А. В. Получение 3D модели объекта на основе стереозрения / А. В. Геворгян // Вестник Национального политехнического университета Армении. Информационные технологии, электроника, радиотехника. – 2016. – № 2. – С. 43-48. – EDN XQBJAT.

135. Francisco Rovira-Más Global 3D Terrain Maps for Agricultural Applications / Francisco Rovira-Más // Advances in Theory and Applications of Stereo Vision – 2011. Pages:227-242.

136. Егоров, И. В. Оптимизация параметров системы технического зрения на базе трех камер / И. В. Егоров, Д. В. Лачугин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 1, № 2(64). – С. 393-397. – EDN PWBSDF.

137. 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.

138. Патент на полезную модель № 176985 U1 Российская Федерация, МПК A01J 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.

139. 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.

140. О роботизации процесса подготовки вымени коров к доению / Н. В. Муханов, А. В. Крупин, Д. В. Барабанов, Н. Н. Сафонова // Качественный рост российского агропромышленного комплекса: возможности, проблемы и перспективы : Материалы деловой программы XXVII международной агропромышленной выставки, Санкт-Петербург, 21–24 августа 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2018. – С. 256-258. – EDN YSZAIX.

141. Об актуальности роботизированных установок преддоильной подготовки вымени коров / А. В. Крупин, Н. В. Муханов, Н. Н. Сафонова, Д. В. Барабанов // Сельское хозяйство - драйвер российской экономики : (для обсуждения и выработки решений), Санкт-Петербург, 30 августа – 04 2016 года / Оргкомитет международной агропромышленной выставки - ярмарки "Агрорусь-2016". – Санкт-Петербург: ЗАО "ЭкспоФорум", 2016. – С. 310. – EDN WKYSOV.

142. Патент на полезную модель № 185290 U1 Российская Федерация, МПК A01J 5/00, A01J 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.

143. Барабанов, Д. В. Система машинного зрения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени / Д. В. Барабанов, Н. В. Муханов // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения : сборник

научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, посвящается 115-летию Санкт-Петербургского государственного аграрного университета, Санкт-Петербург - Пушкин, 24–26 января 2019 года. Том Часть I. – Санкт-Петербург - Пушкин: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2019. – С. 304-307. – EDN ZYNWDJ.

144. Проектирование рабочего органа роботизированной установки преддоильной подготовки вымени / Д. В. Барабанов, А. В. Крупин, А. М. Абалихин, Н. Н. Сафонова // Агротехнологии XXI века: стратегия развития, технологии и инновации : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Пермь, 08–10 ноября 2022 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова». – Пермь: Издательство "От и До", 2022. – С. 265-270. – EDN QJKWUL.

145. Патент на полезную модель № 218509 U1 Российская Федерация, МПК A01J 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.

146. Керимов, М. А. Разработка функциональной схемы манипулятора установки преддоильной подготовки вымени / М. А. Керимов, Д. В. Барабанов // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Минск, 24–25 ноября 2022 года / Белорусский государственный аграрный технический университет. – Минск: Белорусский государственный аграрный технический университет, 2022. – С. 526-529. – EDN HTDDDW.

147. 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.

148. Доильный зал с роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени / А. В. Крупин, Н. В. Муханов, Д. В. Барабанов, Н. Н. Сафонова // Аграрная наука в условиях модернизации и инновационного развития АПК России : Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции с международным участием, посвященной 100-летию академика Д.К. Беляева, Иваново, 02 марта 2017 года. Том 3. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. акад. Д.К. Беляева, 2017. – С. 100-103. – EDN YRAVQL.

149. К вопросу организации совместной работы роботизированной установки преддоильной подготовки вымени с доильной установкой / А. В. Крупин, Н. Н. Сафонова, Д. В. Барабанов, Н. В. Муханов // Аграрная наука в условиях модернизации и инновационного развития АПК России : Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции с международным участием, посвященной 100-летию высшего аграрного образования в Ивановской области, Иваново, 28–29 ноября 2018 года. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. акад. Д.К. Беляева, 2018. – С. 801-804. – EDN ZBTTOX.

150. Технологические основы совершенствования машинного доения коров / А. С. Курак, М. В. Барановский, О. А. Кажeko [и др.] // Зоотехническая наука Беларуси. – 2020. – Т. 55, № 2. – С. 224-231. – EDN QQOWRF.

151. Реализация рефлекса молокоотдачи при доении коров на различных доильных установках / А. С. Курак, М. В. Барановский, О. А. Кажeko [и др.] // Зоотехническая наука Беларуси. – 2012. – Т. 47, № 1. – С. 263-270. – EDN VXDUST.

152. 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.

153. Резерв к увеличению пропускной способности доильных залов с конвейерно-кольцевыми доильными установками / Н. Н. Сафонова, А. В. Крупин, Н. В. Муханов, Д. В. Барабанов // Аграрная наука в условиях модернизации и инновационного развития АПК России : Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции с международным участием, посвященной 100-летию академика Д.К. Беляева, Иваново, 02 марта 2017 года. Том 3. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. акад. Д.К. Беляева, 2017. – С. 172-175. – EDN YRFGHZ.

154. Пути повышения производительности труда операторов доильных залов / Н. В. Муханов, А. В. Крупин, Д. В. Барабанов, Н. Н. Сафонова // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения : Сборник научных трудов международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, Санкт-Петербург-Пушкин, 28–30 января 2016 года / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. Том Часть I. – Санкт-Петербург-Пушкин: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2016. – С. 419-424. – EDN PSBSEX.

155. Тареева, О. А. Повышение пропускной способности роторно-конвейерной доильной установки на основе адаптивного управления технологическими потоками животных : специальность 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тареева Оксана Александровна, 2016. – 203 с. – EDN BFXVU.

156. Машинное доение коров : [Учеб. пособие для сред. сел. проф.-техн. уч-щ] / Л. П. Карташов, Ю. Ф. Куранов. - 3-е изд., испр. и доп. - Москва : Высш. школа, 1980. - 223 с.

157. Хазанов, Е. Е. Технология и механизация молочного животноводства / Е. Е. Хазанов, В. В. Гордеев, В. Е. Хазанов. – 2-е издание, стереотипное. – Санкт-

Петербург : Издательство "Лань", 2016. – 592 с. – ISBN 978-5-8114-0946-4. – EDN VLRGNB.

158. 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.

159. Барабанов, Д. В. Оптический способ наведения рабочего органа манипулятора роботизированной установки преддоильной подготовки вымени / Д. В. Барабанов // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения : сборник научных трудов / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. Том Часть I. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2018. – С. 318-322. – EDN YUBVMN.

160. 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.

161. Керимов, М. А. Испытания системы машинного зрения роботов-дойров в молочном скотоводстве / М. А. Керимов, Д. В. Барабанов // Приоритеты развития АПК в условиях цифровизации и структурных изменений национальной экономики : Материалы международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, посвященной 190-летию со дня рождения И.А. Стебута, Санкт-Петербург - Пушкин, 24–26 мая 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2023. – С. 139-145. – EDN ZJPWKC.

162. Керимов, М. А. Программное обеспечение системы машинного зрения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров / М. А. Керимов, Н. В. Муханов, Д. В. Барабанов // Совершенствование инженерно-технического обеспечения производственных процессов и технологических систем

: Материалы национальной научно-практической конференции с международным участием, Оренбург, 03 февраля 2023 года / Оренбургский государственный аграрный университет. – Оренбург: Издательство "Перо", 2023. – С. 13-19. – EDN QAEXII.

163. 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.

164. Телегин, И. А. Оценка экономической эффективности роботизированной установки преддоильной подготовки вымени / И. А. Телегин, Д. В. Барабанов, Н. Н. Сафонова // Научно-образовательные и прикладные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции : Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Чебоксары, 15 ноября 2019 года. – Чебоксары: Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 2019. – С. 562-570. – EDN VXCJPU.

165. Доильные залы "Карусель" [Электронный ресурс] // Агромолтехника [сайт]. URL: <http://agro.su/vsya-produkcziya/oborudovanie-dlya-krs/oborudovanie-dlya-doeniya/doilnyie-zalyi-karusel> (дата обращения 05.09.2023)

166. Кажеко, О. А. Особенности организации труда при машинном доении коров на доильной установке "Карусель" / О. А. Кажеко, М. В. Барановский, А. С. Курак // Зоотехническая наука Беларуси. – 2016. – Т. 51, № 2. – С. 164-172. – EDN WKGYZH.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент РФ №176985

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 176985

**Установка преддоильной подготовки вымени**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановская государственная сельскохозяйственная академия имени Д.К. Беляева" (RU)*

Авторы: *Барабанов Дмитрий Владимирович (RU), Сафонова Наталья Николаевна (RU), Муханов Николай Вячеславович (RU), Крупин Александр Владимирович (RU), Кувишинов Валерий Владимирович (RU)*

Заявка № 2017109989

Приоритет полезной модели 24 марта 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 05 февраля 2018 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 24 марта 2027 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
Патент РФ №185290

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 185290

**Устройство для позиционирования манипулятора  
роботизированных установок преддоильной подготовки  
вымени и доения**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Ивановская государственная сельскохозяйственная  
академия имени Д.К. Беляева" (RU)*

Авторы: *Барabanов Дмитрий Владимирович (RU), Сафонова  
Наталья Николаевна (RU), Муханов Николай Вячеславович  
(RU), Крупин Александр Владимирович (RU), Долгова Елена  
Александровна (RU)*

Заявка № 2017130401

Приоритет полезной модели 28 августа 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 29 ноября 2018 г.

Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает 28 августа 2027 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ В  
Патент РФ №218509

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 218509**

**Манипулятор установки преддоильной подготовки  
вымени**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования "Санкт-  
Петербургский государственный аграрный университет"*  
(ФГБОУ ВО СПбГАУ) (RU)

Авторы: *Керимов Мухтар Ахмиевич (RU), Барабанов Дмитрий  
Владимирович (RU), Муханов Николай Вячеславович (RU),  
Крупин Александр Владимирович (RU), Абалихин Антон  
Михайлович (RU)*

Заявка № **2023107673**

Приоритет полезной модели **29 марта 2023 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации **29 мая 2023 г.**

Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает **29 марта 2033 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 429b6a0fe3853164ba96f683b73b4aa7  
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

*Ю.С. Зубов*



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

План эксперимента

| №<br>эксперимента | Факторы        |                |                |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|
|                   | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> |
| 1                 | 1              | 1              | 0              |
| 2                 | -1             | -1             | 0              |
| 3                 | 1              | -1             | 0              |
| 4                 | -1             | 1              | 0              |
| 5                 | 1              | 0              | 1              |
| 6                 | -1             | 0              | -1             |
| 7                 | 1              | 0              | -1             |
| 8                 | -1             | 0              | 1              |
| 9                 | 0              | 1              | 1              |
| 10                | 0              | -1             | -1             |
| 11                | 0              | 1              | -1             |
| 12                | 0              | -1             | 1              |
| 13                | 0              | 0              | 0              |
| 14                | 0              | 0              | 0              |
| 15                | 0              | 0              | 0              |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### Результаты измерения погрешности с использованием угловых поправок и без них.

| Номер опыта                        | b1, (м) | b2, (м) | $\Delta_x$ , (м) | $\Delta_y$ , (м) | $\Delta_{ZK1}$ , (м) | $\Delta_{ZK2}$ , (м) | $\Delta_{ZCP}$ , (м) | $\Delta_{XOY}$ , (м) | $\Delta_r$ , (м) |
|------------------------------------|---------|---------|------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|
| Уровень 1 положение 1 без поправки | 0,745   | 1,035   | 0,00183          | 0,00996          | 0,0086               | 0,00150              | 0,0050               | 0,0101               | 0,0113           |
| Уровень 1 положение 1 без поправки | 0,737   | 1,020   | 0,00202          | 0,00720          | 0,0056               | 0,00125              | 0,0022               | 0,0075               | 0,0078           |
| Уровень 1 положение 1 без поправки | 0,709   | 0,994   | 0,00200          | 0,00192          | 0,0117               | 0,00128              | 0,0065               | 0,0028               | 0,0071           |
| Уровень 1 положение 1 без поправки | 0,706   | 1,020   | 0,00209          | 0,00733          | 0,0013               | 0,00123              | 0,0000               | 0,0076               | 0,0076           |
| Уровень 1 положение 1 без поправки | 0,747   | 0,994   | 0,00079          | 0,01226          | 0,0073               | 0,00241              | 0,0048               | 0,0123               | 0,0132           |
| Уровень 1 положение 2 без поправки | 0,895   | 0,884   | 0,00089          | 0,00368          | 0,0136               | 0,00093              | 0,0063               | 0,0038               | 0,0074           |
| Уровень 1 положение 2 без поправки | 0,887   | 0,876   | 0,00269          | 0,00525          | 0,0169               | 0,00044              | 0,0086               | 0,0059               | 0,0105           |
| Уровень 1 положение 2 без поправки | 0,851   | 0,859   | 0,00603          | 0,00296          | 0,0159               | 0,00111              | 0,0085               | 0,0067               | 0,0108           |
| Уровень 1 положение 2 без поправки | 0,858   | 0,890   | 0,00357          | 0,00036          | 0,0178               | 0,00082              | 0,0085               | 0,0036               | 0,0092           |
| Уровень 1 положение 2 без поправки | 0,881   | 0,842   | 0,00129          | 0,00270          | 0,0092               | 0,00200              | 0,0056               | 0,0030               | 0,0063           |
| Уровень 1 положение 3 без поправки | 1,054   | 0,745   | 0,00429          | 0,00128          | 0,0256               | 0,00407              | 0,0148               | 0,0045               | 0,0155           |
| Уровень 1 положение 3 без поправки | 1,045   | 0,734   | 0,00146          | 0,00088          | 0,0178               | 0,00613              | 0,0120               | 0,0017               | 0,0121           |
| Уровень 1 положение 3 без поправки | 1,002   | 0,712   | 0,00533          | 0,00292          | 0,0133               | 0,00098              | 0,0072               | 0,0061               | 0,0094           |
| Уровень 1 положение 3 без поправки | 1,053   | 0,716   | 0,00254          | 0,00175          | 0,0232               | 0,00437              | 0,0138               | 0,0031               | 0,0141           |
| Уровень 1 положение 3 без поправки | 1,001   | 0,746   | 0,00453          | 0,00424          | 0,0135               | 0,00128              | 0,0074               | 0,0062               | 0,0097           |
| Уровень 1 положение 4 без поправки | 0,890   | 1,145   | 0,00524          | 0,00476          | 0,0049               | 0,00180              | 0,0015               | 0,0071               | 0,0072           |
| Уровень 1 положение 4 без поправки | 0,883   | 1,132   | 0,00210          | 0,00435          | 0,0071               | 0,00291              | 0,0021               | 0,0048               | 0,0053           |
| Уровень 1 положение 4 без поправки | 0,851   | 1,083   | 0,00164          | 0,00524          | 0,0015               | 0,00464              | 0,0031               | 0,0055               | 0,0063           |
| Уровень 1 положение 4 без поправки | 0,887   | 1,094   | 0,00252          | 0,00181          | 0,0065               | 0,00083              | 0,0029               | 0,0031               | 0,0042           |
| Уровень 1 положение 4 без поправки | 0,851   | 1,145   | 0,00276          | 0,00563          | 0,0015               | 0,00183              | 0,0017               | 0,0063               | 0,0065           |
| Уровень 1 положение 5 без поправки | 1,019   | 1,012   | 0,00185          | 0,00344          | 0,0115               | 0,00100              | 0,0052               | 0,0039               | 0,0065           |
| Уровень 1 положение 5 без поправки | 1,005   | 0,988   | 0,00421          | 0,00412          | 0,0060               | 0,00256              | 0,0017               | 0,0059               | 0,0061           |
| Уровень 1 положение 5 без поправки | 0,968   | 0,978   | 0,00620          | 0,00307          | 0,0144               | 0,00010              | 0,0072               | 0,0069               | 0,0100           |
| Уровень 1 положение 5 без поправки | 0,982   | 1,012   | 0,00126          | 0,00123          | 0,0043               | 0,00231              | 0,0010               | 0,0018               | 0,0020           |
| Уровень 1 положение 5 без поправки | 1,011   | 0,981   | 0,00205          | 0,00061          | 0,0138               | 0,00198              | 0,0079               | 0,0021               | 0,0082           |
| Уровень 1 положение 6 без поправки | 1,172   | 0,893   | 0,00309          | 0,00175          | 0,0125               | 0,00001              | 0,0062               | 0,0035               | 0,0072           |
| Уровень 1 положение 6 без поправки | 1,160   | 0,892   | 0,00858          | 0,00432          | 0,0166               | 0,00027              | 0,0084               | 0,0096               | 0,0128           |
| Уровень 1 положение 6 без поправки | 1,120   | 0,858   | 0,00036          | 0,00096          | 0,0073               | 0,00274              | 0,0023               | 0,0010               | 0,0025           |
| Уровень 1 положение 6 без поправки | 1,119   | 0,894   | 0,01132          | 0,00361          | 0,0183               | 0,00007              | 0,0091               | 0,0119               | 0,0150           |
| Уровень 1 положение 6 без поправки | 1,172   | 0,852   | 0,00328          | 0,00082          | 0,0152               | 0,00144              | 0,0083               | 0,0034               | 0,0090           |
| Уровень 1 положение 7 без поправки | 1,042   | 1,298   | 0,00277          | 0,00090          | 0,0066               | 0,00354              | 0,0015               | 0,0029               | 0,0033           |
| Уровень 1 положение 7 без поправки | 1,037   | 1,289   | 0,00339          | 0,00041          | 0,0073               | 0,00110              | 0,0031               | 0,0034               | 0,0046           |
| Уровень 1 положение 7 без поправки | 0,997   | 1,236   | 0,00039          | 0,00011          | 0,0035               | 0,00612              | 0,0048               | 0,0004               | 0,0048           |
| Уровень 1 положение 7 без поправки | 1,043   | 1,253   | 0,00477          | 0,00199          | 0,0066               | 0,00038              | 0,0031               | 0,0052               | 0,0060           |
| Уровень 1 положение 7 без поправки | 1,001   | 1,287   | 0,00295          | 0,00300          | 0,0053               | 0,00065              | 0,0023               | 0,0042               | 0,0048           |
| Уровень 1 положение 8 без поправки | 1,169   | 1,171   | 0,00333          | 0,00546          | 0,0075               | 0,00254              | 0,0025               | 0,0064               | 0,0069           |
| Уровень 1 положение 8 без поправки | 1,148   | 1,152   | 0,00151          | 0,00217          | 0,0043               | 0,00103              | 0,0027               | 0,0026               | 0,0037           |
| Уровень 1 положение 8 без поправки | 1,113   | 1,127   | 0,01057          | 0,00637          | 0,0122               | 0,00390              | 0,0081               | 0,0123               | 0,0147           |
| Уровень 1 положение 8 без поправки | 1,122   | 1,154   | 0,00199          | 0,00157          | 0,0018               | 0,00337              | 0,0008               | 0,0025               | 0,0027           |
| Уровень 1 положение 8 без поправки | 1,169   | 1,118   | 0,00255          | 0,00191          | 0,0062               | 0,00224              | 0,0042               | 0,0032               | 0,0053           |

продолжение приложения Д

|                                     |       |       |         |         |        |         |        |        |        |
|-------------------------------------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,291 | 1,057 | 0,00768 | 0,00410 | 0,0147 | 0,00076 | 0,0070 | 0,0087 | 0,0112 |
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,267 | 1,039 | 0,00603 | 0,00213 | 0,0078 | 0,00349 | 0,0021 | 0,0064 | 0,0067 |
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,226 | 1,023 | 0,01410 | 0,00758 | 0,0148 | 0,00262 | 0,0061 | 0,0160 | 0,0171 |
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,259 | 1,001 | 0,00368 | 0,00033 | 0,0070 | 0,00026 | 0,0036 | 0,0037 | 0,0052 |
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,235 | 1,030 | 0,00255 | 0,00316 | 0,0050 | 0,00237 | 0,0013 | 0,0041 | 0,0043 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,242 | 1,437 | 0,00177 | 0,00017 | 0,0053 | 0,00071 | 0,0023 | 0,0018 | 0,0029 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,225 | 1,423 | 0,00340 | 0,00177 | 0,0019 | 0,00059 | 0,0007 | 0,0038 | 0,0039 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,180 | 1,377 | 0,00102 | 0,00285 | 0,0056 | 0,00683 | 0,0062 | 0,0030 | 0,0069 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,227 | 1,442 | 0,00369 | 0,00345 | 0,0067 | 0,00289 | 0,0019 | 0,0051 | 0,0054 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,230 | 1,368 | 0,00221 | 0,00025 | 0,0010 | 0,00231 | 0,0007 | 0,0022 | 0,0023 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,331 | 1,326 | 0,00875 | 0,00247 | 0,0026 | 0,00332 | 0,0004 | 0,0091 | 0,0091 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,293 | 1,310 | 0,00442 | 0,00636 | 0,0018 | 0,00632 | 0,0023 | 0,0077 | 0,0081 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,273 | 1,269 | 0,01583 | 0,00704 | 0,0070 | 0,00940 | 0,0012 | 0,0173 | 0,0174 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,330 | 1,276 | 0,00786 | 0,00036 | 0,0043 | 0,00051 | 0,0024 | 0,0079 | 0,0082 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,265 | 1,324 | 0,00754 | 0,00232 | 0,0028 | 0,00788 | 0,0054 | 0,0079 | 0,0095 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,440 | 1,237 | 0,01385 | 0,00534 | 0,0093 | 0,00756 | 0,0009 | 0,0148 | 0,0149 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,424 | 1,220 | 0,01369 | 0,00202 | 0,0125 | 0,00403 | 0,0042 | 0,0138 | 0,0145 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,379 | 1,172 | 0,01129 | 0,00457 | 0,0000 | 0,00821 | 0,0041 | 0,0122 | 0,0128 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,435 | 1,176 | 0,00357 | 0,00145 | 0,0064 | 0,00731 | 0,0005 | 0,0038 | 0,0039 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,401 | 1,248 | 0,02302 | 0,00731 | 0,0129 | 0,00590 | 0,0035 | 0,0242 | 0,0244 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,398 | 1,580 | 0,00141 | 0,00538 | 0,0016 | 0,00724 | 0,0028 | 0,0056 | 0,0062 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,391 | 1,575 | 0,01331 | 0,00508 | 0,0039 | 0,00496 | 0,0005 | 0,0142 | 0,0143 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,338 | 1,512 | 0,00429 | 0,00414 | 0,0091 | 0,01057 | 0,0098 | 0,0060 | 0,0115 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,407 | 1,528 | 0,01049 | 0,00179 | 0,0026 | 0,00461 | 0,0036 | 0,0106 | 0,0112 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,349 | 1,572 | 0,01506 | 0,00941 | 0,0044 | 0,00849 | 0,0020 | 0,0178 | 0,0179 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,503 | 1,499 | 0,01234 | 0,00232 | 0,0039 | 0,00299 | 0,0004 | 0,0126 | 0,0126 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,461 | 1,472 | 0,00903 | 0,00419 | 0,0029 | 0,00932 | 0,0061 | 0,0100 | 0,0117 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,441 | 1,434 | 0,01829 | 0,01080 | 0,0077 | 0,01245 | 0,0024 | 0,0212 | 0,0214 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,436 | 1,477 | 0,01262 | 0,00809 | 0,0005 | 0,01163 | 0,0061 | 0,0150 | 0,0162 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,500 | 1,475 | 0,01056 | 0,00698 | 0,0024 | 0,01139 | 0,0045 | 0,0127 | 0,0134 |
| Уровень 1 положение 15 без поправки | 1,601 | 1,415 | 0,00526 | 0,00260 | 0,0050 | 0,00274 | 0,0011 | 0,0059 | 0,0060 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,596 | 1,419 | 0,02700 | 0,00731 | 0,0074 | 0,00145 | 0,0030 | 0,0280 | 0,0281 |
| Уровень 1 положение 15 без поправки | 1,547 | 1,360 | 0,00762 | 0,00268 | 0,0033 | 0,00849 | 0,0059 | 0,0081 | 0,0100 |
| Уровень 1 положение 15 без поправки | 1,539 | 1,432 | 0,01999 | 0,00395 | 0,0044 | 0,00445 | 0,0044 | 0,0204 | 0,0209 |
| Уровень 1 положение 15 без поправки | 1,580 | 1,372 | 0,00954 | 0,00721 | 0,0008 | 0,00488 | 0,0028 | 0,0120 | 0,0123 |
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,596 | 1,766 | 0,00308 | 0,00886 | 0,0011 | 0,00857 | 0,0037 | 0,0094 | 0,0101 |
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,571 | 1,739 | 0,00003 | 0,00969 | 0,0044 | 0,01271 | 0,0085 | 0,0097 | 0,0129 |
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,560 | 1,709 | 0,03023 | 0,01909 | 0,0022 | 0,00610 | 0,0020 | 0,0358 | 0,0358 |
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,533 | 1,775 | 0,01098 | 0,00640 | 0,0122 | 0,00926 | 0,0107 | 0,0127 | 0,0166 |
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,602 | 1,721 | 0,02694 | 0,01147 | 0,0007 | 0,00290 | 0,0011 | 0,0293 | 0,0293 |
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,678 | 1,675 | 0,00700 | 0,00316 | 0,0004 | 0,00948 | 0,0046 | 0,0077 | 0,0089 |
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,671 | 1,684 | 0,03831 | 0,01307 | 0,0050 | 0,00625 | 0,0006 | 0,0405 | 0,0405 |

продолжение приложения Д

|                                     |       |       |         |         |        |         |        |        |        |
|-------------------------------------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,597 | 1,600 | 0,01083 | 0,00852 | 0,0083 | 0,00855 | 0,0084 | 0,0138 | 0,0161 |
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,663 | 1,618 | 0,01341 | 0,00848 | 0,0024 | 0,01214 | 0,0073 | 0,0159 | 0,0174 |
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,598 | 1,681 | 0,01321 | 0,00943 | 0,0065 | 0,00593 | 0,0062 | 0,0162 | 0,0174 |
| Уровень 1 положение 18 без поправки | 1,775 | 1,621 | 0,02213 | 0,00870 | 0,0049 | 0,00846 | 0,0018 | 0,0238 | 0,0238 |
| Уровень 1 положение 18 без поправки | 1,742 | 1,594 | 0,01875 | 0,00718 | 0,0009 | 0,00977 | 0,0054 | 0,0201 | 0,0208 |
| Уровень 1 положение 18 без поправки | 1,742 | 1,596 | 0,02834 | 0,01185 | 0,0074 | 0,00614 | 0,0006 | 0,0307 | 0,0307 |
| Уровень 1 положение 18 без поправки | 1,704 | 1,620 | 0,03358 | 0,01688 | 0,0084 | 0,01421 | 0,0029 | 0,0376 | 0,0377 |
| Уровень 1 положение 18 без поправки | 1,766 | 1,560 | 0,01591 | 0,00367 | 0,0008 | 0,00457 | 0,0027 | 0,0163 | 0,0165 |
| Уровень 1 положение 1 без поправки  | 0,742 | 1,041 | 0,00223 | 0,00606 | 0,0033 | 0,00526 | 0,0010 | 0,0065 | 0,0065 |
| Уровень 1 положение 1 без поправки  | 0,736 | 1,023 | 0,00200 | 0,00880 | 0,0003 | 0,00283 | 0,0013 | 0,0090 | 0,0091 |
| Уровень 1 положение 1 без поправки  | 0,713 | 1,000 | 0,00255 | 0,00130 | 0,0040 | 0,00126 | 0,0014 | 0,0029 | 0,0032 |
| Уровень 1 положение 1 без поправки  | 0,714 | 1,023 | 0,00200 | 0,00784 | 0,0021 | 0,00526 | 0,0037 | 0,0081 | 0,0089 |
| Уровень 1 положение 1 без поправки  | 0,748 | 1,006 | 0,00298 | 0,00635 | 0,0029 | 0,00411 | 0,0006 | 0,0070 | 0,0070 |
| Уровень 1 положение 2 без поправки  | 0,894 | 0,888 | 0,00427 | 0,00079 | 0,0093 | 0,00000 | 0,0046 | 0,0043 | 0,0064 |
| Уровень 1 положение 2 без поправки  | 0,877 | 0,883 | 0,00686 | 0,00531 | 0,0113 | 0,00606 | 0,0026 | 0,0087 | 0,0091 |
| Уровень 1 положение 2 без поправки  | 0,853 | 0,866 | 0,01161 | 0,00592 | 0,0106 | 0,00267 | 0,0040 | 0,0130 | 0,0136 |
| Уровень 1 положение 2 без поправки  | 0,851 | 0,893 | 0,00446 | 0,00228 | 0,0067 | 0,00573 | 0,0005 | 0,0050 | 0,0050 |
| Уровень 1 положение 2 без поправки  | 0,882 | 0,861 | 0,00898 | 0,00089 | 0,0090 | 0,00229 | 0,0033 | 0,0090 | 0,0096 |
| Уровень 1 положение 3 без поправки  | 1,050 | 0,740 | 0,00532 | 0,00063 | 0,0140 | 0,00184 | 0,0061 | 0,0054 | 0,0081 |
| Уровень 1 положение 3 без поправки  | 1,028 | 0,738 | 0,01062 | 0,00475 | 0,0174 | 0,00255 | 0,0074 | 0,0116 | 0,0138 |
| Уровень 1 положение 3 без поправки  | 1,012 | 0,706 | 0,00639 | 0,00080 | 0,0082 | 0,00422 | 0,0020 | 0,0064 | 0,0067 |
| Уровень 1 положение 3 без поправки  | 1,017 | 0,744 | 0,00920 | 0,00382 | 0,0092 | 0,00218 | 0,0035 | 0,0100 | 0,0106 |
| Уровень 1 положение 3 без поправки  | 1,034 | 0,714 | 0,01117 | 0,00599 | 0,0146 | 0,00665 | 0,0040 | 0,0127 | 0,0133 |
| Уровень 1 положение 4 без поправки  | 0,892 | 1,152 | 0,00157 | 0,00489 | 0,0032 | 0,00449 | 0,0006 | 0,0051 | 0,0052 |
| Уровень 1 положение 4 без поправки  | 0,858 | 1,128 | 0,00458 | 0,00374 | 0,0030 | 0,00592 | 0,0045 | 0,0059 | 0,0074 |
| Уровень 1 положение 4 без поправки  | 0,855 | 1,122 | 0,00644 | 0,00156 | 0,0034 | 0,00420 | 0,0004 | 0,0066 | 0,0066 |
| Уровень 1 положение 4 без поправки  | 0,847 | 1,157 | 0,00009 | 0,00305 | 0,0039 | 0,00754 | 0,0018 | 0,0030 | 0,0036 |
| Уровень 1 положение 4 без поправки  | 0,879 | 1,115 | 0,00291 | 0,00798 | 0,0002 | 0,00248 | 0,0014 | 0,0085 | 0,0086 |
| Уровень 1 положение 5 без поправки  | 1,001 | 1,011 | 0,00137 | 0,00181 | 0,0034 | 0,00084 | 0,0013 | 0,0023 | 0,0026 |
| Уровень 1 положение 5 без поправки  | 0,997 | 1,007 | 0,00567 | 0,00214 | 0,0059 | 0,00061 | 0,0033 | 0,0061 | 0,0069 |
| Уровень 1 положение 5 без поправки  | 0,969 | 0,978 | 0,00521 | 0,00010 | 0,0015 | 0,00259 | 0,0006 | 0,0052 | 0,0052 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой   | 0,966 | 0,967 | 0,00100 | 0,00013 | 0,0039 | 0,00426 | 0,0002 | 0,0010 | 0,0010 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой   | 0,980 | 0,977 | 0,00005 | 0,00018 | 0,0032 | 0,00132 | 0,0009 | 0,0002 | 0,0010 |
| Уровень 1 положение 6 без поправки  | 1,153 | 0,879 | 0,00427 | 0,00328 | 0,0123 | 0,00534 | 0,0035 | 0,0054 | 0,0064 |
| Уровень 1 положение 6 без поправки  | 1,137 | 0,869 | 0,00581 | 0,00166 | 0,0088 | 0,00149 | 0,0037 | 0,0060 | 0,0071 |
| Уровень 1 положение 6 без поправки  | 1,100 | 0,854 | 0,01524 | 0,00771 | 0,0129 | 0,00154 | 0,0057 | 0,0171 | 0,0180 |
| Уровень 1 положение 6 без поправки  | 1,143 | 0,848 | 0,00964 | 0,00425 | 0,0127 | 0,00730 | 0,0027 | 0,0105 | 0,0109 |
| Уровень 1 положение 6 без поправки  | 1,111 | 0,876 | 0,00240 | 0,00063 | 0,0058 | 0,00402 | 0,0009 | 0,0025 | 0,0026 |
| Уровень 1 положение 7 без поправки  | 1,056 | 1,280 | 0,00467 | 0,00152 | 0,0017 | 0,00245 | 0,0004 | 0,0049 | 0,0049 |
| Уровень 1 положение 7 без поправки  | 1,032 | 1,257 | 0,00066 | 0,00367 | 0,0010 | 0,00151 | 0,0012 | 0,0037 | 0,0039 |
| Уровень 1 положение 7 без поправки  | 1,018 | 1,246 | 0,01132 | 0,00674 | 0,0034 | 0,00042 | 0,0019 | 0,0132 | 0,0133 |
| Уровень 1 положение 7 без поправки  | 1,049 | 1,220 | 0,00129 | 0,00208 | 0,0006 | 0,00001 | 0,0003 | 0,0025 | 0,0025 |
| Уровень 1 положение 7 без поправки  | 1,012 | 1,266 | 0,00604 | 0,01102 | 0,0037 | 0,00341 | 0,0001 | 0,0126 | 0,0126 |

продолжение приложения Д

|                                     |       |       |         |         |        |         |        |        |        |
|-------------------------------------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Уровень 1 положение 8 без поправки  | 1,166 | 1,168 | 0,00038 | 0,00139 | 0,0022 | 0,00491 | 0,0014 | 0,0014 | 0,0020 |
| Уровень 1 положение 8 без поправки  | 1,169 | 1,168 | 0,00989 | 0,00163 | 0,0063 | 0,00351 | 0,0014 | 0,0100 | 0,0101 |
| Уровень 1 положение 8 без поправки  | 1,124 | 1,113 | 0,00339 | 0,00311 | 0,0015 | 0,00502 | 0,0032 | 0,0046 | 0,0056 |
| Уровень 1 положение 8 без поправки  | 1,113 | 1,163 | 0,00790 | 0,00486 | 0,0010 | 0,00467 | 0,0028 | 0,0093 | 0,0097 |
| Уровень 1 положение 8 без поправки  | 1,175 | 1,126 | 0,00539 | 0,00340 | 0,0061 | 0,00293 | 0,0016 | 0,0064 | 0,0066 |
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,307 | 1,061 | 0,01112 | 0,00102 | 0,0065 | 0,00344 | 0,0015 | 0,0112 | 0,0113 |
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,295 | 1,051 | 0,01181 | 0,00530 | 0,0084 | 0,00418 | 0,0021 | 0,0129 | 0,0131 |
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,246 | 1,045 | 0,02237 | 0,00683 | 0,0115 | 0,00137 | 0,0050 | 0,0234 | 0,0239 |
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,305 | 1,008 | 0,01109 | 0,00325 | 0,0097 | 0,00446 | 0,0026 | 0,0116 | 0,0118 |
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,265 | 1,058 | 0,01638 | 0,00674 | 0,0094 | 0,00330 | 0,0030 | 0,0177 | 0,0180 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,247 | 1,445 | 0,00068 | 0,00036 | 0,0006 | 0,00327 | 0,0019 | 0,0008 | 0,0021 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,235 | 1,436 | 0,00391 | 0,00467 | 0,0043 | 0,00466 | 0,0002 | 0,0061 | 0,0061 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,205 | 1,388 | 0,00056 | 0,00253 | 0,0018 | 0,00621 | 0,0040 | 0,0026 | 0,0048 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,260 | 1,419 | 0,01467 | 0,00423 | 0,0019 | 0,00234 | 0,0002 | 0,0153 | 0,0153 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,200 | 1,446 | 0,00822 | 0,00423 | 0,0031 | 0,00330 | 0,0032 | 0,0092 | 0,0098 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,323 | 1,322 | 0,00809 | 0,00256 | 0,0031 | 0,00161 | 0,0008 | 0,0085 | 0,0085 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,299 | 1,296 | 0,00272 | 0,00168 | 0,0056 | 0,00213 | 0,0017 | 0,0032 | 0,0036 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,288 | 1,292 | 0,02504 | 0,01056 | 0,0075 | 0,00117 | 0,0043 | 0,0272 | 0,0275 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,325 | 1,284 | 0,00833 | 0,00009 | 0,0015 | 0,00161 | 0,0001 | 0,0083 | 0,0083 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,264 | 1,318 | 0,01257 | 0,01191 | 0,0083 | 0,00142 | 0,0035 | 0,0173 | 0,0177 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,433 | 1,227 | 0,00951 | 0,00290 | 0,0064 | 0,00063 | 0,0029 | 0,0099 | 0,0104 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,416 | 1,221 | 0,02594 | 0,01132 | 0,0071 | 0,00623 | 0,0004 | 0,0283 | 0,0283 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,373 | 1,183 | 0,01419 | 0,01065 | 0,0004 | 0,00703 | 0,0033 | 0,0177 | 0,0180 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,432 | 1,188 | 0,01113 | 0,00602 | 0,0065 | 0,00732 | 0,0004 | 0,0127 | 0,0127 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,385 | 1,227 | 0,02789 | 0,01003 | 0,0099 | 0,00361 | 0,0031 | 0,0296 | 0,0298 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,424 | 1,617 | 0,01468 | 0,00964 | 0,0024 | 0,00370 | 0,0007 | 0,0176 | 0,0176 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,408 | 1,608 | 0,01767 | 0,00837 | 0,0022 | 0,00535 | 0,0038 | 0,0196 | 0,0199 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,381 | 1,571 | 0,02785 | 0,01030 | 0,0037 | 0,00225 | 0,0007 | 0,0297 | 0,0297 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,374 | 1,605 | 0,02129 | 0,01270 | 0,0039 | 0,00525 | 0,0007 | 0,0248 | 0,0248 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,378 | 1,623 | 0,01643 | 0,00477 | 0,0062 | 0,00781 | 0,0070 | 0,0171 | 0,0185 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,482 | 1,486 | 0,00592 | 0,00517 | 0,0024 | 0,00669 | 0,0022 | 0,0079 | 0,0081 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,463 | 1,472 | 0,01292 | 0,00016 | 0,0040 | 0,00256 | 0,0033 | 0,0129 | 0,0133 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,408 | 1,437 | 0,01069 | 0,00702 | 0,0068 | 0,00465 | 0,0057 | 0,0128 | 0,0140 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,471 | 1,444 | 0,01621 | 0,00494 | 0,0028 | 0,00146 | 0,0007 | 0,0170 | 0,0170 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,428 | 1,504 | 0,01923 | 0,00766 | 0,0077 | 0,00749 | 0,0076 | 0,0207 | 0,0221 |
| Уровень 1 положение 15 без поправки | 1,598 | 1,422 | 0,01367 | 0,00426 | 0,0024 | 0,00085 | 0,0016 | 0,0143 | 0,0144 |
| Уровень 1 положение 15 без поправки | 1,587 | 1,423 | 0,02897 | 0,01309 | 0,0067 | 0,00432 | 0,0012 | 0,0318 | 0,0318 |
| Уровень 1 положение 15 без поправки | 1,552 | 1,422 | 0,02650 | 0,01102 | 0,0043 | 0,00430 | 0,0000 | 0,0287 | 0,0287 |
| Уровень 1 положение 15 без поправки | 1,538 | 1,350 | 0,01083 | 0,00508 | 0,0026 | 0,00396 | 0,0033 | 0,0120 | 0,0124 |
| Уровень 1 положение 15 без поправки | 1,524 | 1,425 | 0,01910 | 0,01105 | 0,0038 | 0,00443 | 0,0041 | 0,0221 | 0,0224 |
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,598 | 1,773 | 0,01454 | 0,01413 | 0,0009 | 0,00258 | 0,0018 | 0,0203 | 0,0204 |
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,589 | 1,745 | 0,01232 | 0,01305 | 0,0032 | 0,00591 | 0,0014 | 0,0180 | 0,0180 |
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,579 | 1,746 | 0,02898 | 0,01479 | 0,0003 | 0,00384 | 0,0021 | 0,0325 | 0,0326 |

продолжение приложения Д

|                                     |       |       |         |         |        |         |        |        |        |
|-------------------------------------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,561 | 1,780 | 0,02274 | 0,01406 | 0,0022 | 0,00495 | 0,0014 | 0,0267 | 0,0268 |
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,570 | 1,683 | 0,00443 | 0,01026 | 0,0038 | 0,00587 | 0,0010 | 0,0112 | 0,0112 |
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,685 | 1,695 | 0,02253 | 0,01209 | 0,0031 | 0,00747 | 0,0022 | 0,0256 | 0,0257 |
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,654 | 1,660 | 0,01401 | 0,00340 | 0,0038 | 0,00204 | 0,0029 | 0,0144 | 0,0147 |
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,615 | 1,614 | 0,02116 | 0,01239 | 0,0062 | 0,00420 | 0,0052 | 0,0245 | 0,0251 |
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,682 | 1,635 | 0,01178 | 0,00329 | 0,0008 | 0,00506 | 0,0029 | 0,0122 | 0,0126 |
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,612 | 1,664 | 0,01746 | 0,01203 | 0,0022 | 0,00621 | 0,0042 | 0,0212 | 0,0216 |
| Уровень 1 положение 18 без поправки | 1,766 | 1,596 | 0,01651 | 0,00324 | 0,0054 | 0,00427 | 0,0005 | 0,0168 | 0,0168 |
| Уровень 1 положение 18 без поправки | 1,754 | 1,583 | 0,02431 | 0,01007 | 0,0100 | 0,00370 | 0,0032 | 0,0263 | 0,0265 |
| Уровень 1 положение 18 без поправки | 1,715 | 1,591 | 0,04073 | 0,03055 | 0,0071 | 0,00789 | 0,0004 | 0,0509 | 0,0509 |
| Уровень 1 положение 18 без поправки | 1,681 | 1,587 | 0,01656 | 0,01592 | 0,0019 | 0,00770 | 0,0048 | 0,0230 | 0,0235 |
| Уровень 1 положение 18 без поправки | 1,755 | 1,569 | 0,02536 | 0,00945 | 0,0100 | 0,00309 | 0,0034 | 0,0271 | 0,0273 |
| Уровень 1 положение 1 без поправки  | 0,740 | 1,055 | 0,00118 | 0,00615 | 0,0037 | 0,00446 | 0,0004 | 0,0063 | 0,0063 |
| Уровень 1 положение 1 без поправки  | 0,732 | 1,051 | 0,00571 | 0,00515 | 0,0045 | 0,00067 | 0,0019 | 0,0077 | 0,0079 |
| Уровень 1 положение 1 без поправки  | 0,709 | 1,039 | 0,00363 | 0,00183 | 0,0015 | 0,00324 | 0,0009 | 0,0041 | 0,0042 |
| Уровень 1 положение 1 без поправки  | 0,732 | 1,012 | 0,00344 | 0,00162 | 0,0036 | 0,00700 | 0,0017 | 0,0038 | 0,0042 |
| Уровень 1 положение 1 без поправки  | 0,711 | 1,060 | 0,00403 | 0,00331 | 0,0016 | 0,00061 | 0,0005 | 0,0052 | 0,0052 |
| Уровень 1 положение 2 без поправки  | 0,874 | 0,874 | 0,00466 | 0,00050 | 0,0079 | 0,00158 | 0,0032 | 0,0047 | 0,0057 |
| Уровень 1 положение 2 без поправки  | 0,853 | 0,871 | 0,00614 | 0,00152 | 0,0075 | 0,00055 | 0,0035 | 0,0063 | 0,0072 |
| Уровень 1 положение 2 без поправки  | 0,841 | 0,852 | 0,01164 | 0,00778 | 0,0093 | 0,00026 | 0,0048 | 0,0140 | 0,0148 |
| Уровень 1 положение 2 без поправки  | 0,837 | 0,875 | 0,00517 | 0,00338 | 0,0082 | 0,00160 | 0,0049 | 0,0062 | 0,0079 |
| Уровень 1 положение 2 без поправки  | 0,860 | 0,838 | 0,00798 | 0,00366 | 0,0055 | 0,00092 | 0,0023 | 0,0088 | 0,0091 |
| Уровень 1 положение 3 без поправки  | 1,045 | 0,737 | 0,01079 | 0,00342 | 0,0119 | 0,00079 | 0,0056 | 0,0113 | 0,0126 |
| Уровень 1 положение 3 без поправки  | 1,028 | 0,726 | 0,00775 | 0,00303 | 0,0104 | 0,00088 | 0,0047 | 0,0083 | 0,0096 |
| Уровень 1 положение 3 без поправки  | 0,994 | 0,716 | 0,01704 | 0,01183 | 0,0146 | 0,00076 | 0,0077 | 0,0207 | 0,0221 |
| Уровень 1 положение 3 без поправки  | 1,044 | 0,707 | 0,01010 | 0,00459 | 0,0144 | 0,00019 | 0,0071 | 0,0111 | 0,0132 |
| Уровень 1 положение 3 без поправки  | 1,007 | 0,724 | 0,00670 | 0,00123 | 0,0124 | 0,00090 | 0,0058 | 0,0068 | 0,0089 |
| Уровень 1 положение 4 без поправки  | 0,877 | 1,139 | 0,00035 | 0,00063 | 0,0039 | 0,00239 | 0,0007 | 0,0007 | 0,0010 |
| Уровень 1 положение 4 без поправки  | 0,876 | 1,126 | 0,00341 | 0,00127 | 0,0049 | 0,00114 | 0,0019 | 0,0036 | 0,0041 |
| Уровень 1 положение 4 без поправки  | 0,850 | 1,094 | 0,00398 | 0,00119 | 0,0013 | 0,00145 | 0,0001 | 0,0042 | 0,0042 |
| Уровень 1 положение 4 без поправки  | 0,884 | 1,106 | 0,00543 | 0,00019 | 0,0029 | 0,00133 | 0,0008 | 0,0054 | 0,0055 |
| Уровень 1 положение 4 без поправки  | 0,843 | 1,130 | 0,00355 | 0,00384 | 0,0008 | 0,00110 | 0,0010 | 0,0052 | 0,0053 |
| Уровень 1 положение 5 без поправки  | 1,004 | 1,003 | 0,00142 | 0,00055 | 0,0057 | 0,00154 | 0,0021 | 0,0015 | 0,0026 |
| Уровень 1 положение 5 без поправки  | 0,993 | 0,998 | 0,00975 | 0,00865 | 0,0104 | 0,00278 | 0,0038 | 0,0130 | 0,0136 |
| Уровень 1 положение 5 без поправки  | 0,971 | 0,965 | 0,00667 | 0,00063 | 0,0052 | 0,00418 | 0,0005 | 0,0067 | 0,0067 |
| Уровень 1 положение 5 без поправки  | 1,001 | 0,964 | 0,00753 | 0,00129 | 0,0081 | 0,00278 | 0,0054 | 0,0076 | 0,0094 |
| Уровень 1 положение 5 без поправки  | 0,975 | 1,007 | 0,00686 | 0,00415 | 0,0029 | 0,00092 | 0,0019 | 0,0080 | 0,0082 |
| Уровень 1 положение 6 без поправки  | 1,147 | 0,889 | 0,00766 | 0,00430 | 0,0117 | 0,00064 | 0,0062 | 0,0088 | 0,0107 |
| Уровень 1 положение 6 без поправки  | 1,133 | 0,890 | 0,01473 | 0,00581 | 0,0129 | 0,00172 | 0,0073 | 0,0158 | 0,0174 |
| Уровень 1 положение 6 без поправки  | 1,111 | 0,858 | 0,01013 | 0,00346 | 0,0071 | 0,00030 | 0,0037 | 0,0107 | 0,0113 |
| Уровень 1 положение 6 без поправки  | 1,095 | 0,900 | 0,01646 | 0,01064 | 0,0108 | 0,00076 | 0,0058 | 0,0196 | 0,0204 |
| Уровень 1 положение 6 без поправки  | 1,100 | 0,881 | 0,00685 | 0,00275 | 0,0096 | 0,00056 | 0,0051 | 0,0074 | 0,0090 |
| Уровень 1 положение 7 без поправки  | 1,046 | 1,287 | 0,00498 | 0,00186 | 0,0015 | 0,00055 | 0,0010 | 0,0053 | 0,0054 |

продолжение приложения Д

|                                     |       |       |         |         |        |         |        |        |        |
|-------------------------------------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Уровень 1 положение 7 без поправки  | 1,034 | 1,266 | 0,00575 | 0,00170 | 0,0002 | 0,00205 | 0,0011 | 0,0060 | 0,0061 |
| Уровень 1 положение 7 без поправки  | 1,000 | 1,235 | 0,01065 | 0,00758 | 0,0038 | 0,00198 | 0,0029 | 0,0131 | 0,0134 |
| Уровень 1 положение 7 без поправки  | 1,029 | 1,243 | 0,00979 | 0,00149 | 0,0015 | 0,00250 | 0,0005 | 0,0099 | 0,0099 |
| Уровень 1 положение 7 без поправки  | 1,007 | 1,293 | 0,00815 | 0,00963 | 0,0039 | 0,00100 | 0,0014 | 0,0126 | 0,0127 |
| Уровень 1 положение 8 без поправки  | 1,154 | 1,160 | 0,00643 | 0,00578 | 0,0091 | 0,00080 | 0,0050 | 0,0086 | 0,0100 |
| Уровень 1 положение 8 без поправки  | 1,134 | 1,140 | 0,00441 | 0,00475 | 0,0035 | 0,00075 | 0,0021 | 0,0065 | 0,0068 |
| Уровень 1 положение 8 без поправки  | 1,096 | 1,113 | 0,01365 | 0,00923 | 0,0059 | 0,00337 | 0,0046 | 0,0165 | 0,0171 |
| Уровень 1 положение 8 без поправки  | 1,113 | 1,154 | 0,00641 | 0,00012 | 0,0007 | 0,00217 | 0,0014 | 0,0064 | 0,0066 |
| Уровень 1 положение 8 без поправки  | 1,154 | 1,105 | 0,00580 | 0,00451 | 0,0050 | 0,00466 | 0,0001 | 0,0073 | 0,0073 |
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,286 | 1,057 | 0,00960 | 0,00576 | 0,0090 | 0,00118 | 0,0039 | 0,0112 | 0,0119 |
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,266 | 1,054 | 0,01621 | 0,00967 | 0,0103 | 0,00008 | 0,0052 | 0,0189 | 0,0196 |
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,220 | 1,015 | 0,01225 | 0,00787 | 0,0038 | 0,00133 | 0,0012 | 0,0146 | 0,0146 |
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,232 | 1,056 | 0,00763 | 0,00611 | 0,0054 | 0,00246 | 0,0015 | 0,0098 | 0,0099 |
| Уровень 1 положение 9 без поправки  | 1,266 | 1,009 | 0,01252 | 0,00411 | 0,0042 | 0,00013 | 0,0020 | 0,0132 | 0,0133 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,218 | 1,428 | 0,00516 | 0,00037 | 0,0002 | 0,00395 | 0,0019 | 0,0052 | 0,0055 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,209 | 1,418 | 0,01339 | 0,00466 | 0,0015 | 0,00062 | 0,0004 | 0,0142 | 0,0142 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,168 | 1,381 | 0,00947 | 0,00835 | 0,0047 | 0,00434 | 0,0045 | 0,0126 | 0,0134 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,187 | 1,422 | 0,01308 | 0,00048 | 0,0017 | 0,00228 | 0,0020 | 0,0131 | 0,0132 |
| Уровень 1 положение 10 без поправки | 1,165 | 1,448 | 0,01922 | 0,01410 | 0,0051 | 0,00203 | 0,0015 | 0,0238 | 0,0239 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,320 | 1,320 | 0,00891 | 0,00807 | 0,0051 | 0,00033 | 0,0027 | 0,0120 | 0,0123 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,297 | 1,297 | 0,00472 | 0,00450 | 0,0032 | 0,00149 | 0,0009 | 0,0065 | 0,0066 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,271 | 1,297 | 0,02196 | 0,01003 | 0,0059 | 0,00008 | 0,0030 | 0,0241 | 0,0243 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,286 | 1,323 | 0,02696 | 0,01863 | 0,0062 | 0,00124 | 0,0025 | 0,0328 | 0,0329 |
| Уровень 1 положение 11 без поправки | 1,326 | 1,263 | 0,01233 | 0,00154 | 0,0020 | 0,00275 | 0,0024 | 0,0124 | 0,0126 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,432 | 1,222 | 0,00643 | 0,00537 | 0,0039 | 0,00153 | 0,0012 | 0,0084 | 0,0085 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,424 | 1,220 | 0,02069 | 0,00702 | 0,0090 | 0,00141 | 0,0052 | 0,0218 | 0,0225 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,379 | 1,172 | 0,01829 | 0,00957 | 0,0036 | 0,00300 | 0,0003 | 0,0206 | 0,0206 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,382 | 1,240 | 0,02214 | 0,01070 | 0,0087 | 0,00001 | 0,0043 | 0,0246 | 0,0250 |
| Уровень 1 положение 12 без поправки | 1,415 | 1,188 | 0,01519 | 0,00425 | 0,0055 | 0,00130 | 0,0034 | 0,0158 | 0,0161 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,404 | 1,586 | 0,01102 | 0,01000 | 0,0014 | 0,00470 | 0,0030 | 0,0149 | 0,0152 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,406 | 1,574 | 0,02287 | 0,01006 | 0,0037 | 0,00102 | 0,0014 | 0,0250 | 0,0250 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,342 | 1,531 | 0,01219 | 0,00912 | 0,0054 | 0,00708 | 0,0063 | 0,0152 | 0,0165 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,360 | 1,597 | 0,02002 | 0,01037 | 0,0052 | 0,00267 | 0,0040 | 0,0226 | 0,0229 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,394 | 1,537 | 0,01859 | 0,01135 | 0,0018 | 0,00518 | 0,0017 | 0,0218 | 0,0218 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,495 | 1,503 | 0,01277 | 0,00665 | 0,0002 | 0,00375 | 0,0020 | 0,0144 | 0,0145 |
| Уровень 1 положение 13 без поправки | 1,483 | 1,488 | 0,01833 | 0,00749 | 0,0051 | 0,00203 | 0,0015 | 0,0198 | 0,0199 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,435 | 1,449 | 0,01785 | 0,00986 | 0,0006 | 0,00751 | 0,0041 | 0,0204 | 0,0208 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,502 | 1,438 | 0,02151 | 0,01118 | 0,0035 | 0,00927 | 0,0029 | 0,0242 | 0,0244 |
| Уровень 1 положение 14 без поправки | 1,437 | 1,490 | 0,02032 | 0,00856 | 0,0006 | 0,00202 | 0,0013 | 0,0221 | 0,0221 |
| Уровень 1 положение 15 без поправки | 1,594 | 1,422 | 0,01521 | 0,00720 | 0,0085 | 0,00157 | 0,0034 | 0,0168 | 0,0172 |
| Уровень 1 положение 15 без поправки | 1,581 | 1,397 | 0,01476 | 0,00596 | 0,0007 | 0,00500 | 0,0021 | 0,0159 | 0,0161 |
| Уровень 1 положение 15 без поправки | 1,544 | 1,438 | 0,03887 | 0,01634 | 0,0080 | 0,00673 | 0,0007 | 0,0422 | 0,0422 |
| Уровень 1 положение 15 без поправки | 1,603 | 1,377 | 0,02298 | 0,00778 | 0,0027 | 0,00002 | 0,0014 | 0,0243 | 0,0243 |

продолжение приложения Д

|                                     |       |       |         |         |        |         |        |        |        |
|-------------------------------------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,600 | 1,777 | 0,01929 | 0,01266 | 0,0034 | 0,00643 | 0,0049 | 0,0231 | 0,0236 |
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,597 | 1,770 | 0,02956 | 0,01458 | 0,0023 | 0,00006 | 0,0011 | 0,0330 | 0,0330 |
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,518 | 1,693 | 0,00703 | 0,01291 | 0,0040 | 0,00683 | 0,0054 | 0,0147 | 0,0157 |
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,550 | 1,765 | 0,02548 | 0,00968 | 0,0075 | 0,00223 | 0,0049 | 0,0273 | 0,0277 |
| Уровень 1 положение 16 без поправки | 1,571 | 1,699 | 0,01200 | 0,01592 | 0,0039 | 0,00681 | 0,0014 | 0,0199 | 0,0200 |
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,673 | 1,684 | 0,01032 | 0,00763 | 0,0020 | 0,00197 | 0,0020 | 0,0128 | 0,0130 |
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,664 | 1,682 | 0,03431 | 0,01395 | 0,0040 | 0,00006 | 0,0020 | 0,0370 | 0,0371 |
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,609 | 1,617 | 0,01991 | 0,01452 | 0,0021 | 0,00790 | 0,0050 | 0,0246 | 0,0251 |
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,674 | 1,614 | 0,01892 | 0,01200 | 0,0000 | 0,00400 | 0,0020 | 0,0224 | 0,0225 |
| Уровень 1 положение 17 без поправки | 1,630 | 1,668 | 0,02183 | 0,00592 | 0,0040 | 0,00199 | 0,0030 | 0,0226 | 0,0228 |
| Уровень 1 положение 18 без поправки | 1,758 | 1,597 | 0,01267 | 0,00707 | 0,0029 | 0,00115 | 0,0020 | 0,0145 | 0,0146 |
| Уровень 1 Положение 18 без поправки | 1,754 | 1,603 | 0,03602 | 0,01130 | 0,0071 | 0,00273 | 0,0022 | 0,0377 | 0,0378 |
| Уровень 1 положение 18 без поправки | 1,687 | 1,532 | 0,03023 | 0,01279 | 0,0009 | 0,00793 | 0,0035 | 0,0328 | 0,0330 |
| Уровень 1 положение 18 без поправки | 1,712 | 1,587 | 0,03157 | 0,01254 | 0,0029 | 0,00840 | 0,0027 | 0,0340 | 0,0341 |
| Уровень 1 положение 18 без поправки | 1,773 | 1,557 | 0,02248 | 0,00693 | 0,0050 | 0,00124 | 0,0031 | 0,0235 | 0,0237 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой   | 0,738 | 1,043 | 0,00084 | 0,00027 | 0,0099 | 0,00039 | 0,0051 | 0,0009 | 0,0052 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой   | 0,732 | 1,026 | 0,00118 | 0,00002 | 0,0066 | 0,00213 | 0,0022 | 0,0012 | 0,0025 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой   | 0,707 | 0,994 | 0,00066 | 0,00061 | 0,0121 | 0,00122 | 0,0066 | 0,0009 | 0,0067 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой   | 0,701 | 1,026 | 0,00015 | 0,00011 | 0,0023 | 0,00211 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0002 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой   | 0,738 | 1,004 | 0,00004 | 0,00010 | 0,0090 | 0,00105 | 0,0050 | 0,0001 | 0,0050 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой   | 0,892 | 0,888 | 0,00011 | 0,00017 | 0,0139 | 0,00153 | 0,0062 | 0,0002 | 0,0062 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой   | 0,882 | 0,879 | 0,00076 | 0,00013 | 0,0176 | 0,00003 | 0,0088 | 0,0008 | 0,0088 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой   | 0,849 | 0,854 | 0,00003 | 0,00039 | 0,0161 | 0,00201 | 0,0091 | 0,0004 | 0,0091 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой   | 0,857 | 0,889 | 0,00119 | 0,00036 | 0,0180 | 0,00062 | 0,0087 | 0,0012 | 0,0088 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой   | 0,881 | 0,846 | 0,00083 | 0,00013 | 0,0092 | 0,00129 | 0,0052 | 0,0008 | 0,0053 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой   | 1,054 | 0,742 | 0,00186 | 0,00016 | 0,0256 | 0,00473 | 0,0152 | 0,0019 | 0,0153 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой   | 1,045 | 0,738 | 0,00278 | 0,00056 | 0,0178 | 0,00548 | 0,0116 | 0,0028 | 0,0120 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой   | 1,001 | 0,705 | 0,00193 | 0,00004 | 0,0135 | 0,00233 | 0,0079 | 0,0019 | 0,0081 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой   | 1,053 | 0,714 | 0,00208 | 0,00045 | 0,0232 | 0,00473 | 0,0139 | 0,0021 | 0,0141 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой   | 1,000 | 0,737 | 0,00172 | 0,00006 | 0,0136 | 0,00298 | 0,0083 | 0,0017 | 0,0085 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой   | 0,891 | 1,151 | 0,00077 | 0,00008 | 0,0048 | 0,00257 | 0,0011 | 0,0008 | 0,0014 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой   | 0,879 | 1,133 | 0,00088 | 0,00078 | 0,0077 | 0,00308 | 0,0023 | 0,0012 | 0,0026 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой   | 0,848 | 1,088 | 0,00029 | 0,00075 | 0,0009 | 0,00520 | 0,0031 | 0,0008 | 0,0032 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой   | 0,885 | 1,094 | 0,00088 | 0,00064 | 0,0068 | 0,00081 | 0,0030 | 0,0011 | 0,0032 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой   | 0,849 | 1,150 | 0,00046 | 0,00082 | 0,0012 | 0,00239 | 0,0018 | 0,0009 | 0,0020 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой   | 1,016 | 1,013 | 0,00059 | 0,00027 | 0,0119 | 0,00123 | 0,0053 | 0,0007 | 0,0054 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой   | 1,005 | 0,994 | 0,00027 | 0,00041 | 0,0059 | 0,00330 | 0,0013 | 0,0005 | 0,0014 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой   | 0,966 | 0,973 | 0,00094 | 0,00060 | 0,0146 | 0,00083 | 0,0077 | 0,0011 | 0,0078 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой   | 0,984 | 1,012 | 0,00001 | 0,00001 | 0,0041 | 0,00232 | 0,0009 | 0,0000 | 0,0009 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой   | 1,009 | 0,981 | 0,00078 | 0,00063 | 0,0140 | 0,00199 | 0,0080 | 0,0010 | 0,0081 |
| Уровень 1 положение 6 с поправкой   | 1,169 | 0,893 | 0,00112 | 0,00069 | 0,0128 | 0,00005 | 0,0064 | 0,0013 | 0,0066 |
| Уровень 1 положение 6 с поправкой   | 1,156 | 0,879 | 0,00081 | 0,00021 | 0,0170 | 0,00223 | 0,0096 | 0,0008 | 0,0097 |
| Уровень 1 положение 6 с поправкой   | 1,120 | 0,860 | 0,00126 | 0,00020 | 0,0073 | 0,00307 | 0,0021 | 0,0013 | 0,0025 |

продолжение приложения Д

|                                    |       |       |         |         |        |         |        |        |        |
|------------------------------------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Уровень 1 положение 6 с поправкой  | 1,113 | 0,881 | 0,00136 | 0,00031 | 0,0189 | 0,00191 | 0,0104 | 0,0014 | 0,0105 |
| Уровень 1 положение 6 с поправкой  | 1,169 | 0,850 | 0,00067 | 0,00045 | 0,0156 | 0,00180 | 0,0087 | 0,0008 | 0,0087 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 1,045 | 1,298 | 0,00068 | 0,00022 | 0,0063 | 0,00361 | 0,0014 | 0,0007 | 0,0015 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 1,034 | 1,287 | 0,00089 | 0,00063 | 0,0076 | 0,00083 | 0,0034 | 0,0011 | 0,0036 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 0,997 | 1,236 | 0,00039 | 0,00011 | 0,0035 | 0,00612 | 0,0048 | 0,0004 | 0,0048 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 1,042 | 1,249 | 0,00034 | 0,00071 | 0,0067 | 0,00001 | 0,0034 | 0,0008 | 0,0035 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 0,997 | 1,288 | 0,00028 | 0,00061 | 0,0048 | 0,00059 | 0,0021 | 0,0007 | 0,0022 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,170 | 1,166 | 0,00051 | 0,00033 | 0,0075 | 0,00187 | 0,0028 | 0,0006 | 0,0029 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,148 | 1,150 | 0,00030 | 0,00089 | 0,0043 | 0,00127 | 0,0028 | 0,0009 | 0,0030 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,111 | 1,117 | 0,00184 | 0,00006 | 0,0125 | 0,00507 | 0,0088 | 0,0018 | 0,0090 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,122 | 1,152 | 0,00046 | 0,00028 | 0,0019 | 0,00312 | 0,0006 | 0,0005 | 0,0008 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,168 | 1,114 | 0,00021 | 0,00066 | 0,0063 | 0,00272 | 0,0045 | 0,0007 | 0,0046 |
| Уровень 1 положение 9 с поправкой  | 1,286 | 1,047 | 0,00098 | 0,00088 | 0,0152 | 0,00050 | 0,0078 | 0,0013 | 0,0079 |
| Уровень 1 положение 9 с поправкой  | 1,263 | 1,032 | 0,00057 | 0,00005 | 0,0081 | 0,00251 | 0,0028 | 0,0006 | 0,0029 |
| Уровень 1 положение 9 с поправкой  | 1,217 | 1,004 | 0,00120 | 0,00111 | 0,0156 | 0,00009 | 0,0078 | 0,0016 | 0,0079 |
| Уровень 1 положение 9 с поправкой  | 1,257 | 0,999 | 0,00157 | 0,00013 | 0,0073 | 0,00063 | 0,0040 | 0,0016 | 0,0043 |
| Уровень 1 положение 9 с поправкой  | 1,233 | 1,026 | 0,00001 | 0,00088 | 0,0051 | 0,00176 | 0,0017 | 0,0009 | 0,0019 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,244 | 1,439 | 0,00078 | 0,00135 | 0,0050 | 0,00082 | 0,0021 | 0,0016 | 0,0026 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,223 | 1,422 | 0,00084 | 0,00059 | 0,0016 | 0,00071 | 0,0005 | 0,0010 | 0,0011 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,182 | 1,376 | 0,00107 | 0,00016 | 0,0058 | 0,00672 | 0,0062 | 0,0011 | 0,0063 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,228 | 1,439 | 0,00068 | 0,00075 | 0,0067 | 0,00255 | 0,0020 | 0,0010 | 0,0023 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,229 | 1,366 | 0,00035 | 0,00126 | 0,0009 | 0,00253 | 0,0008 | 0,0013 | 0,0016 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,325 | 1,318 | 0,00048 | 0,00025 | 0,0032 | 0,00237 | 0,0004 | 0,0005 | 0,0007 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,293 | 1,304 | 0,00035 | 0,00089 | 0,0019 | 0,00560 | 0,0019 | 0,0010 | 0,0021 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,268 | 1,257 | 0,00094 | 0,00019 | 0,0075 | 0,00796 | 0,0002 | 0,0010 | 0,0010 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,323 | 1,269 | 0,00002 | 0,00034 | 0,0051 | 0,00127 | 0,0032 | 0,0003 | 0,0032 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,259 | 1,316 | 0,00019 | 0,00040 | 0,0022 | 0,00691 | 0,0046 | 0,0004 | 0,0046 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,430 | 1,219 | 0,00047 | 0,00016 | 0,0103 | 0,00538 | 0,0024 | 0,0005 | 0,0025 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,413 | 1,204 | 0,00114 | 0,00079 | 0,0135 | 0,00211 | 0,0057 | 0,0014 | 0,0059 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,371 | 1,158 | 0,00025 | 0,00024 | 0,0009 | 0,00637 | 0,0027 | 0,0003 | 0,0028 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,432 | 1,171 | 0,00075 | 0,00088 | 0,0066 | 0,00662 | 0,0000 | 0,0012 | 0,0012 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,385 | 1,220 | 0,00015 | 0,00019 | 0,0144 | 0,00262 | 0,0059 | 0,0002 | 0,0059 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,398 | 1,576 | 0,00159 | 0,00081 | 0,0016 | 0,00689 | 0,0026 | 0,0018 | 0,0032 |
| Уровень 1 положение 13 с поправкой | 1,383 | 1,565 | 0,00032 | 0,00128 | 0,0046 | 0,00407 | 0,0003 | 0,0013 | 0,0014 |
| Уровень 1 положение 13 с поправкой | 1,335 | 1,507 | 0,00177 | 0,00080 | 0,0088 | 0,01005 | 0,0094 | 0,0019 | 0,0096 |
| Уровень 1 положение 13 с поправкой | 1,397 | 1,518 | 0,00072 | 0,00091 | 0,0017 | 0,00381 | 0,0028 | 0,0012 | 0,0030 |
| Уровень 1 положение 13 с поправкой | 1,344 | 1,559 | 0,00113 | 0,00022 | 0,0048 | 0,00737 | 0,0013 | 0,0011 | 0,0017 |
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,495 | 1,488 | 0,00143 | 0,00064 | 0,0046 | 0,00194 | 0,0013 | 0,0016 | 0,0021 |
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,456 | 1,463 | 0,00086 | 0,00026 | 0,0024 | 0,00839 | 0,0054 | 0,0009 | 0,0055 |
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,434 | 1,418 | 0,00070 | 0,00038 | 0,0083 | 0,01074 | 0,0012 | 0,0008 | 0,0015 |
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,428 | 1,462 | 0,00062 | 0,00067 | 0,0003 | 0,01007 | 0,0049 | 0,0009 | 0,0050 |
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,493 | 1,463 | 0,00130 | 0,00105 | 0,0030 | 0,01015 | 0,0036 | 0,0017 | 0,0039 |
| Уровень 1 положение 15 с поправкой | 1,597 | 1,408 | 0,00030 | 0,00017 | 0,0054 | 0,00203 | 0,0017 | 0,0003 | 0,0017 |

продолжение приложения Д

|                                    |       |       |         |         |        |         |        |        |        |
|------------------------------------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Уровень 1 положение 15 с поправкой | 1,573 | 1,386 | 0,00071 | 0,00027 | 0,0094 | 0,00200 | 0,0057 | 0,0008 | 0,0057 |
| Уровень 1 положение 15 с поправкой | 1,541 | 1,350 | 0,00004 | 0,00096 | 0,0028 | 0,00739 | 0,0051 | 0,0010 | 0,0052 |
| Уровень 1 положение 15 с поправкой | 1,520 | 1,404 | 0,00029 | 0,00116 | 0,0026 | 0,00162 | 0,0021 | 0,0012 | 0,0024 |
| Уровень 1 положение 15 с поправкой | 1,569 | 1,353 | 0,00122 | 0,00010 | 0,0003 | 0,00276 | 0,0012 | 0,0012 | 0,0017 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,597 | 1,760 | 0,00090 | 0,00062 | 0,0010 | 0,00812 | 0,0035 | 0,0011 | 0,0037 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,576 | 1,736 | 0,00025 | 0,00016 | 0,0048 | 0,01246 | 0,0086 | 0,0003 | 0,0086 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,547 | 1,683 | 0,00122 | 0,00067 | 0,0033 | 0,00394 | 0,0003 | 0,0014 | 0,0014 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,526 | 1,764 | 0,00096 | 0,00074 | 0,0116 | 0,00838 | 0,0100 | 0,0012 | 0,0100 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,583 | 1,697 | 0,00017 | 0,00136 | 0,0022 | 0,00101 | 0,0006 | 0,0014 | 0,0015 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,673 | 1,668 | 0,00007 | 0,00005 | 0,0008 | 0,00880 | 0,0040 | 0,0001 | 0,0040 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,643 | 1,644 | 0,00096 | 0,00154 | 0,0073 | 0,00272 | 0,0023 | 0,0018 | 0,0029 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,591 | 1,588 | 0,00043 | 0,00045 | 0,0078 | 0,00741 | 0,0076 | 0,0006 | 0,0076 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,654 | 1,602 | 0,00127 | 0,00120 | 0,0016 | 0,01064 | 0,0061 | 0,0017 | 0,0064 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,587 | 1,662 | 0,00137 | 0,00136 | 0,0054 | 0,00428 | 0,0048 | 0,0019 | 0,0052 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,756 | 1,593 | 0,00008 | 0,00047 | 0,0063 | 0,00579 | 0,0003 | 0,0005 | 0,0005 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,726 | 1,570 | 0,00061 | 0,00066 | 0,0004 | 0,00745 | 0,0036 | 0,0009 | 0,0037 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,719 | 1,560 | 0,00163 | 0,00002 | 0,0093 | 0,00276 | 0,0032 | 0,0016 | 0,0036 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,686 | 1,584 | 0,00008 | 0,00009 | 0,0099 | 0,01072 | 0,0004 | 0,0001 | 0,0004 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,749 | 1,538 | 0,00037 | 0,00097 | 0,0005 | 0,00249 | 0,0010 | 0,0010 | 0,0014 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой  | 0,737 | 1,046 | 0,00034 | 0,00001 | 0,0037 | 0,00559 | 0,0009 | 0,0003 | 0,0010 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой  | 0,731 | 1,031 | 0,00016 | 0,00045 | 0,0007 | 0,00332 | 0,0013 | 0,0005 | 0,0014 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой  | 0,711 | 1,000 | 0,00119 | 0,00000 | 0,0042 | 0,00129 | 0,0014 | 0,0012 | 0,0019 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой  | 0,709 | 1,029 | 0,00044 | 0,00064 | 0,0016 | 0,00568 | 0,0037 | 0,0008 | 0,0037 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой  | 0,741 | 1,010 | 0,00107 | 0,00015 | 0,0034 | 0,00437 | 0,0005 | 0,0011 | 0,0012 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой  | 0,890 | 0,886 | 0,00024 | 0,00048 | 0,0095 | 0,00014 | 0,0048 | 0,0005 | 0,0049 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой  | 0,879 | 0,877 | 0,00106 | 0,00020 | 0,0112 | 0,00557 | 0,0028 | 0,0011 | 0,0030 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой  | 0,851 | 0,855 | 0,00046 | 0,00047 | 0,0107 | 0,00184 | 0,0044 | 0,0007 | 0,0045 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой  | 0,849 | 0,888 | 0,00009 | 0,00028 | 0,0068 | 0,00531 | 0,0007 | 0,0003 | 0,0008 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой  | 0,877 | 0,855 | 0,00070 | 0,00040 | 0,0092 | 0,00184 | 0,0037 | 0,0008 | 0,0038 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой  | 1,047 | 0,734 | 0,00001 | 0,00003 | 0,0141 | 0,00133 | 0,0064 | 0,0000 | 0,0064 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой  | 1,024 | 0,723 | 0,00016 | 0,00013 | 0,0175 | 0,00135 | 0,0081 | 0,0002 | 0,0081 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой  | 1,007 | 0,700 | 0,00073 | 0,00031 | 0,0084 | 0,00372 | 0,0024 | 0,0008 | 0,0025 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой  | 1,010 | 0,727 | 0,00033 | 0,00030 | 0,0095 | 0,00076 | 0,0044 | 0,0004 | 0,0044 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой  | 1,033 | 0,702 | 0,00004 | 0,00032 | 0,0147 | 0,00561 | 0,0045 | 0,0003 | 0,0045 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой  | 0,886 | 1,155 | 0,00010 | 0,00105 | 0,0036 | 0,00464 | 0,0005 | 0,0011 | 0,0012 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой  | 0,858 | 1,133 | 0,00022 | 0,00011 | 0,0030 | 0,00618 | 0,0046 | 0,0002 | 0,0046 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой  | 0,849 | 1,120 | 0,00032 | 0,00073 | 0,0038 | 0,00409 | 0,0002 | 0,0008 | 0,0008 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой  | 0,849 | 1,155 | 0,00053 | 0,00067 | 0,0038 | 0,00746 | 0,0018 | 0,0009 | 0,0020 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой  | 0,871 | 1,119 | 0,00038 | 0,00035 | 0,0003 | 0,00270 | 0,0012 | 0,0005 | 0,0013 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой  | 0,999 | 1,011 | 0,00010 | 0,00058 | 0,0034 | 0,00083 | 0,0013 | 0,0006 | 0,0014 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой  | 0,992 | 1,005 | 0,00058 | 0,00033 | 0,0062 | 0,00070 | 0,0034 | 0,0007 | 0,0035 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой  | 0,966 | 0,969 | 0,00235 | 0,00110 | 0,0039 | 0,00436 | 0,0002 | 0,0026 | 0,0026 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой  | 0,985 | 0,979 | 0,00447 | 0,00229 | 0,0029 | 0,00142 | 0,0008 | 0,0050 | 0,0051 |

продолжение приложения Д

|                                    |       |       |         |         |        |         |        |        |        |
|------------------------------------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Уровень 1 положение 5 с поправкой  | 0,960 | 1,024 | 0,00727 | 0,00715 | 0,0077 | 0,00402 | 0,0019 | 0,0102 | 0,0104 |
| Уровень 1 положение 6 с поправкой  | 1,153 | 0,873 | 0,00085 | 0,00023 | 0,0123 | 0,00493 | 0,0037 | 0,0009 | 0,0038 |
| Уровень 1 положение 6 с поправкой  | 1,132 | 0,859 | 0,00025 | 0,00057 | 0,0090 | 0,00083 | 0,0041 | 0,0006 | 0,0041 |
| Уровень 1 положение 6 с поправкой  | 1,092 | 0,832 | 0,00048 | 0,00086 | 0,0132 | 0,00014 | 0,0065 | 0,0010 | 0,0066 |
| Уровень 1 положение 6 с поправкой  | 1,139 | 0,838 | 0,00004 | 0,00082 | 0,0128 | 0,00659 | 0,0031 | 0,0008 | 0,0032 |
| Уровень 1 положение 6 с поправкой  | 1,108 | 0,873 | 0,00017 | 0,00061 | 0,0059 | 0,00388 | 0,0010 | 0,0006 | 0,0012 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 1,054 | 1,276 | 0,00060 | 0,00116 | 0,0017 | 0,00229 | 0,0003 | 0,0013 | 0,0013 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 1,033 | 1,254 | 0,00132 | 0,00016 | 0,0010 | 0,00138 | 0,0012 | 0,0013 | 0,0018 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 1,015 | 1,237 | 0,00025 | 0,00002 | 0,0035 | 0,00079 | 0,0021 | 0,0002 | 0,0022 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 1,050 | 1,222 | 0,00018 | 0,00075 | 0,0006 | 0,00006 | 0,0003 | 0,0008 | 0,0008 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 1,018 | 1,259 | 0,00119 | 0,00028 | 0,0034 | 0,00312 | 0,0001 | 0,0012 | 0,0012 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,168 | 1,167 | 0,00034 | 0,00118 | 0,0021 | 0,00484 | 0,0014 | 0,0012 | 0,0018 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,162 | 1,159 | 0,00032 | 0,00094 | 0,0066 | 0,00307 | 0,0017 | 0,0010 | 0,0020 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,122 | 1,109 | 0,00008 | 0,00054 | 0,0014 | 0,00482 | 0,0031 | 0,0005 | 0,0032 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,109 | 1,154 | 0,00019 | 0,00100 | 0,0008 | 0,00425 | 0,0025 | 0,0010 | 0,0027 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,173 | 1,120 | 0,00095 | 0,00045 | 0,0062 | 0,00264 | 0,0018 | 0,0011 | 0,0021 |
| Уровень 1 положение 9 с поправкой  | 1,298 | 1,048 | 0,00084 | 0,00057 | 0,0068 | 0,00277 | 0,0020 | 0,0010 | 0,0022 |
| Уровень 1 положение 9 с поправкой  | 1,289 | 1,036 | 0,00022 | 0,00014 | 0,0086 | 0,00344 | 0,0026 | 0,0003 | 0,0026 |
| Уровень 1 положение 9 с поправкой  | 1,229 | 1,017 | 0,00021 | 0,00114 | 0,0120 | 0,00000 | 0,0060 | 0,0012 | 0,0061 |
| Уровень 1 положение 9 с поправкой  | 1,298 | 0,996 | 0,00018 | 0,00030 | 0,0099 | 0,00381 | 0,0030 | 0,0003 | 0,0031 |
| Уровень 1 положение 9 с поправкой  | 1,255 | 1,036 | 0,00034 | 0,00074 | 0,0097 | 0,00220 | 0,0037 | 0,0008 | 0,0038 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,247 | 1,445 | 0,00068 | 0,00036 | 0,0006 | 0,00327 | 0,0019 | 0,0008 | 0,0021 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,236 | 1,432 | 0,00043 | 0,00044 | 0,0043 | 0,00453 | 0,0001 | 0,0006 | 0,0006 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,207 | 1,387 | 0,00056 | 0,00017 | 0,0019 | 0,00616 | 0,0040 | 0,0006 | 0,0041 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,249 | 1,407 | 0,00017 | 0,00045 | 0,0023 | 0,00190 | 0,0002 | 0,0005 | 0,0005 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,196 | 1,438 | 0,00104 | 0,00036 | 0,0029 | 0,00303 | 0,0030 | 0,0011 | 0,0032 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,318 | 1,314 | 0,00051 | 0,00017 | 0,0033 | 0,00127 | 0,0010 | 0,0005 | 0,0012 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,298 | 1,294 | 0,00057 | 0,00032 | 0,0056 | 0,00203 | 0,0018 | 0,0007 | 0,0019 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,272 | 1,265 | 0,00083 | 0,00042 | 0,0081 | 0,00220 | 0,0051 | 0,0009 | 0,0052 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,318 | 1,276 | 0,00067 | 0,00008 | 0,0018 | 0,00132 | 0,0002 | 0,0007 | 0,0007 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,262 | 1,305 | 0,00003 | 0,00096 | 0,0084 | 0,00090 | 0,0037 | 0,0010 | 0,0039 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,426 | 1,215 | 0,00076 | 0,00024 | 0,0067 | 0,00003 | 0,0033 | 0,0008 | 0,0034 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,403 | 1,192 | 0,00016 | 0,00113 | 0,0093 | 0,00607 | 0,0016 | 0,0011 | 0,0020 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,365 | 1,163 | 0,00107 | 0,00017 | 0,0007 | 0,00588 | 0,0026 | 0,0011 | 0,0028 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,426 | 1,175 | 0,00060 | 0,00021 | 0,0067 | 0,00656 | 0,0001 | 0,0006 | 0,0006 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,364 | 1,191 | 0,00081 | 0,00053 | 0,0107 | 0,00174 | 0,0045 | 0,0010 | 0,0046 |
| Уровень 1 положение 13 с поправкой | 1,415 | 1,602 | 0,00144 | 0,00106 | 0,0026 | 0,00323 | 0,0003 | 0,0018 | 0,0018 |
| Уровень 1 положение 13 с поправкой | 1,396 | 1,591 | 0,00126 | 0,00100 | 0,0018 | 0,00480 | 0,0033 | 0,0016 | 0,0037 |
| Уровень 1 положение 13 с поправкой | 1,365 | 1,549 | 0,00103 | 0,00056 | 0,0042 | 0,00155 | 0,0013 | 0,0012 | 0,0018 |
| Уровень 1 положение 13 с поправкой | 1,367 | 1,589 | 0,00084 | 0,00115 | 0,0041 | 0,00473 | 0,0003 | 0,0014 | 0,0015 |
| Уровень 1 положение 13 с поправкой | 1,365 | 1,607 | 0,00144 | 0,00034 | 0,0057 | 0,00726 | 0,0065 | 0,0015 | 0,0066 |
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,480 | 1,478 | 0,00016 | 0,00074 | 0,0025 | 0,00637 | 0,0020 | 0,0008 | 0,0021 |
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,452 | 1,459 | 0,00086 | 0,00134 | 0,0035 | 0,00206 | 0,0028 | 0,0016 | 0,0032 |

продолжение приложения Д

|                                    |       |       |         |         |        |         |        |        |        |
|------------------------------------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,402 | 1,425 | 0,00006 | 0,00109 | 0,0065 | 0,00415 | 0,0053 | 0,0011 | 0,0054 |
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,460 | 1,428 | 0,00098 | 0,00100 | 0,0032 | 0,00080 | 0,0012 | 0,0014 | 0,0018 |
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,414 | 1,481 | 0,00044 | 0,00127 | 0,0071 | 0,00650 | 0,0068 | 0,0013 | 0,0069 |
| Уровень 1 положение 15 с поправкой | 1,585 | 1,403 | 0,00015 | 0,00017 | 0,0029 | 0,00170 | 0,0023 | 0,0002 | 0,0023 |
| Уровень 1 положение 15 с поправкой | 1,568 | 1,389 | 0,00112 | 0,00075 | 0,0074 | 0,00266 | 0,0024 | 0,0013 | 0,0027 |
| Уровень 1 положение 15 с поправкой | 1,533 | 1,389 | 0,00077 | 0,00128 | 0,0050 | 0,00265 | 0,0012 | 0,0015 | 0,0019 |
| Уровень 1 положение 15 с поправкой | 1,531 | 1,337 | 0,00053 | 0,00018 | 0,0023 | 0,00330 | 0,0028 | 0,0006 | 0,0029 |
| Уровень 1 положение 15 с поправкой | 1,508 | 1,395 | 0,00133 | 0,00001 | 0,0031 | 0,00293 | 0,0030 | 0,0013 | 0,0033 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,592 | 1,756 | 0,00072 | 0,00023 | 0,0007 | 0,00205 | 0,0014 | 0,0008 | 0,0016 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,585 | 1,732 | 0,00138 | 0,00104 | 0,0033 | 0,00548 | 0,0011 | 0,0017 | 0,0020 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,562 | 1,720 | 0,00016 | 0,00152 | 0,0003 | 0,00301 | 0,0014 | 0,0015 | 0,0021 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,551 | 1,760 | 0,00009 | 0,00141 | 0,0025 | 0,00432 | 0,0009 | 0,0014 | 0,0017 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,573 | 1,677 | 0,00030 | 0,00114 | 0,0037 | 0,00564 | 0,0010 | 0,0012 | 0,0015 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,671 | 1,671 | 0,00013 | 0,00090 | 0,0036 | 0,00650 | 0,0015 | 0,0009 | 0,0017 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,640 | 1,642 | 0,00099 | 0,00145 | 0,0033 | 0,00139 | 0,0023 | 0,0018 | 0,0029 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,602 | 1,590 | 0,00003 | 0,00060 | 0,0057 | 0,00328 | 0,0045 | 0,0006 | 0,0045 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,670 | 1,622 | 0,00080 | 0,00006 | 0,0004 | 0,00453 | 0,0025 | 0,0008 | 0,0026 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,602 | 1,644 | 0,00079 | 0,00067 | 0,0018 | 0,00541 | 0,0036 | 0,0010 | 0,0038 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,749 | 1,573 | 0,00101 | 0,00123 | 0,0059 | 0,00329 | 0,0013 | 0,0016 | 0,0021 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,739 | 1,557 | 0,00168 | 0,00078 | 0,0105 | 0,00259 | 0,0039 | 0,0019 | 0,0044 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,678 | 1,546 | 0,00397 | 0,00947 | 0,0083 | 0,00582 | 0,0013 | 0,0103 | 0,0103 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,669 | 1,558 | 0,00094 | 0,00125 | 0,0014 | 0,00638 | 0,0039 | 0,0016 | 0,0042 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,730 | 1,535 | 0,00045 | 0,00109 | 0,0107 | 0,00163 | 0,0046 | 0,0012 | 0,0047 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой  | 0,734 | 1,060 | 0,00038 | 0,00077 | 0,0045 | 0,00445 | 0,0000 | 0,0009 | 0,0009 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой  | 0,725 | 1,053 | 0,00013 | 0,00001 | 0,0044 | 0,00066 | 0,0018 | 0,0001 | 0,0019 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой  | 0,706 | 1,038 | 0,00057 | 0,00039 | 0,0015 | 0,00325 | 0,0009 | 0,0007 | 0,0011 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой  | 0,729 | 1,013 | 0,00065 | 0,00096 | 0,0035 | 0,00700 | 0,0017 | 0,0012 | 0,0021 |
| Уровень 1 положение 1 с поправкой  | 0,705 | 1,061 | 0,00016 | 0,00055 | 0,0015 | 0,00061 | 0,0004 | 0,0006 | 0,0007 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой  | 0,870 | 0,872 | 0,00037 | 0,00040 | 0,0078 | 0,00265 | 0,0026 | 0,0005 | 0,0026 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой  | 0,851 | 0,866 | 0,00010 | 0,00022 | 0,0074 | 0,00061 | 0,0034 | 0,0002 | 0,0034 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой  | 0,841 | 0,839 | 0,00032 | 0,00001 | 0,0093 | 0,00011 | 0,0047 | 0,0003 | 0,0047 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой  | 0,836 | 0,867 | 0,00018 | 0,00052 | 0,0081 | 0,00149 | 0,0048 | 0,0005 | 0,0048 |
| Уровень 1 положение 2 с поправкой  | 0,860 | 0,832 | 0,00061 | 0,00022 | 0,0055 | 0,00098 | 0,0023 | 0,0006 | 0,0024 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой  | 1,040 | 0,722 | 0,00020 | 0,00045 | 0,0118 | 0,00091 | 0,0054 | 0,0005 | 0,0055 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой  | 1,025 | 0,715 | 0,00034 | 0,00050 | 0,0103 | 0,00097 | 0,0047 | 0,0006 | 0,0047 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой  | 0,991 | 0,688 | 0,00036 | 0,00030 | 0,0145 | 0,00046 | 0,0075 | 0,0005 | 0,0075 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой  | 1,041 | 0,696 | 0,00054 | 0,00005 | 0,0143 | 0,00030 | 0,0070 | 0,0005 | 0,0070 |
| Уровень 1 положение 3 с поправкой  | 1,000 | 0,710 | 0,00037 | 0,00042 | 0,0123 | 0,00101 | 0,0056 | 0,0006 | 0,0057 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой  | 0,877 | 1,139 | 0,00035 | 0,00063 | 0,0039 | 0,00239 | 0,0007 | 0,0007 | 0,0010 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой  | 0,872 | 1,126 | 0,00019 | 0,00109 | 0,0048 | 0,00114 | 0,0018 | 0,0011 | 0,0021 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой  | 0,846 | 1,093 | 0,00093 | 0,00003 | 0,0012 | 0,00146 | 0,0001 | 0,0009 | 0,0009 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой  | 0,882 | 1,103 | 0,00011 | 0,00105 | 0,0029 | 0,00136 | 0,0008 | 0,0011 | 0,0013 |
| Уровень 1 положение 4 с поправкой  | 0,838 | 1,132 | 0,00021 | 0,00091 | 0,0009 | 0,00109 | 0,0010 | 0,0009 | 0,0014 |

продолжение приложения Д

|                                    |       |       |         |         |        |         |        |        |        |
|------------------------------------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Уровень 1 положение 5 с поправкой  | 1,003 | 1,003 | 0,00018 | 0,00068 | 0,0057 | 0,00154 | 0,0021 | 0,0007 | 0,0022 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой  | 0,995 | 0,987 | 0,00079 | 0,00000 | 0,0104 | 0,00286 | 0,0038 | 0,0008 | 0,0038 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой  | 0,966 | 0,962 | 0,00040 | 0,00060 | 0,0051 | 0,00420 | 0,0005 | 0,0007 | 0,0009 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой  | 0,996 | 0,957 | 0,00036 | 0,00005 | 0,0080 | 0,00269 | 0,0053 | 0,0004 | 0,0054 |
| Уровень 1 положение 5 с поправкой  | 0,973 | 0,998 | 0,00039 | 0,00079 | 0,0029 | 0,00082 | 0,0019 | 0,0009 | 0,0021 |
| Уровень 1 положение 6 с поправкой  | 1,144 | 0,877 | 0,00021 | 0,00035 | 0,0117 | 0,00051 | 0,0061 | 0,0004 | 0,0061 |
| Уровень 1 положение 6 с поправкой  | 1,125 | 0,870 | 0,00026 | 0,00010 | 0,0127 | 0,00148 | 0,0071 | 0,0003 | 0,0071 |
| Уровень 1 положение 6 с поправкой  | 1,104 | 0,844 | 0,00044 | 0,00007 | 0,0070 | 0,00015 | 0,0036 | 0,0004 | 0,0036 |
| Уровень 1 положение 6 с поправкой  | 1,093 | 0,880 | 0,00051 | 0,00008 | 0,0108 | 0,00054 | 0,0056 | 0,0005 | 0,0057 |
| Уровень 1 положение 6 с поправкой  | 1,093 | 0,869 | 0,00011 | 0,00052 | 0,0094 | 0,00043 | 0,0049 | 0,0005 | 0,0050 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 1,045 | 1,284 | 0,00064 | 0,00082 | 0,0015 | 0,00055 | 0,0010 | 0,0010 | 0,0015 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 1,029 | 1,262 | 0,00011 | 0,00075 | 0,0002 | 0,00204 | 0,0011 | 0,0008 | 0,0014 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 0,998 | 1,226 | 0,00058 | 0,00087 | 0,0038 | 0,00196 | 0,0029 | 0,0010 | 0,0031 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 1,020 | 1,236 | 0,00059 | 0,00089 | 0,0015 | 0,00249 | 0,0005 | 0,0011 | 0,0012 |
| Уровень 1 положение 7 с поправкой  | 1,009 | 1,285 | 0,00034 | 0,00065 | 0,0039 | 0,00100 | 0,0014 | 0,0007 | 0,0016 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,152 | 1,152 | 0,00014 | 0,00067 | 0,0091 | 0,00078 | 0,0049 | 0,0007 | 0,0050 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,132 | 1,134 | 0,00052 | 0,00092 | 0,0035 | 0,00073 | 0,0021 | 0,0011 | 0,0023 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,092 | 1,097 | 0,00010 | 0,00101 | 0,0059 | 0,00329 | 0,0046 | 0,0010 | 0,0047 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,108 | 1,149 | 0,00072 | 0,00012 | 0,0007 | 0,00215 | 0,0014 | 0,0007 | 0,0016 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,153 | 1,099 | 0,00050 | 0,00068 | 0,0049 | 0,00465 | 0,0001 | 0,0008 | 0,0009 |
| Уровень 1 положение 8 с поправкой  | 1,280 | 1,043 | 0,00012 | 0,00023 | 0,0089 | 0,00123 | 0,0038 | 0,0003 | 0,0038 |
| Уровень 1 положение 9 с поправкой  | 1,256 | 1,030 | 0,00014 | 0,00088 | 0,0101 | 0,00003 | 0,0051 | 0,0009 | 0,0051 |
| Уровень 1 положение 9 с поправкой  | 1,213 | 0,997 | 0,00018 | 0,00005 | 0,0038 | 0,00140 | 0,0012 | 0,0002 | 0,0012 |
| Уровень 1 положение 9 с поправкой  | 1,226 | 1,041 | 0,00054 | 0,00058 | 0,0053 | 0,00249 | 0,0014 | 0,0008 | 0,0016 |
| Уровень 1 положение 9 с поправкой  | 1,253 | 0,987 | 0,00025 | 0,00084 | 0,0041 | 0,00024 | 0,0019 | 0,0009 | 0,0021 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,215 | 1,425 | 0,00014 | 0,00004 | 0,0001 | 0,00398 | 0,0019 | 0,0001 | 0,0019 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,202 | 1,407 | 0,00034 | 0,00019 | 0,0014 | 0,00073 | 0,0003 | 0,0004 | 0,0005 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,166 | 1,371 | 0,00045 | 0,00032 | 0,0048 | 0,00443 | 0,0046 | 0,0006 | 0,0046 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,177 | 1,414 | 0,00151 | 0,00001 | 0,0018 | 0,00236 | 0,0021 | 0,0015 | 0,0026 |
| Уровень 1 положение 10 с поправкой | 1,163 | 1,431 | 0,00115 | 0,00031 | 0,0050 | 0,00219 | 0,0014 | 0,0012 | 0,0019 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,317 | 1,309 | 0,00061 | 0,00012 | 0,0051 | 0,00020 | 0,0026 | 0,0006 | 0,0027 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,297 | 1,291 | 0,00045 | 0,00095 | 0,0032 | 0,00155 | 0,0008 | 0,0011 | 0,0013 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,260 | 1,274 | 0,00074 | 0,00092 | 0,0057 | 0,00018 | 0,0028 | 0,0012 | 0,0030 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,279 | 1,298 | 0,00046 | 0,00076 | 0,0060 | 0,00148 | 0,0023 | 0,0009 | 0,0024 |
| Уровень 1 положение 11 с поправкой | 1,314 | 1,250 | 0,00037 | 0,00019 | 0,0018 | 0,00258 | 0,0022 | 0,0004 | 0,0022 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,430 | 1,211 | 0,00085 | 0,00077 | 0,0039 | 0,00154 | 0,0012 | 0,0011 | 0,0016 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,408 | 1,193 | 0,00064 | 0,00007 | 0,0123 | 0,00012 | 0,0061 | 0,0006 | 0,0061 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,366 | 1,148 | 0,00084 | 0,00061 | 0,0036 | 0,00300 | 0,0003 | 0,0010 | 0,0011 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,371 | 1,215 | 0,00106 | 0,00022 | 0,0086 | 0,00007 | 0,0043 | 0,0011 | 0,0044 |
| Уровень 1 положение 12 с поправкой | 1,398 | 1,164 | 0,00028 | 0,00051 | 0,0054 | 0,00121 | 0,0033 | 0,0006 | 0,0034 |
| Уровень 1 положение 13 с поправкой | 1,399 | 1,573 | 0,00115 | 0,00041 | 0,0014 | 0,00483 | 0,0031 | 0,0012 | 0,0034 |
| Уровень 1 положение 13 с поправкой | 1,392 | 1,555 | 0,00075 | 0,00122 | 0,0035 | 0,00126 | 0,0011 | 0,0014 | 0,0018 |
| Уровень 1 положение 13 с поправкой | 1,337 | 1,519 | 0,00029 | 0,00048 | 0,0055 | 0,00718 | 0,0063 | 0,0006 | 0,0064 |

продолжение приложения Д

|                                    |       |       |         |         |        |         |        |        |        |
|------------------------------------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Уровень 1 положение 13 с поправкой | 1,346 | 1,574 | 0,00136 | 0,00012 | 0,0054 | 0,00292 | 0,0042 | 0,0014 | 0,0044 |
| Уровень 1 положение 13 с поправкой | 1,387 | 1,522 | 0,00034 | 0,00004 | 0,0017 | 0,00532 | 0,0018 | 0,0003 | 0,0018 |
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,487 | 1,487 | 0,00100 | 0,00078 | 0,0002 | 0,00383 | 0,0020 | 0,0013 | 0,0024 |
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,469 | 1,468 | 0,00098 | 0,00004 | 0,0049 | 0,00215 | 0,0014 | 0,0010 | 0,0017 |
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,425 | 1,431 | 0,00123 | 0,00091 | 0,0007 | 0,00755 | 0,0041 | 0,0015 | 0,0044 |
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,492 | 1,419 | 0,00124 | 0,00075 | 0,0034 | 0,00929 | 0,0029 | 0,0014 | 0,0033 |
| Уровень 1 положение 14 с поправкой | 1,420 | 1,465 | 0,00023 | 0,00108 | 0,0007 | 0,00217 | 0,0014 | 0,0011 | 0,0018 |
| Уровень 1 положение 15 с поправкой | 1,583 | 1,402 | 0,00036 | 0,00017 | 0,0084 | 0,00162 | 0,0034 | 0,0004 | 0,0034 |
| Уровень 1 положение 15 с поправкой | 1,570 | 1,377 | 0,00058 | 0,00140 | 0,0007 | 0,00500 | 0,0022 | 0,0015 | 0,0026 |
| Уровень 1 положение 15 с поправкой | 1,523 | 1,396 | 0,00007 | 0,00146 | 0,0079 | 0,00668 | 0,0006 | 0,0015 | 0,0016 |
| Уровень 1 положение 15 с поправкой | 1,579 | 1,342 | 0,00036 | 0,00114 | 0,0026 | 0,00015 | 0,0012 | 0,0012 | 0,0017 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,589 | 1,758 | 0,00026 | 0,00002 | 0,0035 | 0,00652 | 0,0050 | 0,0003 | 0,0050 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,580 | 1,745 | 0,00130 | 0,00122 | 0,0022 | 0,00027 | 0,0009 | 0,0018 | 0,0020 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,518 | 1,683 | 0,00017 | 0,00039 | 0,0040 | 0,00688 | 0,0054 | 0,0004 | 0,0055 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,528 | 1,738 | 0,00144 | 0,00085 | 0,0076 | 0,00243 | 0,0050 | 0,0017 | 0,0053 |
| Уровень 1 положение 16 с поправкой | 1,573 | 1,688 | 0,00062 | 0,00058 | 0,0040 | 0,00686 | 0,0014 | 0,0008 | 0,0017 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,667 | 1,671 | 0,00003 | 0,00047 | 0,0020 | 0,00198 | 0,0020 | 0,0005 | 0,0020 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,638 | 1,646 | 0,00132 | 0,00081 | 0,0039 | 0,00003 | 0,0019 | 0,0016 | 0,0025 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,596 | 1,594 | 0,00121 | 0,00148 | 0,0021 | 0,00784 | 0,0050 | 0,0019 | 0,0053 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,667 | 1,597 | 0,00147 | 0,00100 | 0,0000 | 0,00400 | 0,0020 | 0,0018 | 0,0027 |
| Уровень 1 положение 17 с поправкой | 1,610 | 1,644 | 0,00054 | 0,00152 | 0,0040 | 0,00202 | 0,0030 | 0,0016 | 0,0034 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,749 | 1,580 | 0,00003 | 0,00126 | 0,0029 | 0,00119 | 0,0020 | 0,0013 | 0,0024 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,722 | 1,557 | 0,00030 | 0,00111 | 0,0071 | 0,00251 | 0,0023 | 0,0011 | 0,0026 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,665 | 1,498 | 0,00079 | 0,00107 | 0,0010 | 0,00764 | 0,0033 | 0,0013 | 0,0036 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,692 | 1,554 | 0,00104 | 0,00105 | 0,0030 | 0,00812 | 0,0026 | 0,0015 | 0,0030 |
| Уровень 1 положение 18 с поправкой | 1,749 | 1,524 | 0,00044 | 0,00153 | 0,0050 | 0,00133 | 0,0032 | 0,0016 | 0,0035 |

# ПРИЛОЖЕНИЕ Е

## Результаты экспериментальных исследований.

| № ПП                                    | $\alpha$ , (град) | $\beta$ , (град) | $\Delta\alpha$ , (град) | $\Delta\beta$ , (град) |
|-----------------------------------------|-------------------|------------------|-------------------------|------------------------|
| Точка плана эксперимента 1 с поправкой  | 63                | 75,6             | -1,01                   | -0,01                  |
| Точка плана эксперимента 1 с поправкой  | 48,6              | 63               | -0,73                   | 0,24                   |
| Точка плана эксперимента 1 с поправкой  | 41,4              | 54               | -0,88                   | 0,12                   |
| Точка плана эксперимента 1 с поправкой  | 43,2              | 61,2             | -0,67                   | 0,09                   |
| Точка плана эксперимента 1 с поправкой  | 64,8              | 54               | -0,63                   | 0,18                   |
| Точка плана эксперимента 2 с поправкой  | 41,4              | 36               | 0,31                    | -0,27                  |
| Точка плана эксперимента 2 с поправкой  | 55,8              | 19,8             | -0,02                   | -0,03                  |
| Точка плана эксперимента 2 с поправкой  | 28,8              | 14,4             | 0,29                    | -0,33                  |
| Точка плана эксперимента 2 с поправкой  | 30,6              | 36               | 0,14                    | -0,22                  |
| Точка плана эксперимента 2 с поправкой  | 54                | 46,8             | 0,12                    | -0,36                  |
| Точка плана эксперимента 3 с поправкой  | 75,6              | 54               | -0,4                    | 0,13                   |
| Точка плана эксперимента 3 с поправкой  | 61,2              | 68,4             | -0,29                   | -0,03                  |
| Точка плана эксперимента 3 с поправкой  | 55,8              | 41,4             | -0,65                   | 0,36                   |
| Точка плана эксперимента 3 с поправкой  | 54                | 54               | -0,4                    | 0,09                   |
| Точка плана эксперимента 3 с поправкой  | 82,8              | 72               | -0,58                   | 0,17                   |
| Точка плана эксперимента 4 с поправкой  | 25,2              | 41,4             | -0,17                   | -0,24                  |
| Точка плана эксперимента 4 с поправкой  | 39,6              | 55,8             | -0,73                   | -0,37                  |
| Точка плана эксперимента 4 с поправкой  | 12,6              | 30,6             | -0,94                   | -0,78                  |
| Точка плана эксперимента 4 с поправкой  | 14,4              | 50,4             | -0,81                   | -0,79                  |
| Точка плана эксперимента 4 с поправкой  | 39,6              | 30,6             | -0,61                   | -0,35                  |
| Точка плана эксперимента 5 с поправкой  | 61,2              | 70,2             | -0,41                   | 0                      |
| Точка плана эксперимента 5 с поправкой  | 75,6              | 55,8             | -0,61                   | 0,25                   |
| Точка плана эксперимента 5 с поправкой  | 68,4              | 81               | -0,6                    | -0,16                  |
| Точка плана эксперимента 5 с поправкой  | 48,6              | 54               | -0,63                   | 0,11                   |
| Точка плана эксперимента 5 с поправкой  | 46,8              | 48,6             | -0,51                   | 0,24                   |
| Точка плана эксперимента 6 с поправкой  | 30,6              | 41,4             | -0,03                   | -0,12                  |
| Точка плана эксперимента 6 с поправкой  | 46,8              | 25,2             | -0,1                    | -0,16                  |
| Точка плана эксперимента 6 с поправкой  | 19,8              | 19,8             | -0,03                   | -0,12                  |
| Точка плана эксперимента 6 с поправкой  | 54                | 41,4             | -0,31                   | -0,06                  |
| Точка плана эксперимента 6 с поправкой  | 25,2              | 19,8             | 0,15                    | -0,13                  |
| Точка плана эксперимента 7 с поправкой  | 70,2              | 61,2             | -0,67                   | 0,14                   |
| Точка плана эксперимента 7 с поправкой  | 54                | 75,6             | -0,34                   | -0,13                  |
| Точка плана эксперимента 7 с поправкой  | 48,6              | 48,6             | -0,63                   | 0,22                   |
| Точка плана эксперимента 7 с поправкой  | 70,2              | 79,2             | -0,74                   | -0,04                  |
| Точка плана эксперимента 7 с поправкой  | 48,6              | 57,6             | -0,72                   | 0,13                   |
| Точка плана эксперимента 8 с поправкой  | 41,4              | 32,4             | -0,33                   | -0,11                  |
| Точка плана эксперимента 8 с поправкой  | 25,2              | 46,8             | -0,13                   | -0,26                  |
| Точка плана эксперимента 8 с поправкой  | 54                | 52,2             | -0,67                   | -0,23                  |
| Точка плана эксперимента 8 с поправкой  | 52,2              | 41,4             | -0,77                   | -0,03                  |
| Точка плана эксперимента 8 с поправкой  | 27                | 21,6             | -0,15                   | -0,17                  |
| Точка плана эксперимента 9 с поправкой  | 45                | 59,4             | -0,62                   | -0,19                  |
| Точка плана эксперимента 9 с поправкой  | 57,6              | 72               | -0,84                   | -0,26                  |
| Точка плана эксперимента 9 с поправкой  | 32,4              | 46,8             | -0,61                   | -0,21                  |
| Точка плана эксперимента 9 с поправкой  | 52,2              | 48,6             | -0,72                   | -0,05                  |
| Точка плана эксперимента 9 с поправкой  | 32,4              | 66,6             | -0,61                   | -0,4                   |
| Точка плана эксперимента 10 с поправкой | 57,6              | 45               | 0,01                    | 0                      |
| Точка плана эксперимента 10 с поправкой | 72                | 59,4             | -0,14                   | -0,12                  |
| Точка плана эксперимента 10 с поправкой | 46,8              | 32,4             | -0,04                   | -0,04                  |
| Точка плана эксперимента 10 с поправкой | 68,4              | 32,4             | -0,09                   | 0                      |
| Точка плана эксперимента 10 с поправкой | 46,8              | 59,4             | -0,05                   | -0,16                  |
| Точка плана эксперимента 11 с поправкой | 52,2              | 68,4             | -0,64                   | -0,1                   |
| Точка плана эксперимента 11 с поправкой | 36                | 54               | -0,28                   | 0,08                   |
| Точка плана эксперимента 11 с поправкой | 64,8              | 79,2             | -0,94                   | -0,35                  |
| Точка плана эксперимента 11 с поправкой | 63                | 59,4             | -0,93                   | -0,08                  |
| Точка плана эксперимента 11 с поправкой | 37,8              | 79,2             | -0,75                   | -0,26                  |

Продолжение приложения Е

|                                         |      |      |              |              |
|-----------------------------------------|------|------|--------------|--------------|
| Точка плана эксперимента 12 с поправкой | 68,4 | 52,2 | <b>-0,04</b> | <b>-0,14</b> |
| Точка плана эксперимента 12 с поправкой | 52,2 | 37,8 | <b>-0,22</b> | <b>0,04</b>  |
| Точка плана эксперимента 12 с поправкой | 79,2 | 64,8 | <b>-0,29</b> | <b>-0,19</b> |
| Точка плана эксперимента 12 с поправкой | 48,6 | 54   | <b>-0,17</b> | <b>-0,22</b> |
| Точка плана эксперимента 12 с поправкой | 72   | 32,4 | <b>-0,24</b> | <b>-0,01</b> |
| Точка плана эксперимента 13 с поправкой | 52,2 | 52,2 | <b>-0,32</b> | <b>0,07</b>  |
| Точка плана эксперимента 13 с поправкой | 66,6 | 66,6 | <b>-0,74</b> | <b>-0,11</b> |
| Точка плана эксперимента 13 с поправкой | 39,6 | 37,8 | <b>-0,16</b> | <b>0,1</b>   |
| Точка плана эксперимента 13 с поправкой | 39,6 | 59,4 | <b>-0,18</b> | <b>-0,19</b> |
| Точка плана эксперимента 13 с поправкой | 64,8 | 39,6 | <b>-0,43</b> | <b>0,07</b>  |
| Точка плана эксперимента 14 с поправкой | 59,4 | 59,4 | <b>-0,55</b> | <b>-0,03</b> |
| Точка плана эксперимента 14 с поправкой | 43,2 | 45   | <b>-0,12</b> | <b>0,04</b>  |
| Точка плана эксперимента 14 с поправкой | 72   | 70,2 | <b>-0,64</b> | <b>0,04</b>  |
| Точка плана эксперимента 14 с поправкой | 70,2 | 50,4 | <b>-0,7</b>  | <b>0,16</b>  |
| Точка плана эксперимента 14 с поправкой | 45   | 72   | <b>-0,47</b> | <b>-0,25</b> |
| Точка плана эксперимента 15 с поправкой | 50,4 | 61,2 | <b>-0,11</b> | <b>-0,12</b> |
| Точка плана эксперимента 15 с поправкой | 66,6 | 45   | <b>-0,55</b> | <b>0,12</b>  |
| Точка плана эксперимента 15 с поправкой | 72   | 72   | <b>-0,59</b> | <b>-0,11</b> |
| Точка плана эксперимента 15 с поправкой | 70,2 | 59,4 | <b>-0,73</b> | <b>0,03</b>  |
| Точка плана эксперимента 15 с поправкой | 43,2 | 39,6 | <b>-0,06</b> | <b>0,07</b>  |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

### Обработка результатов экспериментальных данных.

Математическая модель, описывающая распределение угловых поправок  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$  в пространстве, была рассмотрена в виде полинома второго порядка, который имеет вид:

$$\Delta\alpha = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + a_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + a_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + a_{11} \cdot (X_1)^2 + \\ + a_{22} \cdot (X_2)^2 + a_{33} \cdot (X_3)^2,$$

$$\Delta\beta = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{11} \cdot (X_1)^2 + \\ + b_{22} \cdot (X_2)^2 + b_{33} \cdot (X_3)^2.$$

Оба уравнения можно представить в виде матричного уравнения:

$$Y_1 = a^T \cdot f(x),$$

$$Y_2 = b^T \cdot f(x).$$

где  $a^T$  – транспонированная матрица, содержащая оценки коэффициентов первой модели;  $b^T$  – транспонированная матрица, содержащая оценки коэффициентов второй модели;  $f(x)$  – матрица, содержащая переменные,  $Y_1$  и  $Y_2$  – оценка значений параметра оптимизации.

Матрицы  $a^T$  и  $b^T$  имеют следующий вид:

$$a^T = (a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_{12} \ a_{13} \ a_{23} \ a_{11} \ a_{22} \ a_{33}),$$

$$b^T = (b_0 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_{12} \ b_{13} \ b_{23} \ b_{11} \ b_{22} \ b_{33}),$$

Матрица  $f(x)$  имеет вид:

$$f(x)^T = (f_0(x) \ f_1(x) \ f_2(x) \ f_3(x) \ f_{12}(x) \ f_{13}(x) \ f_{23}(x) \ f_{11}(x) \ f_{22}(x) \ f_{33}(x)),$$

где  $f_0(x) = 1$ ,  $f_1(x) = x_1$ ,  $f_2(x) = x_2$ ,  $f_3(x) = x_3$ ,  $f_{12}(x) = x_1 \cdot x_2$ ,  $f_{13}(x) = x_1 \cdot x_3$ ,  $f_{23}(x) = x_2 \cdot x_3$ ,  $f_{11}(x) = (x_1)^2$ ,  $f_{22}(x) = (x_2)^2$ ,  $f_{33}(x) = (x_3)^2$ .

Оценки коэффициентов рассматриваемых моделей определяются матричными уравнениями:

$$a = C \cdot F^T \cdot \tilde{Y},$$

$$b = C \cdot F^T \cdot \tilde{Y},$$

где  $C = (F^T \cdot F)^{-1}$ ,  $\tilde{Y}$  – матрица, включающая результаты измерений.

Матрица  $F$  включает значения функций  $f_i(x)$  в различных точках  $x^j$  плана

эксперимента с координатами:  $x^j = (x_1; x_2; x_3; x_4)$ .

Согласно плану эксперимента эти точки имеют следующие координаты:

$$\begin{array}{lll}
 x^1 = (+1; +1; 0) & x^6 = (-1; 0; -1) & x^{11} = (0; +1; -1) \\
 x^2 = (-1; -1; 0) & x^7 = (+1; 0; -1) & x^{12} = (0; -1; +1) \\
 x^3 = (+1; -1; 0) & x^8 = (-1; 0; +1) & x^{13} = (0; 0; 0) \\
 x^4 = (-1; +1; 0) & x^9 = (0; +1; +1) & x^{14} = (0; 0; 0) \\
 x^5 = (+1; 0; +1) & x^{10} = (0; -1; -1) & x^{15} = (0; 0; 0)
 \end{array}$$

В этом случае матрица  $F$  будет иметь следующий вид:

$$F = \begin{pmatrix} f_0(x^1) & f_1(x^1) & f_2(x^1) & \dots & f_{33}(x^1) \\ f_0(x^2) & f_1(x^2) & f_2(x^2) & \dots & f_{33}(x^2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_0(x^{15}) & f_1(x^{15}) & f_2(x^{15}) & \dots & f_{33}(x^{15}) \end{pmatrix}$$

Матрица, содержащая результаты экспериментальных данных (вектор наблюдений) имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \widetilde{Y}_1 &= (-0,784 \quad 0,168 \quad -0,464 \quad -0,652 \quad -0,552 \quad -0,064 \quad -0,620 \quad -0,410 \quad -0,680 \\
 &\quad -0,062 \quad -0,708 \quad -0,192 \quad -0,366 \quad -0,496 \quad -0,408)^T, \\
 \widetilde{Y}_2 &= (0,124 \quad -0,242 \quad 0,144 \quad -0,506 \quad 0,088 \quad -0,118 \quad 0,064 \quad -0,16 \quad -0,222 \\
 &\quad -0,064 \quad -0,142 \quad -0,104 \quad -0,012 \quad -0,008 \quad -0,002)^T.
 \end{aligned}$$

Матрица  $F$  имеет вид:

$$F = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Матрица  $F^T$  имеет вид:

$$F^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Произведение матриц  $F$  и  $F^T$ :

$$F^T \cdot F = \begin{pmatrix} 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 8 & 8 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 4 & 4 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 8 & 4 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 & 8 \end{pmatrix}$$

Матрица  $C$  равна:

$$C = (F^T \cdot F)^{-1} = \begin{pmatrix} 0,33 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,17 & -0,17 & -0,17 \\ 0 & 0,13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,25 & 0 & 0 & 0 \\ -0,17 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,27 & 0,021 & 0,021 \\ -0,17 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,021 & 0,27 & 0,021 \\ -0,17 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,021 & 0,021 & 0,27 \end{pmatrix}$$

Произведение матриц  $C$  и  $F^T$  равно:

$$C \cdot F^T = \frac{1}{24} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 8 & 8 \\ 3 & -3 & 3 & -3 & 3 & -3 & 3 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & -3 & -3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & -3 & 3 & -3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & -3 & -3 & 3 & 3 & -3 & -3 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 6 & -6 & -6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 6 & -6 & -6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 6 & -6 & -6 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & -3 & -3 & -3 & -3 & -4 & -4 & -4 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & -3 & -3 & -3 & -3 & 3 & 3 & 3 & 3 & -4 & -4 & -4 \\ -3 & -3 & -3 & -3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & -4 & -4 & -4 \end{pmatrix}$$

Оценки коэффициентов, рассматриваемых математических моделей равны:

$$a = C \cdot F^T \cdot \tilde{Y}_1 = \begin{pmatrix} -0,4233 \\ -0,1828 \\ -0,2843 \\ -0,0475 \\ 0,1250 \\ 0,1035 \\ 0,0395 \\ -0,0053 \\ -0,0043 \\ 0,0172 \end{pmatrix}, \quad b = C \cdot F^T \cdot \tilde{Y}_2 = \begin{pmatrix} -0,0073 \\ 0,1808 \\ -0,0600 \\ -0,0173 \\ 0,0610 \\ 0,0165 \\ -0,0100 \\ -0,0056 \\ -0,1071 \\ -0,0186 \end{pmatrix}.$$

С учетом полученных оценок коэффициентов, уравнения регрессии, приобретают вид:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= -0,4233 - 0,1828 \cdot X_1 - 0,2843 \cdot X_2 - 0,0475 \cdot X_3 + 0,1250 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,1035 \cdot X_1 \cdot X_3 + \\ &\quad + 0,0395 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,0053 \cdot (X_1)^2 - 0,0043 \cdot (X_2)^2 + 0,0172 \cdot (X_3)^2, \\ \Delta\beta &= -0,0073 + 0,1808 \cdot X_1 - 0,0600 \cdot X_2 - 0,0173 \cdot X_3 + 0,0610 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0165 \cdot X_1 \cdot X_3 - \\ &\quad - 0,0100 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,0056 \cdot (X_1)^2 - 0,1071 \cdot (X_2)^2 - 0,0186 \cdot (X_3)^2. \end{aligned}$$

Произведем оценку значимости коэффициентов модели при помощи критерия Стьюдента и отбросим незначимые коэффициенты. Для этого определим расчётное значение коэффициента  $t_i$  и сравним его с табличным значением. Для расчёта коэффициента  $t_i$  используем соотношение:

$$t_i = \frac{|a_i|}{\sigma_a},$$

где  $a_i$  – значение  $i$ -ого коэффициента,  $\sigma_a$  – среднее квадратическое для коэффициентов уравнения регрессии.

Величину  $\sigma_a$  определяем при помощи формулы:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sigma_{ВОСП}^2}{N \cdot m}}$$

где  $N$  – число точек плана эксперимента,  $m$  – число повторных опытов в каждой точке плана,  $\sigma_{ВОСП}^2$  – дисперсия воспроизводимости.

Дисперсия воспроизводимости характеризует точность одного измерения и определяется как среднее для из всех дисперсий, определенных в каждой точке плана эксперимента. Поэтому дисперсия воспроизводимости определяется формулой:

$$\sigma_{ВОСП}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}{N},$$

где  $\sigma_i^2$  – дисперсия, определённая в данной точке плана.

Коэффициент модели считается значимым, если расчётное значение коэффициента  $t_i$  больше табличного значения коэффициента Стьюдента  $t_{ТАБЛ}$ . Для определения табличного значения коэффициента Стьюдента  $t_{ТАБЛ}$  определяем доверительную вероятность  $P$  и число степеней свободы  $f$ , которое определяется равенством:

$$f = N \cdot (m - 1).$$

Для построения доверительных вычислим значения критерия оптимизации согласно полученной модели и сравним с экспериментально полученными величинами.

Результаты расчётов приведённых характеристик и оценку значимости коэффициентов модели представим в виде таблицы (таблица (1)).

Таблица 1 – Оценка значимости коэффициентов.

| Коэффициент | Значение коэффициента | Дисперсия воспроизводимости $\sigma_{ВОСП}^2$ | Среднее квадратическое Отклонение коэффициентов уравнения регрессии | Коэффициент $t_i$ | Табличное значение коэффициента Стьюдента $t_{ТАБЛ}$ | Вывод о значимости коэффициента |
|-------------|-----------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------|
| $a_0$       | -0,4233               | 0,03977                                       | 0,02303                                                             | 18,3840           | 2,0003                                               | ЗНАЧИМ                          |
| $a_1$       | -0,1828               |                                               |                                                                     | 7,9362            |                                                      | ЗНАЧИМ                          |
| $a_2$       | -0,2843               |                                               |                                                                     | 12,3440           |                                                      | ЗНАЧИМ                          |
| $a_3$       | -0,0475               |                                               |                                                                     | 2,0628            |                                                      | ЗНАЧИМ                          |
| $a_{12}$    | 0,1250                |                                               |                                                                     | 5,4283            |                                                      | ЗНАЧИМ                          |
| $a_{13}$    | 0,1035                |                                               |                                                                     | 4,4947            |                                                      | ЗНАЧИМ                          |
| $a_{23}$    | 0,0395                |                                               |                                                                     | 1,7154            |                                                      | незначим                        |
| $a_{11}$    | -0,0053               |                                               |                                                                     | 0,2316            |                                                      | незначим                        |
| $a_{22}$    | -0,0043               |                                               |                                                                     | 0,1882            |                                                      | незначим                        |
| $a_{33}$    | 0,0172                |                                               |                                                                     | 0,7455            |                                                      | незначим                        |
| $b_0$       | -0,0073               | 0,01917                                       | 0,01599                                                             | 0,4587            | 2,0003                                               | незначим                        |
| $b_1$       | 0,1808                |                                               |                                                                     | 11,3069           |                                                      | ЗНАЧИМ                          |
| $b_2$       | -0,0600               |                                               |                                                                     | 3,7533            |                                                      | ЗНАЧИМ                          |
| $b_3$       | -0,0173               |                                               |                                                                     | 1,0791            |                                                      | незначим                        |
| $b_{12}$    | 0,0610                |                                               |                                                                     | 3,8159            |                                                      | ЗНАЧИМ                          |
| $b_{13}$    | 0,0165                |                                               |                                                                     | 1,0322            |                                                      | незначим                        |
| $b_{23}$    | -0,0100               |                                               |                                                                     | 0,6256            |                                                      | незначим                        |
| $b_{11}$    | -0,0056               |                                               |                                                                     | 0,3493            |                                                      | незначим                        |
| $b_{22}$    | -0,1071               |                                               |                                                                     | 6,6986            |                                                      | ЗНАЧИМ                          |
| $b_{33}$    | -0,0186               |                                               |                                                                     | 1,1625            |                                                      | незначим                        |

Для оценки адекватности модели используем критерий Фишера, сравнивая дисперсию адекватности с дисперсией воспроизводимости. Для этого рассчитываем значение F-критерия при помощи формулы:

$$\sigma_{ВОСП}^2 = \frac{\sigma_{ТЕОР}^2}{\sigma_{ВОСП}^2},$$

где  $\sigma_{ТЕОР}^2$  – дисперсия, характеризующая ошибку модели.

Дисперсия  $\sigma_{ТЕОР}^2$  определяется исходя из построенных моделей при помощи соотношения:

$$\sigma_{ТЕОР}^2 = \frac{\sum_{i=2}^N (\bar{y}_i - y_{i \text{ МОД}})^2}{N - N_{\text{МОД}} - 1},$$

где  $N_{\text{МОД}}$  – число значимых коэффициентов модели.

Результаты расчётов, приведённых характеристик и оценку адекватности модели, приведем в виде таблицы (таблица (2)).

Таблица 2 – Оценка адекватности модели.

| Модель         | Дисперсия<br>воспроизводимости<br>$\sigma_{ВОСП}^2$ | Дисперсия<br>модели<br>$\sigma_{ТЕОР}^2$ | $F_{РАСЧ}$ | Число степеней<br>свободы |       | $F_{ТАБЛ}$ | Вывод     |
|----------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------|------------|---------------------------|-------|------------|-----------|
|                |                                                     |                                          |            | $f_1$                     | $f_2$ |            |           |
| $\Delta\alpha$ | 0,03977                                             | 0,01186                                  | 0,2983     | 6                         | 60    | 2,25       | Адекватна |
| $\Delta\beta$  | 0,01917                                             | 0,005145                                 | 0,2685     | 4                         | 60    | 2,53       | Адекватна |

С учетом значимых коэффициентов математическая модель, описывающая распределение угловых поправок  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$  в пространстве в кодированном виде имеет вид:

$$\Delta\alpha = -0,4233 - 0,1828 \cdot X_1 - 0,2843 \cdot X_2 - 0,0475 \cdot X_3 + 0,1250 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,1035 \cdot X_1 \cdot X_3,$$

$$\Delta\beta = 0,1808 \cdot X_1 - 0,0600 \cdot X_2 + 0,0610 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,1071 \cdot (X_2)^2.$$

Для расшифровки уравнения используем подстановки:

$$X_1 = \frac{x - 1,744}{0,5}, X_2 = \frac{y - 0,449}{0,2}, X_3 = \frac{z - 0,330}{0,075}.$$

Подставив данные подстановки, в кодированные уравнения и выполнив необходимые математические преобразования, получаем уравнения, описывающие распределение угловых поправок для точек исследуемой рабочей области:

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

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

где  $x, y, z$  – координаты точки, для которой определяется угловая поправка, в системе координат связанной со станком роботизированной установки преддоильной подготовки вымени, (м).

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### Результаты расчёта координат с использованием двухуровневого алгоритма.

| Номер опыта | b1, (м) | b2, (м) | $\Delta x$ , (м) | $\Delta y$ , (м) | $\Delta_{zk1}$ , (м) | $\Delta_{zk2}$ , (м) | $\Delta_{zcp}$ , (м) | $\Delta_{xoy}$ , (м) | $\Delta_r$ , (м) |
|-------------|---------|---------|------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|
| 1 1 двойное | 0,75    | 1,03    | 0,00183          | 0,00087          | 0,00369              | 0,00279              | 0,00045              | 0,00203              | 0,00208          |
| 1 1 двойное | 0,74    | 1,02    | 0,00081          | 0,00369          | 0,00039              | 0,00343              | 0,00152              | 0,00378              | 0,00407          |
| 1 1 двойное | 0,72    | 1,00    | 0,00428          | 0,00042          | 0,00590              | 0,00202              | 0,00194              | 0,00430              | 0,00472          |
| 1 1 двойное | 0,72    | 1,04    | 0,00381          | 0,00444          | 0,00538              | 0,00617              | 0,00040              | 0,00585              | 0,00587          |
| 1 1 двойное | 0,75    | 0,99    | 0,00067          | 0,00813          | 0,00041              | 0,00035              | 0,00038              | 0,00816              | 0,00817          |
| 1 2 двойной | 0,89    | 0,87    | 0,00405          | 0,00468          | 0,00465              | 0,00298              | 0,00083              | 0,00619              | 0,00625          |
| 1 2 двойной | 0,87    | 0,87    | 0,00133          | 0,00108          | 0,00841              | 0,00241              | 0,00300              | 0,00171              | 0,00345          |
| 1 2 двойной | 0,85    | 0,85    | 0,00039          | 0,00256          | 0,00130              | 0,00608              | 0,00369              | 0,00259              | 0,00451          |
| 1 2 двойной | 0,89    | 0,86    | 0,00109          | 0,00231          | 0,00667              | 0,00533              | 0,00067              | 0,00255              | 0,00264          |
| 1 2 двойной | 0,86    | 0,87    | 0,00027          | 0,00404          | 0,00167              | 0,00077              | 0,00122              | 0,00405              | 0,00423          |
| 1 3 двойной | 1,03    | 0,73    | 0,00119          | 0,00308          | 0,01321              | 0,00231              | 0,00545              | 0,00331              | 0,00638          |
| 1 3 двойной | 1,02    | 0,72    | 0,00068          | 0,00090          | 0,00619              | 0,00057              | 0,00338              | 0,00112              | 0,00356          |
| 1 3 двойной | 0,98    | 0,72    | 0,00778          | 0,00751          | 0,01410              | 0,00042              | 0,00726              | 0,01081              | 0,01302          |
| 1 3 двойной | 0,99    | 0,74    | 0,00077          | 0,00384          | 0,01425              | 0,00106              | 0,00659              | 0,00392              | 0,00767          |
| 1 3 двойной | 1,00    | 0,72    | 0,00010          | 0,00225          | 0,00423              | 0,00267              | 0,00345              | 0,00225              | 0,00413          |
| 1 4 двойной | 0,89    | 1,12    | 0,00220          | 0,00279          | 0,00181              | 0,00010              | 0,00085              | 0,00355              | 0,00365          |
| 1 4 двойной | 0,88    | 1,11    | 0,00201          | 0,00466          | 0,00564              | 0,00487              | 0,00038              | 0,00507              | 0,00509          |
| 1 4 двойной | 0,86    | 1,07    | 0,00053          | 0,00298          | 0,00500              | 0,00603              | 0,00551              | 0,00303              | 0,00629          |
| 1 4 двойной | 0,86    | 1,12    | 0,00432          | 0,00041          | 0,00469              | 0,00362              | 0,00054              | 0,00434              | 0,00437          |
| 1 4 двойной | 0,88    | 1,07    | 0,00028          | 0,00145          | 0,00277              | 0,00620              | 0,00449              | 0,00148              | 0,00472          |
| 1 5 двойной | 1,01    | 1,00    | 0,00194          | 0,00200          | 0,00662              | 0,00072              | 0,00295              | 0,00279              | 0,00406          |
| 1 5 двойной | 0,99    | 0,99    | 0,00237          | 0,00089          | 0,00038              | 0,00281              | 0,00121              | 0,00253              | 0,00280          |
| 1 5 двойной | 0,97    | 0,98    | 0,00633          | 0,00489          | 0,00824              | 0,00236              | 0,00294              | 0,00800              | 0,00852          |
| 1 5 двойной | 0,97    | 1,00    | 0,00394          | 0,00323          | 0,00241              | 0,00029              | 0,00135              | 0,00510              | 0,00527          |
| 1 5 двойной | 1,00    | 0,96    | 0,00242          | 0,00062          | 0,00773              | 0,00475              | 0,00149              | 0,00249              | 0,00291          |
| 1 6 двойной | 1,13    | 0,88    | 0,00524          | 0,00125          | 0,00844              | 0,00039              | 0,00442              | 0,00539              | 0,00697          |
| 1 6 двойной | 1,12    | 0,88    | 0,00044          | 0,00106          | 0,01132              | 0,00077              | 0,00605              | 0,00114              | 0,00616          |
| 1 6 двойной | 1,10    | 0,85    | 0,00089          | 0,00168          | 0,00095              | 0,00315              | 0,00110              | 0,00190              | 0,00219          |
| 1 6 двойной | 1,10    | 0,89    | 0,00213          | 0,00039          | 0,00076              | 0,00060              | 0,00068              | 0,00217              | 0,00227          |
| 1 6 двойной | 1,14    | 0,86    | 0,00180          | 0,00218          | 0,00816              | 0,00476              | 0,00170              | 0,00283              | 0,00330          |
| 1 7 двойной | 1,06    | 1,26    | 0,00282          | 0,00008          | 0,00088              | 0,00528              | 0,00220              | 0,00283              | 0,00358          |
| 1 7 двойной | 1,04    | 1,23    | 0,00101          | 0,00526          | 0,00501              | 0,00098              | 0,00202              | 0,00535              | 0,00572          |
| 1 7 двойной | 1,02    | 1,20    | 0,00318          | 0,00303          | 0,00612              | 0,00557              | 0,00584              | 0,00439              | 0,00731          |
| 1 7 двойной | 1,02    | 1,26    | 0,00478          | 0,00140          | 0,00338              | 0,00235              | 0,00052              | 0,00498              | 0,00501          |
| 1 7 двойной | 1,04    | 1,20    | 0,00191          | 0,00175          | 0,00302              | 0,00722              | 0,00512              | 0,00259              | 0,00574          |
| 1 8 двойной | 1,14    | 1,13    | 0,00485          | 0,00524          | 0,00022              | 0,00136              | 0,00057              | 0,00714              | 0,00716          |
| 1 8 двойной | 1,12    | 1,13    | 0,00219          | 0,00437          | 0,00507              | 0,00505              | 0,00001              | 0,00489              | 0,00489          |
| 1 8 двойной | 1,09    | 1,09    | 0,00516          | 0,00220          | 0,00512              | 0,00547              | 0,00529              | 0,00561              | 0,00771          |
| 1 8 двойной | 1,10    | 1,15    | 0,00835          | 0,00460          | 0,00545              | 0,00215              | 0,00165              | 0,00953              | 0,00967          |

продолжение приложения 3

|              |      |      |         |         |         |         |         |         |         |
|--------------|------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 8 двойной  | 1,14 | 1,09 | 0,00733 | 0,00435 | 0,00037 | 0,00599 | 0,00281 | 0,00852 | 0,00897 |
| 1 9 двойной  | 1,26 | 1,06 | 0,00251 | 0,00339 | 0,00941 | 0,00246 | 0,00347 | 0,00422 | 0,00547 |
| 1 9 двойной  | 1,25 | 1,03 | 0,01079 | 0,00183 | 0,00356 | 0,00357 | 0,00001 | 0,01095 | 0,01095 |
| 1 9 двойной  | 1,23 | 1,03 | 0,00724 | 0,00403 | 0,01034 | 0,00022 | 0,00528 | 0,00829 | 0,00983 |
| 1 9 двойной  | 1,22 | 1,06 | 0,00072 | 0,00715 | 0,01078 | 0,00323 | 0,00377 | 0,00719 | 0,00812 |
| 1 9 двойной  | 1,26 | 1,01 | 0,00170 | 0,00158 | 0,00404 | 0,00044 | 0,00180 | 0,00232 | 0,00294 |
| 1 10 двойной | 1,22 | 1,42 | 0,00087 | 0,00267 | 0,00151 | 0,00266 | 0,00209 | 0,00281 | 0,00350 |
| 1 10 двойной | 1,22 | 1,40 | 0,00388 | 0,00463 | 0,00205 | 0,00073 | 0,00066 | 0,00604 | 0,00608 |
| 1 10 двойной | 1,18 | 1,36 | 0,00301 | 0,00459 | 0,00917 | 0,00526 | 0,00721 | 0,00549 | 0,00906 |
| 1 10 двойной | 1,22 | 1,35 | 0,00751 | 0,00153 | 0,00019 | 0,00478 | 0,00230 | 0,00766 | 0,00800 |
| 1 10 двойной | 1,18 | 1,40 | 0,00402 | 0,00155 | 0,00852 | 0,00299 | 0,00576 | 0,00431 | 0,00719 |
| 1 11 двойной | 1,31 | 1,31 | 0,00677 | 0,00200 | 0,00289 | 0,00382 | 0,00047 | 0,00706 | 0,00708 |
| 1 11 двойной | 1,29 | 1,29 | 0,00264 | 0,00752 | 0,00466 | 0,00332 | 0,00067 | 0,00797 | 0,00800 |
| 1 11 двойной | 1,26 | 1,28 | 0,00876 | 0,00150 | 0,00443 | 0,00467 | 0,00455 | 0,00888 | 0,00998 |
| 1 11 двойной | 1,26 | 1,32 | 0,00444 | 0,00285 | 0,00467 | 0,00172 | 0,00147 | 0,00528 | 0,00548 |
| 1 11 двойной | 1,28 | 1,27 | 0,00491 | 0,00122 | 0,00464 | 0,00528 | 0,00496 | 0,00506 | 0,00708 |
| 1 12 двойной | 1,41 | 1,21 | 0,01053 | 0,00581 | 0,00661 | 0,00382 | 0,00521 | 0,01202 | 0,01311 |
| 1 12 двойной | 1,40 | 1,20 | 0,00648 | 0,00015 | 0,00950 | 0,00386 | 0,00282 | 0,00649 | 0,00707 |
| 1 12 двойной | 1,37 | 1,18 | 0,00625 | 0,00223 | 0,01080 | 0,00017 | 0,00531 | 0,00664 | 0,00850 |
| 1 12 двойной | 1,36 | 1,21 | 0,00309 | 0,00238 | 0,00456 | 0,00160 | 0,00308 | 0,00390 | 0,00497 |
| 1 12 двойной | 1,40 | 1,18 | 0,00915 | 0,00020 | 0,00943 | 0,00046 | 0,00448 | 0,00915 | 0,01019 |
| 1 13 двойной | 1,41 | 1,58 | 0,00309 | 0,00101 | 0,00007 | 0,00026 | 0,00010 | 0,00326 | 0,00326 |
| 1 13 двойной | 1,38 | 1,55 | 0,01178 | 0,00143 | 0,00714 | 0,00542 | 0,00628 | 0,01186 | 0,01342 |
| 1 13 двойной | 1,36 | 1,54 | 0,00728 | 0,00420 | 0,00182 | 0,00227 | 0,00023 | 0,00841 | 0,00841 |
| 1 13 двойной | 1,35 | 1,59 | 0,00003 | 0,00696 | 0,00246 | 0,00677 | 0,00216 | 0,00696 | 0,00729 |
| 1 13 двойной | 1,39 | 1,52 | 0,00356 | 0,00401 | 0,00610 | 0,00080 | 0,00345 | 0,00536 | 0,00638 |
| 1 14 двойной | 1,47 | 1,46 | 0,00906 | 0,00472 | 0,00375 | 0,00303 | 0,00339 | 0,01022 | 0,01077 |
| 1 14 двойной | 1,46 | 1,45 | 0,00071 | 0,00008 | 0,00278 | 0,00027 | 0,00126 | 0,00071 | 0,00144 |
| 1 14 двойной | 1,41 | 1,41 | 0,00373 | 0,00172 | 0,01037 | 0,00546 | 0,00791 | 0,00411 | 0,00892 |
| 1 14 двойной | 1,42 | 1,47 | 0,00424 | 0,00152 | 0,01099 | 0,00235 | 0,00667 | 0,00451 | 0,00805 |
| 1 14 двойной | 1,45 | 1,42 | 0,00456 | 0,00117 | 0,00297 | 0,00730 | 0,00216 | 0,00471 | 0,00518 |
| 1 15 двойной | 1,58 | 1,41 | 0,00000 | 0,00105 | 0,00332 | 0,00368 | 0,00018 | 0,00105 | 0,00107 |
| 1 15 двойной | 1,56 | 1,37 | 0,00644 | 0,00592 | 0,00211 | 0,00020 | 0,00115 | 0,00875 | 0,00882 |
| 1 15 двойной | 1,55 | 1,38 | 0,01203 | 0,00164 | 0,00821 | 0,00149 | 0,00336 | 0,01214 | 0,01260 |
| 1 15 двойной | 1,51 | 1,39 | 0,01025 | 0,00202 | 0,00696 | 0,00214 | 0,00455 | 0,01044 | 0,01139 |
| 1 15 двойной | 1,57 | 1,37 | 0,00582 | 0,00225 | 0,00631 | 0,00039 | 0,00335 | 0,00624 | 0,00709 |
| 1 16 двойной | 1,58 | 1,74 | 0,00196 | 0,00257 | 0,00497 | 0,00223 | 0,00360 | 0,00324 | 0,00484 |
| 1 16 двойной | 1,56 | 1,71 | 0,00038 | 0,00617 | 0,00019 | 0,00834 | 0,00427 | 0,00618 | 0,00751 |
| 1 16 двойной | 1,54 | 1,71 | 0,01452 | 0,00789 | 0,00040 | 0,00387 | 0,00173 | 0,01653 | 0,01662 |
| 1 16 двойной | 1,51 | 1,73 | 0,00628 | 0,00173 | 0,01366 | 0,00367 | 0,00867 | 0,00652 | 0,01084 |
| 1 16 двойной | 1,58 | 1,70 | 0,01248 | 0,00239 | 0,00081 | 0,00131 | 0,00025 | 0,01271 | 0,01271 |
| 1 17 двойной | 1,66 | 1,65 | 0,00543 | 0,00606 | 0,00072 | 0,00215 | 0,00144 | 0,00814 | 0,00827 |
| 1 17 двойной | 1,61 | 1,61 | 0,01387 | 0,00594 | 0,00697 | 0,00658 | 0,00677 | 0,01509 | 0,01654 |

продолжение приложения 3

|              |      |      |         |         |         |         |         |         |         |
|--------------|------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 17 двойной | 1,61 | 1,62 | 0,02033 | 0,00163 | 0,00105 | 0,00149 | 0,00022 | 0,02039 | 0,02040 |
| 1 17 двойной | 1,59 | 1,65 | 0,01189 | 0,00446 | 0,01291 | 0,00445 | 0,00868 | 0,01270 | 0,01538 |
| 1 17 двойной | 1,62 | 1,58 | 0,00733 | 0,00003 | 0,00205 | 0,00652 | 0,00224 | 0,00733 | 0,00767 |
| 1 18 двойной | 1,73 | 1,56 | 0,00540 | 0,00449 | 0,00250 | 0,00510 | 0,00130 | 0,00702 | 0,00714 |
| 1 18 двойной | 1,72 | 1,56 | 0,01257 | 0,00178 | 0,00553 | 0,00128 | 0,00213 | 0,01270 | 0,01287 |
| 1 18 двойной | 1,66 | 1,51 | 0,01506 | 0,00245 | 0,00772 | 0,00770 | 0,00771 | 0,01526 | 0,01710 |
| 1 18 двойной | 1,66 | 1,56 | 0,00486 | 0,00664 | 0,00838 | 0,00034 | 0,00402 | 0,00823 | 0,00916 |
| 1 18 двойной | 1,74 | 1,51 | 0,00046 | 0,00163 | 0,00408 | 0,00975 | 0,00283 | 0,00170 | 0,00330 |
| 2 1 двойной  | 0,74 | 1,03 | 0,00323 | 0,00372 | 0,00146 | 0,00305 | 0,00080 | 0,00493 | 0,00499 |
| 2 1 двойной  | 0,73 | 1,02 | 0,00075 | 0,00028 | 0,00207 | 0,00102 | 0,00052 | 0,00080 | 0,00096 |
| 2 1 двойной  | 0,71 | 0,99 | 0,00057 | 0,00065 | 0,00403 | 0,00537 | 0,00470 | 0,00086 | 0,00478 |
| 2 1 Двойной  | 0,71 | 1,03 | 0,00089 | 0,00194 | 0,00421 | 0,00192 | 0,00306 | 0,00214 | 0,00373 |
| 2 1 двойной  | 0,74 | 1,00 | 0,00308 | 0,00263 | 0,00181 | 0,00685 | 0,00252 | 0,00405 | 0,00477 |
| 2 2 двойной  | 0,88 | 0,88 | 0,00037 | 0,00030 | 0,00691 | 0,00307 | 0,00192 | 0,00048 | 0,00198 |
| 2 2 двойной  | 0,87 | 0,86 | 0,00254 | 0,00547 | 0,00257 | 0,00123 | 0,00067 | 0,00603 | 0,00607 |
| 2 2 двойной  | 0,85 | 0,85 | 0,00081 | 0,00146 | 0,00027 | 0,00354 | 0,00163 | 0,00167 | 0,00234 |
| 2 2 двойной  | 0,85 | 0,88 | 0,00096 | 0,00012 | 0,00041 | 0,00204 | 0,00082 | 0,00096 | 0,00126 |
| 2 2 двойной  | 0,88 | 0,84 | 0,00067 | 0,00407 | 0,00540 | 0,00538 | 0,00001 | 0,00412 | 0,00412 |
| 2 3 двойной  | 1,03 | 0,75 | 0,00093 | 0,00117 | 0,00554 | 0,00217 | 0,00168 | 0,00149 | 0,00225 |
| 2 3 двойной  | 1,01 | 0,74 | 0,00041 | 0,00507 | 0,00912 | 0,00330 | 0,00291 | 0,00509 | 0,00586 |
| 2 3 двойной  | 0,99 | 0,71 | 0,00015 | 0,00308 | 0,00350 | 0,00235 | 0,00058 | 0,00309 | 0,00314 |
| 2 3 двойной  | 1,03 | 0,72 | 0,00273 | 0,00231 | 0,00924 | 0,00247 | 0,00339 | 0,00358 | 0,00493 |
| 2 3 двойной  | 0,98 | 0,74 | 0,00627 | 0,00669 | 0,01095 | 0,00189 | 0,00453 | 0,00917 | 0,01023 |
| 2 4 двойной  | 0,88 | 1,14 | 0,00056 | 0,00166 | 0,00044 | 0,00365 | 0,00160 | 0,00176 | 0,00238 |
| 2 4 двойной  | 0,86 | 1,12 | 0,00409 | 0,00356 | 0,00260 | 0,00534 | 0,00397 | 0,00542 | 0,00672 |
| 2 4 двойной  | 0,85 | 1,10 | 0,00755 | 0,00460 | 0,00178 | 0,00247 | 0,00035 | 0,00884 | 0,00885 |
| 2 4 двойной  | 0,88 | 1,08 | 0,00124 | 0,00637 | 0,00025 | 0,00161 | 0,00068 | 0,00649 | 0,00653 |
| 2 4 двойной  | 0,84 | 1,13 | 0,00309 | 0,00318 | 0,00310 | 0,00596 | 0,00143 | 0,00443 | 0,00466 |
| 2 5 двойной  | 1,00 | 0,99 | 0,00278 | 0,00517 | 0,00202 | 0,00207 | 0,00002 | 0,00587 | 0,00587 |
| 2 5 двойной  | 0,99 | 0,99 | 0,00231 | 0,00261 | 0,00380 | 0,00178 | 0,00101 | 0,00349 | 0,00363 |
| 2 5 двойной  | 0,96 | 0,95 | 0,00159 | 0,00397 | 0,00463 | 0,00394 | 0,00428 | 0,00428 | 0,00605 |
| 2 5 двойной  | 1,00 | 0,96 | 0,00145 | 0,00028 | 0,00442 | 0,00440 | 0,00001 | 0,00148 | 0,00148 |
| 2 5 двойной  | 0,96 | 0,98 | 0,00127 | 0,00589 | 0,00238 | 0,00143 | 0,00047 | 0,00603 | 0,00605 |
| 2 6 двойной  | 1,14 | 0,88 | 0,00139 | 0,00171 | 0,00652 | 0,00331 | 0,00160 | 0,00220 | 0,00272 |
| 2 6 двойной  | 1,12 | 0,86 | 0,00013 | 0,00523 | 0,00096 | 0,00077 | 0,00009 | 0,00524 | 0,00524 |
| 2 6 двойной  | 1,10 | 0,86 | 0,00772 | 0,00378 | 0,00769 | 0,00025 | 0,00372 | 0,00860 | 0,00937 |
| 2 6 двойной  | 1,14 | 0,84 | 0,00531 | 0,00290 | 0,00389 | 0,00412 | 0,00011 | 0,00605 | 0,00605 |
| 2 6 двойной  | 1,10 | 0,88 | 0,00764 | 0,00268 | 0,00761 | 0,00301 | 0,00230 | 0,00809 | 0,00842 |
| 2 7 двойной  | 1,05 | 1,26 | 0,00012 | 0,00158 | 0,00282 | 0,00374 | 0,00328 | 0,00159 | 0,00365 |
| 2 7 двойной  | 1,03 | 1,25 | 0,00353 | 0,00385 | 0,00069 | 0,00469 | 0,00200 | 0,00522 | 0,00559 |
| 2 7 двойной  | 1,01 | 1,21 | 0,00585 | 0,00189 | 0,00202 | 0,00094 | 0,00054 | 0,00615 | 0,00617 |
| 2 7 двойной  | 1,01 | 1,26 | 0,00375 | 0,00302 | 0,00216 | 0,00413 | 0,00099 | 0,00481 | 0,00491 |
| 2 7 двойной  | 1,02 | 1,20 | 0,00340 | 0,00109 | 0,00598 | 0,00642 | 0,00620 | 0,00357 | 0,00716 |

продолжение приложения 3

|              |      |      |         |         |         |         |         |         |         |
|--------------|------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 2 8 двойной  | 1,15 | 1,14 | 0,00242 | 0,00291 | 0,00115 | 0,00215 | 0,00050 | 0,00379 | 0,00382 |
| 2 8 двойной  | 1,12 | 1,11 | 0,01168 | 0,00431 | 0,00252 | 0,00312 | 0,00282 | 0,01245 | 0,01276 |
| 2 8 двойной  | 1,11 | 1,11 | 0,00559 | 0,00085 | 0,00217 | 0,00127 | 0,00045 | 0,00565 | 0,00567 |
| 2 8 двойной  | 1,15 | 1,09 | 0,00430 | 0,00980 | 0,00164 | 0,00032 | 0,00098 | 0,01070 | 0,01075 |
| 2 8 двойной  | 1,11 | 1,13 | 0,00077 | 0,00096 | 0,00245 | 0,00577 | 0,00166 | 0,00123 | 0,00206 |
| 2 9 двойной  | 1,27 | 1,04 | 0,00602 | 0,00189 | 0,00118 | 0,00382 | 0,00132 | 0,00631 | 0,00644 |
| 2 9 двойной  | 1,25 | 1,04 | 0,00063 | 0,00090 | 0,00522 | 0,00046 | 0,00284 | 0,00110 | 0,00304 |
| 2 9 двойной  | 1,23 | 1,01 | 0,00306 | 0,00056 | 0,00384 | 0,00457 | 0,00421 | 0,00312 | 0,00523 |
| 2 9 двойной  | 1,27 | 1,00 | 0,00663 | 0,00111 | 0,00400 | 0,00448 | 0,00024 | 0,00672 | 0,00673 |
| 2 9 двойной  | 1,21 | 1,03 | 0,00492 | 0,00186 | 0,00450 | 0,00146 | 0,00298 | 0,00526 | 0,00605 |
| 2 10 двойной | 1,22 | 1,42 | 0,00453 | 0,00095 | 0,00133 | 0,00628 | 0,00380 | 0,00463 | 0,00599 |
| 2 10 двойной | 1,19 | 1,40 | 0,00387 | 0,00193 | 0,00879 | 0,00368 | 0,00623 | 0,00432 | 0,00759 |
| 2 10 двойной | 1,19 | 1,38 | 0,00778 | 0,00201 | 0,00142 | 0,00248 | 0,00195 | 0,00804 | 0,00827 |
| 2 10 двойной | 1,22 | 1,37 | 0,00422 | 0,00204 | 0,00600 | 0,00216 | 0,00408 | 0,00469 | 0,00622 |
| 2 10 двойной | 1,17 | 1,40 | 0,00522 | 0,00626 | 0,00006 | 0,00716 | 0,00361 | 0,00815 | 0,00891 |
| 2 11 двойной | 1,31 | 1,30 | 0,00717 | 0,00583 | 0,00269 | 0,00364 | 0,00317 | 0,00924 | 0,00976 |
| 2 11 двойной | 1,30 | 1,30 | 0,00436 | 0,00355 | 0,00108 | 0,00055 | 0,00027 | 0,00562 | 0,00562 |
| 2 11 двойной | 1,26 | 1,26 | 0,00271 | 0,00246 | 0,00761 | 0,00895 | 0,00828 | 0,00366 | 0,00905 |
| 2 11 двойной | 1,31 | 1,26 | 0,00599 | 0,00330 | 0,00042 | 0,00886 | 0,00422 | 0,00684 | 0,00803 |
| 2 11 двойной | 1,27 | 1,30 | 0,00411 | 0,00540 | 0,00945 | 0,00121 | 0,00412 | 0,00679 | 0,00794 |
| 2 12 двойной | 1,42 | 1,21 | 0,01148 | 0,00676 | 0,00103 | 0,00198 | 0,00048 | 0,01333 | 0,01334 |
| 2 12 двойной | 1,40 | 1,21 | 0,00083 | 0,00397 | 0,00350 | 0,00631 | 0,00141 | 0,00406 | 0,00430 |
| 2 12 двойной | 1,36 | 1,16 | 0,00362 | 0,00010 | 0,00587 | 0,00620 | 0,00604 | 0,00363 | 0,00704 |
| 2 12 двойной | 1,43 | 1,18 | 0,00526 | 0,00236 | 0,00225 | 0,00162 | 0,00032 | 0,00576 | 0,00577 |
| 2 12 двойной | 1,36 | 1,20 | 0,00389 | 0,00091 | 0,00587 | 0,00429 | 0,00508 | 0,00399 | 0,00646 |
| 2 13 двойной | 1,41 | 1,57 | 0,00227 | 0,00244 | 0,00108 | 0,00313 | 0,00211 | 0,00333 | 0,00394 |
| 2 13 двойной | 1,38 | 1,54 | 0,00547 | 0,00064 | 0,00781 | 0,00749 | 0,00765 | 0,00551 | 0,00943 |
| 2 13 двойной | 1,37 | 1,53 | 0,01367 | 0,00637 | 0,00081 | 0,00142 | 0,00112 | 0,01508 | 0,01512 |
| 2 13 двойной | 1,41 | 1,51 | 0,00002 | 0,00504 | 0,00462 | 0,00055 | 0,00259 | 0,00504 | 0,00566 |
| 2 13 двойной | 1,37 | 1,56 | 0,00068 | 0,00450 | 0,00084 | 0,00833 | 0,00375 | 0,00455 | 0,00589 |
| 2 14 двойной | 1,48 | 1,46 | 0,00569 | 0,00688 | 0,00181 | 0,00452 | 0,00316 | 0,00892 | 0,00947 |
| 2 14 двойной | 1,48 | 1,46 | 0,01226 | 0,00031 | 0,00002 | 0,00099 | 0,00048 | 0,01227 | 0,01228 |
| 2 14 двойной | 1,42 | 1,41 | 0,00241 | 0,00253 | 0,00949 | 0,00705 | 0,00827 | 0,00350 | 0,00898 |
| 2 14 двойной | 1,43 | 1,47 | 0,00292 | 0,00425 | 0,00966 | 0,00317 | 0,00642 | 0,00515 | 0,00823 |
| 2 14 двойной | 1,44 | 1,47 | 0,01124 | 0,00454 | 0,00167 | 0,00662 | 0,00247 | 0,01212 | 0,01237 |
| 2 15 двойной | 1,58 | 1,40 | 0,00164 | 0,00192 | 0,00242 | 0,00350 | 0,00054 | 0,00253 | 0,00259 |
| 2 15 двойной | 1,55 | 1,38 | 0,00708 | 0,00007 | 0,00563 | 0,00218 | 0,00390 | 0,00708 | 0,00808 |
| 2 15 двойной | 1,54 | 1,39 | 0,01117 | 0,00056 | 0,00613 | 0,00085 | 0,00349 | 0,01119 | 0,01172 |
| 2 15 двойной | 1,53 | 1,41 | 0,00240 | 0,00340 | 0,00633 | 0,00402 | 0,00115 | 0,00417 | 0,00432 |
| 2 15 Двойной | 1,56 | 1,37 | 0,00234 | 0,00571 | 0,00788 | 0,00014 | 0,00401 | 0,00617 | 0,00736 |
| 2 16 двойной | 1,57 | 1,73 | 0,00170 | 0,00310 | 0,00140 | 0,00576 | 0,00358 | 0,00353 | 0,00503 |
| 2 16 двойной | 1,56 | 1,71 | 0,00155 | 0,00376 | 0,00084 | 0,00716 | 0,00400 | 0,00407 | 0,00571 |
| 2 16 двойной | 1,53 | 1,68 | 0,00735 | 0,00619 | 0,00132 | 0,00398 | 0,00265 | 0,00961 | 0,00997 |

продолжение приложения 3

|              |      |      |         |         |         |         |         |         |         |
|--------------|------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 2 16 двойной | 1,52 | 1,72 | 0,00420 | 0,00499 | 0,01002 | 0,00355 | 0,00678 | 0,00652 | 0,00941 |
| 2 16 двойной | 1,57 | 1,68 | 0,00857 | 0,00080 | 0,00119 | 0,00388 | 0,00253 | 0,00860 | 0,00897 |
| 2 17 двойной | 1,64 | 1,64 | 0,00574 | 0,00379 | 0,00064 | 0,00508 | 0,00222 | 0,00688 | 0,00723 |
| 2 17 двойной | 1,62 | 1,61 | 0,00116 | 0,00998 | 0,00634 | 0,00196 | 0,00415 | 0,01004 | 0,01087 |
| 2 17 двойной | 1,61 | 1,61 | 0,00871 | 0,00128 | 0,00399 | 0,00404 | 0,00003 | 0,00880 | 0,00880 |
| 2 17 двойной | 1,58 | 1,65 | 0,00561 | 0,00204 | 0,00853 | 0,00346 | 0,00600 | 0,00597 | 0,00846 |
| 2 17 двойной | 1,64 | 1,62 | 0,01180 | 0,00203 | 0,00079 | 0,00217 | 0,00069 | 0,01197 | 0,01199 |
| 2 18 двойной | 1,73 | 1,56 | 0,00444 | 0,00404 | 0,00124 | 0,00714 | 0,00295 | 0,00600 | 0,00669 |
| 2 18 двойной | 1,69 | 1,53 | 0,00488 | 0,00381 | 0,00358 | 0,00947 | 0,00653 | 0,00619 | 0,00900 |
| 2 18 двойной | 1,70 | 1,54 | 0,01358 | 0,00108 | 0,00254 | 0,00225 | 0,00014 | 0,01362 | 0,01362 |
| 2 18 двойной | 1,69 | 1,56 | 0,00393 | 0,00153 | 0,00273 | 0,00730 | 0,00229 | 0,00422 | 0,00480 |
| 2 18 двойной | 1,70 | 1,51 | 0,00210 | 0,00481 | 0,00366 | 0,00285 | 0,00326 | 0,00525 | 0,00617 |
| 3 1 Двойной  | 0,74 | 1,02 | 0,00177 | 0,00671 | 0,00121 | 0,00300 | 0,00211 | 0,00694 | 0,00725 |
| 3 1 двойной  | 0,73 | 1,01 | 0,00147 | 0,00232 | 0,00037 | 0,00666 | 0,00352 | 0,00274 | 0,00446 |
| 3 1 двойной  | 0,71 | 0,99 | 0,00348 | 0,00079 | 0,00043 | 0,00300 | 0,00172 | 0,00357 | 0,00396 |
| 3 1 двойной  | 0,71 | 1,02 | 0,00332 | 0,00311 | 0,00472 | 0,00300 | 0,00386 | 0,00455 | 0,00596 |
| 3 1 двойной  | 0,73 | 0,98 | 0,00199 | 0,00405 | 0,00123 | 0,00300 | 0,00212 | 0,00451 | 0,00498 |
| 3 2 двойной  | 0,88 | 0,88 | 0,00042 | 0,00015 | 0,00212 | 0,00530 | 0,00159 | 0,00045 | 0,00165 |
| 3 2 двойной  | 0,87 | 0,86 | 0,00281 | 0,00529 | 0,00209 | 0,00309 | 0,00259 | 0,00600 | 0,00653 |
| 3 2 двойной  | 0,84 | 0,84 | 0,00271 | 0,00203 | 0,00303 | 0,00712 | 0,00508 | 0,00338 | 0,00610 |
| 3 2 двойной  | 0,84 | 0,88 | 0,00086 | 0,00293 | 0,00101 | 0,00425 | 0,00162 | 0,00305 | 0,00345 |
| 3 2 двойной  | 0,86 | 0,84 | 0,00633 | 0,00202 | 0,00208 | 0,00708 | 0,00458 | 0,00664 | 0,00807 |
| 3 3 двойной  | 1,03 | 0,72 | 0,00264 | 0,00309 | 0,00525 | 0,00122 | 0,00201 | 0,00406 | 0,00453 |
| 3 3 двойной  | 1,02 | 0,72 | 0,00527 | 0,00356 | 0,00768 | 0,00035 | 0,00366 | 0,00636 | 0,00734 |
| 3 3 двойной  | 1,00 | 0,70 | 0,00072 | 0,00354 | 0,00159 | 0,00438 | 0,00139 | 0,00361 | 0,00387 |
| 3 3 двойной  | 1,04 | 0,70 | 0,00017 | 0,00007 | 0,00525 | 0,00443 | 0,00041 | 0,00018 | 0,00045 |
| 3 3 двойной  | 1,00 | 0,71 | 0,00399 | 0,00581 | 0,00159 | 0,00026 | 0,00066 | 0,00705 | 0,00708 |
| 3 4 двойной  | 0,89 | 1,13 | 0,00138 | 0,00282 | 0,00185 | 0,00127 | 0,00156 | 0,00314 | 0,00351 |
| 3 4 двойной  | 0,88 | 1,12 | 0,00395 | 0,00360 | 0,00506 | 0,00535 | 0,00520 | 0,00535 | 0,00746 |
| 3 4 двойной  | 0,86 | 1,11 | 0,00579 | 0,00374 | 0,00090 | 0,00133 | 0,00111 | 0,00689 | 0,00698 |
| 3 4 двойной  | 0,85 | 1,14 | 0,00159 | 0,00681 | 0,00091 | 0,00400 | 0,00246 | 0,00700 | 0,00742 |
| 3 4 Двойной  | 0,87 | 1,09 | 0,00044 | 0,00400 | 0,00400 | 0,00269 | 0,00334 | 0,00402 | 0,00523 |
| 3 5 двойной  | 1,01 | 0,97 | 0,00282 | 0,00664 | 0,00100 | 0,00017 | 0,00041 | 0,00721 | 0,00722 |
| 3 5 двойной  | 1,00 | 0,96 | 0,00278 | 0,00077 | 0,00100 | 0,00481 | 0,00191 | 0,00289 | 0,00346 |
| 3 5 двойной  | 0,97 | 0,94 | 0,00033 | 0,00311 | 0,00366 | 0,00693 | 0,00529 | 0,00313 | 0,00615 |
| 3 5 двойной  | 0,97 | 0,99 | 0,00440 | 0,00073 | 0,00217 | 0,00019 | 0,00099 | 0,00446 | 0,00457 |
| 3 5 двойной  | 0,99 | 0,94 | 0,00461 | 0,00517 | 0,00139 | 0,00577 | 0,00358 | 0,00692 | 0,00779 |
| 3 6 двойной  | 1,14 | 0,87 | 0,00412 | 0,00077 | 0,00475 | 0,00218 | 0,00128 | 0,00419 | 0,00439 |
| 3 6 двойной  | 1,13 | 0,84 | 0,00174 | 0,00667 | 0,00200 | 0,00105 | 0,00047 | 0,00689 | 0,00691 |
| 3 6 двойной  | 1,10 | 0,83 | 0,00332 | 0,00386 | 0,00329 | 0,00601 | 0,00465 | 0,00509 | 0,00689 |
| 3 6 двойной  | 1,14 | 0,84 | 0,00052 | 0,00234 | 0,00338 | 0,00203 | 0,00067 | 0,00240 | 0,00249 |
| 3 6 двойной  | 1,10 | 0,86 | 0,00192 | 0,00087 | 0,00066 | 0,00523 | 0,00294 | 0,00210 | 0,00362 |
| 3 7 двойной  | 1,05 | 1,26 | 0,00119 | 0,00039 | 0,00452 | 0,00352 | 0,00402 | 0,00126 | 0,00421 |

продолжение приложения 3

|              |      |      |         |         |         |         |         |         |         |
|--------------|------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 3 7 двойной  | 1,04 | 1,24 | 0,00969 | 0,00280 | 0,00200 | 0,00200 | 0,00200 | 0,01009 | 0,01029 |
| 3 7 двойной  | 1,00 | 1,21 | 0,00142 | 0,00076 | 0,00684 | 0,00636 | 0,00660 | 0,00162 | 0,00680 |
| 3 7 двойной  | 1,05 | 1,21 | 0,00094 | 0,00218 | 0,00326 | 0,00638 | 0,00482 | 0,00238 | 0,00537 |
| 3 7 двойной  | 1,01 | 1,24 | 0,00113 | 0,00455 | 0,00929 | 0,00200 | 0,00565 | 0,00469 | 0,00734 |
| 3 8 двойной  | 1,15 | 1,13 | 0,00121 | 0,00492 | 0,00139 | 0,00273 | 0,00206 | 0,00507 | 0,00547 |
| 3 8 двойной  | 1,11 | 1,09 | 0,00669 | 0,00314 | 0,00534 | 0,00526 | 0,00530 | 0,00739 | 0,00909 |
| 3 8 двойной  | 1,15 | 1,09 | 0,00076 | 0,00809 | 0,00139 | 0,00132 | 0,00135 | 0,00813 | 0,00824 |
| 3 8 двойной  | 1,11 | 1,13 | 0,00078 | 0,00180 | 0,00000 | 0,00546 | 0,00273 | 0,00197 | 0,00336 |
| 3 8 двойной  | 1,15 | 1,09 | 0,00177 | 0,00726 | 0,00277 | 0,00000 | 0,00139 | 0,00747 | 0,00760 |
| 3 9 двойной  | 1,27 | 1,04 | 0,00116 | 0,00250 | 0,00105 | 0,00050 | 0,00078 | 0,00275 | 0,00286 |
| 3 9 двойной  | 1,24 | 1,03 | 0,00355 | 0,00309 | 0,00200 | 0,00419 | 0,00109 | 0,00471 | 0,00483 |
| 3 9 двойной  | 1,21 | 1,00 | 0,00467 | 0,00379 | 0,00386 | 0,00404 | 0,00395 | 0,00601 | 0,00719 |
| 3 9 двойной  | 1,22 | 1,05 | 0,00880 | 0,00491 | 0,00347 | 0,00181 | 0,00083 | 0,01008 | 0,01011 |
| 3 9 двойной  | 1,24 | 0,99 | 0,00777 | 0,00328 | 0,00249 | 0,00398 | 0,00324 | 0,00843 | 0,00903 |
| 3 10 двойной | 1,24 | 1,42 | 0,00117 | 0,00167 | 0,00449 | 0,00643 | 0,00546 | 0,00204 | 0,00583 |
| 3 10 двойной | 1,21 | 1,39 | 0,00972 | 0,00164 | 0,00300 | 0,00300 | 0,00300 | 0,00986 | 0,01030 |
| 3 10 двойной | 1,23 | 1,37 | 0,00659 | 0,00175 | 0,00448 | 0,00630 | 0,00539 | 0,00682 | 0,00869 |
| 3 10 двойной | 1,21 | 1,41 | 0,00808 | 0,00230 | 0,00155 | 0,00300 | 0,00227 | 0,00840 | 0,00870 |
| 3 10 двойной | 1,20 | 1,41 | 0,00490 | 0,00296 | 0,00876 | 0,00471 | 0,00673 | 0,00573 | 0,00884 |
| 3 11 двойной | 1,32 | 1,31 | 0,00811 | 0,00273 | 0,00459 | 0,00459 | 0,00459 | 0,00856 | 0,00971 |
| 3 11 двойной | 1,32 | 1,32 | 0,01053 | 0,00093 | 0,00141 | 0,00300 | 0,00220 | 0,01057 | 0,01080 |
| 3 11 двойной | 1,27 | 1,27 | 0,00124 | 0,00011 | 0,01066 | 0,00606 | 0,00836 | 0,00124 | 0,00845 |
| 3 11 двойной | 1,33 | 1,27 | 0,00068 | 0,00223 | 0,00140 | 0,00607 | 0,00373 | 0,00233 | 0,00440 |
| 3 11 двойной | 1,28 | 1,32 | 0,00556 | 0,00144 | 0,00915 | 0,00460 | 0,00687 | 0,00574 | 0,00896 |
| 3 12 двойной | 1,43 | 1,23 | 0,00208 | 0,00012 | 0,00227 | 0,00400 | 0,00314 | 0,00209 | 0,00377 |
| 3 12 двойной | 1,41 | 1,21 | 0,00992 | 0,00207 | 0,00400 | 0,00692 | 0,00546 | 0,01013 | 0,01151 |
| 3 12 двойной | 1,40 | 1,21 | 0,01473 | 0,00311 | 0,00105 | 0,00400 | 0,00147 | 0,01505 | 0,01512 |
| 3 12 двойной | 1,39 | 1,23 | 0,00567 | 0,00614 | 0,00104 | 0,00696 | 0,00296 | 0,00835 | 0,00886 |
| 3 12 двойной | 1,41 | 1,18 | 0,00063 | 0,00441 | 0,00740 | 0,00115 | 0,00427 | 0,00446 | 0,00618 |
| 3 13 двойной | 1,41 | 1,58 | 0,00021 | 0,00177 | 0,00600 | 0,00600 | 0,00600 | 0,00178 | 0,00626 |
| 3 13 двойной | 1,41 | 1,58 | 0,00713 | 0,00811 | 0,00261 | 0,00600 | 0,00431 | 0,01080 | 0,01163 |
| 3 13 двойной | 1,36 | 1,53 | 0,00385 | 0,00384 | 0,00928 | 0,00784 | 0,00856 | 0,00544 | 0,01014 |
| 3 13 двойной | 1,36 | 1,60 | 0,01033 | 0,00735 | 0,00056 | 0,00407 | 0,00176 | 0,01268 | 0,01280 |
| 1 13 двойной | 1,39 | 1,52 | 0,00682 | 0,00109 | 0,00934 | 0,00783 | 0,00859 | 0,00691 | 0,01102 |
| 3 14 двойной | 1,48 | 1,47 | 0,00007 | 0,00244 | 0,00400 | 0,00577 | 0,00489 | 0,00244 | 0,00546 |
| 3 14 двойной | 1,45 | 1,44 | 0,00769 | 0,00445 | 0,00575 | 0,00573 | 0,00574 | 0,00888 | 0,01058 |
| 3 14 двойной | 1,45 | 1,44 | 0,01342 | 0,00126 | 0,00050 | 0,00052 | 0,00051 | 0,01348 | 0,01349 |
| 3 14 двойной | 1,49 | 1,41 | 0,00197 | 0,00022 | 0,00041 | 0,00741 | 0,00391 | 0,00198 | 0,00439 |
| 3 14 двойной | 1,45 | 1,47 | 0,01026 | 0,00245 | 0,00300 | 0,00223 | 0,00038 | 0,01055 | 0,01055 |
| 3 16 двойной | 1,57 | 1,40 | 0,00387 | 0,00029 | 0,00010 | 0,00476 | 0,00233 | 0,00388 | 0,00453 |
| 3_15 двойной | 1,57 | 1,41 | 0,01500 | 0,00345 | 0,00389 | 0,00139 | 0,00125 | 0,01539 | 0,01544 |
| 3 15 двойной | 1,53 | 1,36 | 0,00040 | 0,00175 | 0,00538 | 0,00617 | 0,00577 | 0,00180 | 0,00605 |
| 3 15 двойной | 1,53 | 1,41 | 0,00538 | 0,00464 | 0,00200 | 0,00482 | 0,00141 | 0,00711 | 0,00724 |

продолжение приложения 3

|              |      |      |         |         |         |         |         |         |         |
|--------------|------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 3 15 двойной | 1,56 | 1,37 | 0,00965 | 0,00463 | 0,00363 | 0,00035 | 0,00164 | 0,01070 | 0,01082 |
| 3 16 двойной | 1,59 | 1,74 | 0,00925 | 0,00410 | 0,00609 | 0,00381 | 0,00495 | 0,01012 | 0,01126 |
| 3 16 двойной | 1,55 | 1,71 | 0,00065 | 0,00633 | 0,00987 | 0,01006 | 0,00996 | 0,00637 | 0,01182 |
| 3 16 двойной | 1,56 | 1,70 | 0,02227 | 0,00666 | 0,00424 | 0,00389 | 0,00407 | 0,02324 | 0,02360 |
| 3 16 двойной | 1,54 | 1,74 | 0,00566 | 0,01230 | 0,00428 | 0,00590 | 0,00509 | 0,01354 | 0,01446 |
| 3 16 двойной | 1,55 | 1,66 | 0,00783 | 0,00129 | 0,00987 | 0,01000 | 0,00994 | 0,00794 | 0,01272 |
| 3 17 двойной | 1,64 | 1,63 | 0,00190 | 0,00716 | 0,00405 | 0,00408 | 0,00406 | 0,00740 | 0,00845 |
| 3 17 двойной | 1,63 | 1,62 | 0,01309 | 0,00198 | 0,00211 | 0,00605 | 0,00408 | 0,01324 | 0,01386 |
| 3 17 двойной | 1,57 | 1,57 | 0,00144 | 0,00034 | 0,00990 | 0,00611 | 0,00800 | 0,00148 | 0,00814 |
| 3 17 двойной | 1,60 | 1,64 | 0,01735 | 0,00117 | 0,00220 | 0,00205 | 0,00213 | 0,01739 | 0,01752 |
| 3 17 двойной | 1,60 | 1,56 | 0,00895 | 0,00422 | 0,00800 | 0,00612 | 0,00706 | 0,00989 | 0,01215 |
| 3 18 двойной | 1,74 | 1,58 | 0,01053 | 0,00125 | 0,00209 | 0,00190 | 0,00010 | 0,01060 | 0,01060 |
| 3 18 двойной | 1,70 | 1,56 | 0,00911 | 0,00586 | 0,00617 | 0,00000 | 0,00308 | 0,01083 | 0,01126 |
| 3 18 двойной | 1,66 | 1,51 | 0,00573 | 0,00325 | 0,00799 | 0,00730 | 0,00765 | 0,00659 | 0,01009 |
| 3 18 двойной | 1,73 | 1,53 | 0,01295 | 0,00040 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,01296 | 0,01296 |
| 3 18 двойной | 1,68 | 1,54 | 0,00122 | 0,00260 | 0,00606 | 0,00372 | 0,00489 | 0,00287 | 0,00567 |

## ПРИЛОЖЕНИЕ И

Результаты испытаний машинного зрения в лабораторных условиях.

(+) – Успешное подведение габаритного макета в рабочую область, при котором все четыре соска макета вымени не касаются контура соска.

(-) – Подведение габаритного макета при котором наблюдается касание сосков макета вымени контура кольца.

| Номер положения | Высота расположения вымени | НОМЕР ОПЫТА                           |                       |                                       |                       |                                       |                       |                                       |                       |                                       |                       |
|-----------------|----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|
|                 |                            | 1                                     |                       | 2                                     |                       | 3                                     |                       | 4                                     |                       | 5                                     |                       |
|                 |                            | Углы камер                            | Номер удачной попытки | Углы камер                            | Номер удачной попытки | Углы камер                            | Номер удачной попытки | Углы камер                            | Номер удачной попытки | Углы камер                            | Номер удачной попытки |
| 1               | 45 см                      | $\alpha = 45^0$<br>$\beta = 45^0$     | 1<br>(+)              | $\alpha = 55,8^0$<br>$\beta = 45^0$   | 1<br>(-)              | $\alpha = 55,8^0$<br>$\beta = 48,6^0$ | 1<br>(-)              | $\alpha = 59,4^0$<br>$\beta = 52,2^0$ | 1<br>(-)              | $\alpha = 43,2^0$<br>$\beta = 41,4^0$ | 1<br>(+)              |
| 2               |                            | $\alpha = 43,2^0$<br>$\beta = 48,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 37,8^0$<br>$\beta = 48,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 37,8^0$<br>$\beta = 54^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 50,4^0$<br>$\beta = 55,8^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 50,4^0$<br>$\beta = 61,2^0$ | 1<br>(+)              |
| 3               |                            | $\alpha = 61,2^0$<br>$\beta = 48,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 64,8^0$<br>$\beta = 45^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 68,4^0$<br>$\beta = 52,2^0$ | 1<br>(-)              | $\alpha = 68,4^0$<br>$\beta = 57,6^0$ | 1<br>(-)              | $\alpha = 50,4^0$<br>$\beta = 57,6^0$ | 1<br>(-)              |
| 4               |                            | $\alpha = 50,4^0$<br>$\beta = 57,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 43,2^0$<br>$\beta = 61,2^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 41,4^0$<br>$\beta = 66,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 57,6^0$<br>$\beta = 66,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 57,6^0$<br>$\beta = 54^0$   | 1<br>(+)              |
| 5               |                            | $\alpha = 57,6^0$<br>$\beta = 54^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 63^0$<br>$\beta = 61,2^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 57,6^0$<br>$\beta = 61,2^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 72^0$<br>$\beta = 64,8^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 72^0$<br>$\beta = 52,2^0$   | 1<br>(+)              |
| 6               |                            | $\alpha = 59,4^0$<br>$\beta = 66,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 52,2^0$<br>$\beta = 70,2^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 48,6^0$<br>$\beta = 73,8^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 48,6^0$<br>$\beta = 59,4^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 63^0$<br>$\beta = 59,4^0$   | 1<br>(+)              |
| 1               | 52,5 см                    | $\alpha = 54^0$<br>$\beta = 37,8^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 45^0$<br>$\beta = 37,8^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 46,8^0$<br>$\beta = 45^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 61,2^0$<br>$\beta = 45^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 43,2^0$<br>$\beta = 30,6^0$ | 1<br>(+)              |
| 2               |                            | $\alpha = 45^0$<br>$\beta = 59,4^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 43,2^0$<br>$\beta = 61,2^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 52,2^0$<br>$\beta = 61,2^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 52,2^0$<br>$\beta = 46,8^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 30,6^0$<br>$\beta = 46,8^0$ | 1<br>(+)              |
| 3               |                            | $\alpha = 59,4^0$<br>$\beta = 46,8^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 63^0$<br>$\beta = 55,8^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 68,4^0$<br>$\beta = 59,4^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 52,2^0$<br>$\beta = 59,4^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 52,2^0$<br>$\beta = 41,4^0$ | 1<br>(+)              |
| 4               |                            | $\alpha = 52,2^0$<br>$\beta = 59,4^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 41,4^0$<br>$\beta = 55,8^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 41,4^0$<br>$\beta = 66,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 59,4^0$<br>$\beta = 68,4^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 59,4^0$<br>$\beta = 52,2^0$ | 1<br>(+)              |
| 5               |                            | $\alpha = 64,8^0$<br>$\beta = 52,2^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 70,2^0$<br>$\beta = 61,2^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 73,8^0$<br>$\beta = 63^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 61,2^0$<br>$\beta = 63^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 61,2^0$<br>$\beta = 46,8^0$ | 1<br>(+)              |
| 6               |                            | $\alpha = 59,4^0$<br>$\beta = 64,8^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 63^0$<br>$\beta = 72^0$     | 1<br>(+)              | $\alpha = 48,6^0$<br>$\beta = 72^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 48,6^0$<br>$\beta = 57,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 48,6^0$<br>$\beta = 73,8^0$ | 1<br>(+)              |
| 1               | 60 см                      | $\alpha = 48,6^0$<br>$\beta = 41,4^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 52,2^0$<br>$\beta = 46,8^0$ | 2<br>(+)              | $\alpha = 61,2^0$<br>$\beta = 48,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 61,2^0$<br>$\beta = 32,4^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 43,2^0$<br>$\beta = 30,6^0$ | 1<br>(+)              |
| 2               |                            | $\alpha = 43,2^0$<br>$\beta = 50,4^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 46,8^0$<br>$\beta = 54^0$   | 2<br>(+)              | $\alpha = 30,6^0$<br>$\beta = 54^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 30,6^0$<br>$\beta = 43,2^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 46,8^0$<br>$\beta = 43,2^0$ | 1<br>(+)              |
| 3               |                            | $\alpha = 57,6^0$<br>$\beta = 48,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 50,4^0$<br>$\beta = 43,2^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 64,8^0$<br>$\beta = 41,4^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 64,8^0$<br>$\beta = 54^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 54^0$<br>$\beta = 54^0$     | 1<br>(+)              |
| 4               |                            | $\alpha = 46,8^0$<br>$\beta = 59,4^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 54^0$<br>$\beta = 55,8^0$   | 2<br>(+)              | $\alpha = 39,6^0$<br>$\beta = 55,8^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 39,6^0$<br>$\beta = 66,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 54^0$<br>$\beta = 66,6^0$   | 1<br>(+)              |
| 5               |                            | $\alpha = 64,8^0$<br>$\beta = 57,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 70,2^0$<br>$\beta = 61,2^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 59,4^0$<br>$\beta = 63^0$   | 1<br>(+)              | $\alpha = 57,6^0$<br>$\beta = 48,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 70,2^0$<br>$\beta = 48,6^0$ | 1<br>(+)              |
| 6               |                            | $\alpha = 55,8^0$<br>$\beta = 68,4^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 48,6^0$<br>$\beta = 61,2^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 61,2^0$<br>$\beta = 57,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 46,8^0$<br>$\beta = 57,6^0$ | 1<br>(+)              | $\alpha = 46,8^0$<br>$\beta = 73,8^0$ | 1<br>(+)              |

## ПРИЛОЖЕНИЕ К

### Акт производственных испытаний

УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель генерального директора

ООО «Бычок-1»



Логинов М.Е.

#### Акт

о проведении производственных испытаний системы машинного зрения  
роботизированной установки преддоильной подготовки вымени

Комиссия в составе от сельскохозяйственного предприятия ООО «Бычок-1»  
– Логинов М.Е. – заместитель генерального директора,

от ФГБОУ ВО Верхневолжский ГАУ – Муханов Н.В., – к.т.н., доцент, декан инженерно-экономического факультета, Абалихин А.М. – к.т.н., доцент кафедры технического сервиса и механики, Крупин А.А. – к.т.н., доцент кафедры технических систем в агробизнесе, Барабанов Д.В. – научный сотрудник научно-исследовательского управления, соискатель ученой степени кандидата технических наук ФГБОУ ВО СПбГАУ,

от ФГБОУ ВО СПбГАУ – Керимов М.А. – д.т.н., профессор кафедры технических систем в агробизнесе,

составили настоящий акт о том, что 20 июля 2023 года на базе сельскохозяйственного предприятия ООО «Бычок-1» были проведены испытания системы позиционирования роботизированной установки преддоильной подготовки вымени коров, разрабатываемой в рамках диссертационного исследования Барабанова Д.В. Исследования проведены с использованием лабораторной установки, включающей полногабаритный станок для животных, манипулятор и систему машинного зрения с блоком управления. Лабораторная

установка была установлена в коровнике предприятия, где содержатся коровы голштинизированной чёрно-пёстрой породы в количестве 200 голов. Для проведения испытаний была отобрана группа коров с различными параметрами вымени. Каждое животное помещалось в станок лабораторной установки, после чего при помощи машинного зрения определялось положение сосков вымени в пространстве, а правильность определения координат проверялась подведением в расчётную область манипулятором габаритного макета рабочего органа.

При проведении испытаний, в 78% случаев определения координат сосков вымени коров, манипулятор успешно выполнил подведение габаритного макета рабочего органа. При этом неудачные попытки определения координат и подведения макета были связаны с несовершенством конструкции станка лабораторной установки и электроники блока управления, а также с непрекращающимися перемещениями животного в станке.

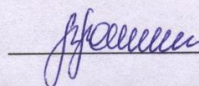
Проведенные испытания позволили сформулировать следующие основные выводы:

1. машинное зрение, построенное на базе двух 2D видеокамер, можно использовать для определения координат сосков вымени коров с целью проведения подготовительных операций перед доением;
2. данная система машинного зрения обеспечивает подведение манипулятора в рабочую область и может быть использована в разрабатываемой роботизированной установке преддоильной подготовки вымени;
3. определенное положение камер позволяет отслеживать положение сосков вымени и определять их координаты при любом положении коровы в станке установленных размеров.

Проведенные испытания в производственных условиях позволили выявить положительные и отрицательные стороны разрабатываемой системы позиционирования для роботизированной установки преддоильной подготовки вымени. Их анализ приведен в диссертации.

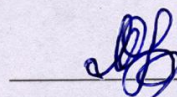
Заместитель генерального директора

ООО «Бычок-1»



Логинов М.Е.

д.т.н., профессор кафедры  
технических систем в агробизнесе  
ФГБОУ ВО СПбГАУ



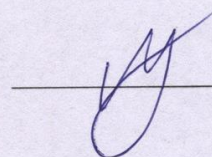
Керимов М.А.

к.т.н., доцент, декан инженерно-  
экономического факультета  
ФГБОУ ВО Верхневолжский ГАУ



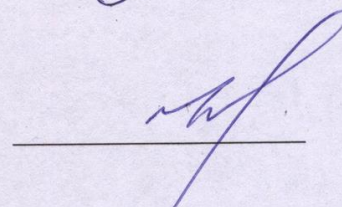
Муханов Н.В.

к.т.н., доцент кафедры технического  
сервиса и механики  
ФГБОУ ВО Верхневолжский ГАУ



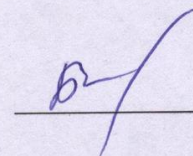
Абалихин А.М.

к.т.н., доцент кафедры технических  
систем в агробизнесе  
ФГБОУ ВО Верхневолжский ГАУ



Крупин А.В.

Научный сотрудник научно-  
исследовательского управления  
ФГБОУ ВО Верхневолжский ГАУ  
(соискатель учёной степени  
кандидата технических наук  
ФГБОУ ВО СПбГАУ)



Барабанов Д.В.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Расчет экономической эффективности применения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени.

1. Количество доек в год (формула (5.8)):

$$G_{год} = 365 \cdot 800 \cdot 2 = 584000 \text{ доек.}$$

2. Удельные капитальные затраты в капитальные фонды (формула 5.6 и 5.7)

а) Доильная установка с роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени:

$$K_{C \text{ РУППВ}} = \frac{43000000}{584000} = 73,63 \frac{\text{руб.} \cdot \text{год}}{\text{дойка}}.$$

б) Доильная установка без роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени:

$$K_{БЕЗ \text{ РУППВ}} = \frac{40000000}{584000} = 68,49 \frac{\text{руб.} \cdot \text{год}}{\text{дойка}}.$$

3. Величина разности затрат на амортизацию в случаях использования доильной установки с роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени и без нее (формула (5.21)):

$$\Delta S_A = \frac{10}{100} \cdot (43000000 - 40000000) = 300000 \text{ руб.}$$

4. Величина разности затрат на амортизацию в случаях использования доильной установки с роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени и без нее (формула (5.22)):

$$\Delta S_{TOP} = \frac{12,5}{100} \cdot (43000000 - 40000000) = 375000 \text{ руб.}$$

5. Величина дополнительных затрат на расходные материалы, возникающих при использовании доильной установки с роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени и без нее (формула (5.23)):

$$\Delta S_M = 584000 \cdot 0,005 \cdot 30 = 87600 \text{ руб.}$$

6. Величина дополнительных затрат на электроэнергию, возникающих при использовании доильной установки с роботизированной установкой преддоильной подготовки вымени и без нее (формула (5.24)):

$$\Delta S_{\text{э}} = \frac{4,5 \cdot 30}{3600} \cdot 584000 \cdot 10,2 = 223380 \text{ руб.}$$

**7.** Разница в затратах на дойку одной коровы проводимой на доильной установке с использованием роботизированной установки преддоильной подготовки вымени и без неё (формула (5.16))

$$З_{С \text{ РУППВ}} - З_{БЕЗ \text{ РУППВ}} = 300000 + 375000 + 87600 + 223380 = 985980 \text{ руб.}$$

**8.** Себестоимости дойки одной коровы для доильной установки с использованием роботизированной установки преддоильной подготовки вымени (формула (5.9)):

$$C_{С \text{ РУППВ}} = \frac{(8,9+1) \cdot 300 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 1,25 \cdot 1,302}{800 \cdot 2} = 7,25 \text{ руб.}$$

**9.** Себестоимости дойки одной коровы для доильной установки без использованием роботизированной установки преддоильной подготовки вымени (формула (5.10)):

$$C_{БЕЗ \text{ РУППВ}} = \frac{(9,1+1) \cdot 300 \cdot 3 \cdot 1,2 \cdot 1,25 \cdot 1,302}{800 \cdot 2} = 11,1 \text{ руб.}$$

**10.** Годовой экономический эффект от снижения затрат ручного труда (формула (5.5)).

$$\text{Э}_{\text{год}} = ((11,1+0,1 \cdot 68,49) - (7,25+0,1 \cdot 73,63)) \cdot 584000 - 985980 = 962244 \text{ руб.}$$