

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

На правах рукописи

Хакимов Артем Рустамович

**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА
ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА КАЧЕСТВА МОЛОКА В ПРОЦЕССЕ ДОЕНИЯ**

**Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса**

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
Павкин Дмитрий Юрьевич

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА МОЛОКА	11
1.1 Анализ технологий, обеспечивающих анализ компонентов молока.....	11
1.2 Технические средства и технологии для анализа параметров качества молока.....	14
1.3 Исследование скорости молокоотдачи и длительности доения машинным способом у животных с различным физиологическим состоянием	24
Выводы по главе 1	32
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА МОЛОКОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ УСТРОЙСТВА ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА КАЧЕСТВА МОЛОКА.....	34
2.1 Обоснование основных принципов конструкции устройства экспресс- анализа качества молока в процессе доения	34
2.2 Разработка математической модели протекания потока молоковоздушной смеси в молочном шланге доильной системы и измерительной камере устройства	37
2.3 Имитационное моделирование гидродинамических параметров потока молоковоздушной смеси, протекающей в молочном шланге доильной системы и измерительной камере разрабатываемого устройства	46
2.4 Обоснование методики расчета параметров качества молока устройством экспресс-анализа качества молока в процессе доения	54
2.5 Разработка алгоритма работы устройства экспресс-анализа качества молока в составе доильной системы.....	62

2.6 Разработка устройства экспресс-анализа качества молока в процессе доения.....	64
---	----

Выводы по главе 2.....	70
------------------------	----

ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ УСТРОЙСТВА ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА КАЧЕСТВА МОЛОКА.....	72
--	-----------

3.1 Разработка аппаратно-измерительного стенда для исследования работы устройства экспресс-анализа качества молока в потоке молоковоздушной смеси	73
---	----

3.2 Разработка методики проведения лабораторного исследования работоспособности устройства экспресс-анализа качества молока для анализа процентной концентрации жира в потоке молоковоздушной смеси	76
---	----

3.3 Разработка методики проведения исследований по определению устройством экспресс-анализа качества молока процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси.....	77
---	----

3.4 Разработка методики проведения натурного эксперимента по определению устройством экспресс-анализа качества молока процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси	79
--	----

Выводы по главе 3	81
-------------------------	----

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ..	82
---	-----------

4.1 Результаты экспериментального исследования работоспособности устройства для измерения процентной концентрации жира в потоке молоковоздушной смеси.....	82
--	----

4.2 Результаты лабораторного исследования точности измерения процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси	84
---	----

4.3 Результаты натурного эксперимента по определению устройством экспресс-анализа качества молока процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси	87
Выводы по главе 4	89
ГЛАВА 5. ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО УСТРОЙСТВА ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА КАЧЕСТВА МОЛОКА.....	91
5.1 Расчет себестоимости устройства экспресс-анализа качества молока ...	91
5.2 Расчет окупаемости устройства экспресс-анализа качества молока	92
Выводы по главе 5	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство ЭВМ на алгоритм управления устройством	112
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на изобретение	113
ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство ЭВМ на обработку результатов измерений	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Электрическая схема устройства.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Результаты лабораторного исследования устройства .	116
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Результаты натурного исследования устройства	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Акт натурных испытаний	124

ВВЕДЕНИЕ

Молоко является важным продуктом массового потребления с постоянно растущим объемом производства. Требования к качеству молока регулируются государством [1]. Российское производство молока выросло с 30,5 млн тонн в 2015 году до 33,5 млн тонн в 2023 году [2], [3]. Потребление молока и молочных продуктов в России достигло 272 кг в год, однако этого недостаточно для соответствия норме в 325 кг в год, установленной Минздравом [4].

Рост потребления продукции требует повышения качества производимого молока за счёт совершенствования методов экспресс-контроля его параметров, а также оснащённости молочных ферм средствами автоматизации производства. Современные фермы используют новые решения, такие как роботизированные доильные системы, устройства контроля кормового стола, автоматические кормушки и т.д. В России существует проблема с низким качеством сырого молока [5], [6]. Для обеспечения контроля качества продукции хозяйствам необходимо использовать высокотехнологичные устройства экспресс-анализа и заменять устаревшие методы.

Существует множество методов и устройств анализа качества молока, но сам процесс в большинстве случаев включает в себя отбор проб, их подготовку и только затем анализ, что не позволяет обеспечивать проведение экспресс-анализа в процессе доения [7]. Его важнейшим преимуществом является контроль качества продукции в режиме реального времени, обеспечивающий недопущение попадания некачественного молока в молочный танк, а также возможность сортировки молока по уровню жирности. Поточный контроль качества молока позволит увеличить выход молока повышенной жирности, что снизит зависимость от импорта, а также проводить оценку генетического потенциала коров, повышая эффективность работы племенных производств [8].

Использование экспресс-анализа качества молока в процессе доения оптимально для работы с доильными роботами благодаря возможности встраиваться в автоматизированный процесс доения, и, в перспективе, обеспечивать почетвертной анализ. Доильные роботы являются приоритетной, но

не единственной платформой внедрения поточного экспресс-анализа качества молока, поскольку реализуемо применение в существующих широко распространенных автоматизированных доильных системах.

Разработка устройства на основе бесконтактной технологии, позволяющего проводить поточный экспресс-анализ качества молока в процессе доения и осуществлять сбор результатов по каждому животному является актуальной для молочного животноводства.

Степень разработанности темы

Способы оценки параметров качества молока активно развивались с 19 века. До этого проводился только органолептический анализ и качество оценивалось на основе эмпирического опыта. В 1891 году появился метод Гербера (кислотный метод) – химический метод определения жира в молоке. В 1883 году появился метод Кьельдаля – химический метод определения белка в молоке. Сейчас эти методы используют в качестве эталонных. В начале 60-х годов появились первые приборы, использующие инфракрасную спектроскопию для анализа параметров качества молока. В конце 60-х годов появились первые кондуктометрические детекторы (оценка электропроводности молока инвазивным методом), сейчас они иногда используются для косвенного определения концентрации соматических клеток. В 80-х годах стали появляться первые устройства для ультразвукового анализа. В начале 21 века основным направлением развития стал экспресс-анализ параметров качества молока, обеспечивающий максимально быстрое выявление отклонений в молоке.

Разработкой механизированных, автоматизированных и роботизированных технологий для молочного животноводства, обеспечивающих производство и контроль качества продукции занимается множество ученых и институтов по всему миру. Среди российских ученых вопросами анализа качества молока занимались Забродина О.Б., Винников И.К., Краснов Н.А., Цой Ю.А., Кирсанов В.В., Богомолов А.Ю., Мелентьева А.А., Беляков М.В., Самарин Г.Н., Гудков С.В., Шкирин А.В. и др. Среди зарубежных ученых этой темой занимались Melfsen A., Coppa M., Baines J., Aernouts B., Evangelista C. и др. Были разработаны

применимые на практике технологии и технические средства экспресс-анализа качества проб молока как по основным (процентное содержание жира, белка, сухого обезжиренного молочного остатка (СОМО), содержания воды, плотности, точки замерзания), так и вторичным параметрам, ученые научились определять концентрацию соматических клеток и наличие крови в молоке.

После анализа работ вышеназванных авторов сделан вывод о недостаточно исследованном вопросе применения поточных устройств анализа качества молока в автоматизированных и роботизированных доильных установках. Для широкого народно-хозяйственного использования необходимо обеспечить решение следующих проблем:

- поточный анализ основных параметров молока на ферме в процессе доения;
- сбор и обработка результатов по каждому животному в режиме реального времени.

Объект исследования – рабочий процесс экспресс анализа качества молока в молоковоздушной смеси, протекающей турбулентным потоком.

Предмет исследования – устройство, осуществляющее поточный анализ качества молока в турбулентном потоке молоковоздушной смеси.

Цель исследования – повышение эффективности анализа качества молока для поточного мониторинга процесса доения.

Задачи исследования:

1. Выполнить литературный анализ современных технологий и технических средств анализа параметров качества молока.
2. Выполнить математическое и имитационное моделирование протекания потока молоковоздушной смеси в молочном шланге доильной системы и измерительной камере разрабатываемого устройства.
3. Обосновать конструкцию и разработать устройство экспресс-анализа качества молока, интегрируемое в доильную систему.
4. Разработать программу и методику исследования устройства экспресс-анализа качества молока.

5. Выполнить экспериментальное исследование работы устройства для экспресс-анализа качества молока в процессе доения.

6. Оценить технико-экономическую эффективность внедрения разработанного устройства.

Научная новизна исследования:

1. Математическая и имитационная модели протекания потока молоковоздушной смеси в молочном шланге доильной системы, модернизированной устройством экспресс-анализа качества молока.

2. Алгоритм работы устройства экспресс-анализа качества молока в процессе доения.

3. Метод определения процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в процессе доения на основе явления светорассеяния в молоке.

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке математической и имитационной модели протекания потока молоковоздушной смеси в молочном шланге доильной системы, модернизированной устройством экспресс-анализа качества молока и исследовании влияния изменения качественных параметров потока молоковоздушной смеси на явление светорассеяния в молоке.

Практическая значимость исследования заключается в разработанном устройстве экспресс-анализа качества молока, обеспечивающим поточный мониторинг качества молока. Новизна подтверждается патентом на изобретение № 2790807 и свидетельством ЭВМ № 2023687820 от 18.12.2023, Актом натурных испытаний по апробации в производственных условиях молочной фермы ФГБУ ОПЫТНАЯ СТАНЦИЯ «СНЕГИРИ».

Методология и методы исследования.

Исследования проводились с использованием теории планирования эксперимента, математической обработки данных и компьютерного моделирования (Kompas-3D, SolidWorks, MS Excel, MS Word и др.). В работе

использована современная измерительная аппаратура, вычислительная техника, стендовое оборудование для исследования: стенд имитации доильной системы, промышленный прободанализатор качества молока, программируемый логический контроллер.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая и имитационная модель протекания потока молоковоздушной смеси в измерительной камере разработанного устройства и молочном шланге доильной системы, модернизированной устройством экспресс-анализа качества молока в процессе доения.
2. Алгоритм работы устройства экспресс-анализа качества молока в процессе доения в составе модернизированной доильной системы.
3. Метод определения процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в процессе доения на основе явления светорассеяния в молоке.

Степень достоверности результатов работы.

Достоверность результатов исследования обосновывается достаточным количеством наблюдений и современными методами исследования, соответствующими цели и задачам научной работы. Сформулированные в исследовании научные положения, выводы и практические рекомендации основаны на фактических данных, продемонстрированных в приведенных таблицах и рисунках. Статистический анализ и интерпретация полученных результатов проведены с использованием современных методов обработки информации. Результаты исследования были представлены в рецензируемых научных изданиях и на международных конференциях. Разработанное устройство экспресс-анализа качества молока прошло лабораторные испытания в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Прототип устройства экспресс-анализа качества молока прошел апробацию в производственных условиях ФГБУ ОПЫТНАЯ СТАНЦИЯ «СНЕГИРИ».

Апробация результатов работы.

Промежуточные этапы диссертации были представлены на 4 научных конференциях в 2021-2023 годах:

1. Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Агробιοинженерные инновации в сельском хозяйстве», 2021.
2. Международная научно-практическая конференция «Агроэкологическая безопасность, энергоэффективные спектральные и лазерные технологии в повышении продуктивности сельского хозяйства», 2021.
3. VI Всероссийская конференция «Физика водных растворов», 2023.
4. XXVII Международная научно-практическая конференция (online-формат) «Инновационная техника и цифровые технологии в животноводстве», 2023.

Исследования и эксперименты, проведенные при работе над данной диссертацией, стали основой для выполнения научного гранта в рамках программы Фонда содействия инновациям У.М.Н.И.К.

По материалам диссертации были опубликованы 12 научных работ, в том числе 4 работы в международной базе цитирования (WoS), 4 работы в журналах входящих в Перечень ВАК, опубликована монография, зарегистрированы 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, получен патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, основной части из пяти глав, заключения, списка литературы, 7 приложений, изложена на 125 страницах печатного текста, содержит 33 рисунка, 4 таблицы, список литературы из 94 наименований источников литературы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА МОЛОКА

1.1 Анализ технологий, обеспечивающих анализ компонентов молока

Молоко – это сложная полидисперсная жидкость, содержащая множество компонентов. Основные компоненты в составе могут сильно отличаться в зависимости от индивидуальных физиологических особенностей животного. Также на содержание компонентов молока влияет сезон, период лактации, порода и условия содержания. Коровье молоко содержит 4,7-4,9% лактозы; 3,6-4,2% жира в виде глобул; примерно 3,4% белка [9]–[11]. Истинный белок в молоке составляет 95%, небелковый азот составляет оставшиеся 5%. При этом, небелковый азот имеет значительное содержание в мочеvine молока (30-35%), креатинине мочевой кислоты (25%), аминокислотах (15%) и аммиаке (10-30%). Молоко также содержит минералы в виде солей, также известных как зола (~ 0,7%), основными анионами которых являются хлорид, фосфат и цитрат, а катионами - натрий, кальций и магний. Молоко содержит комплекс жирорастворимых (А, D, Е, К) и водорастворимых (В, С) витаминов [12]. Основные процентные параметры, представляющие типичный состав сырого коровьего молока представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Компоненты сырого коровьего молока

Компонент	Процентное содержание в составе молока, %
Вода	85,5 – 89,5
Жир	2,5 – 6,0
Белок	2,9 – 5,0
Лактоза	3,6 – 5,5
Минералы	0,6 – 0,9
Мочевина	<1%

Основные определяемые современными анализаторами параметры качества молока:

1. Массовая доля жира, %;
2. Массовая доля белка, %;
3. Массовая доля сухих веществ, %;
4. Массовая доля лактозы, %;
5. Массовая доля СОМО, %
6. Концентрация соматических клеток, тыс/см³;
7. Массовая доля плотности, %;
8. Массовая доля добавленной воды, %;
9. Температура молока, °С;

Информация о параметрах качества молока позволяет проводить мониторинг и эффективное управления молочным стадом. Жир и белок в молоке напрямую связаны с потреблением энергии, физической структурой и сырой клетчаткой в рационе. Соотношение между жиром и белком в молоке является индикатором физиологического состояния животных. Пропорция жир-белок в молоке в диапазоне между 1,2 и 1,4 является оптимумом и подразумевает положительный энергетический баланс, отличающиеся соотношения прознаются как индекс отрицательного энергетического баланса или субклинического кетоза, соответственно [13]–[15].

Оценить баланс между поступлением энергии и концентрацией белка в рационе можно измерив белки и мочевины [16]. Мочевина также является индикатором диетического контроля и этот параметр используют диетологи для контроля и оптимизации белкового питания КРС.

В соответствии с Федеральным законом от 12 июня 2008 г. № 88-ФЗ «Технический регламент на молоко и молочную продукцию» и Федеральным законом от 22 июля 2010 г. № 163-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Технический регламент на молоко и молочную продукцию» содержание соматических клеток в молоке высшего сорта не должно превышать $4 \cdot 10^5$ клеток в 1 см³, а в молоке первого и второго сортов – $1 \cdot 10^6$ клеток в 1 см³. Знание

концентрации соматических клеток (SCC) позволяет получить информацию о здоровье и функциональности молочной железы, а также о технологическом качестве молока.

Большинство ученых и ветеринаров называют физиологической нормой содержание в молоке соматических клеток как диапазон [100...500] тысяч клеток в миллилитре, но конкретное число зависит санитарных требований к сорту молока, породы молочного животного и заключения ветеринара для конкретного животного [17]. В большинстве случаев нормой называют менее 200 тысяч клеток. Если в молоке выросло количество соматических клеток, то это является однозначным признаком заболевания [18]. Проблема раннего выявления мастита стоит достаточно остро в современной молочной промышленности.

Знание точных параметров молока также позволяет не допустить микробного заражения и преднамеренной фальсификации молока и молочных продуктов.

Регулярный анализ состава молока коров на ферме позволяет создавать базу данных с информацией о свойствах молока каждой коровы, что поможет эффективной сортировке молока на производстве и снижению потерь продукции.

Молоко в среднем на 88% состоит из воды, что отводит всего около 12% процентов остальным веществам. Высокая концентрация воды обуславливает появление ярко выраженных полос в БИК-диапазоне 960, 1440, 1950 и 2076 нм, которые перекрываются с некоторыми полосами компонентов молока [19],[20]. Гомогенизация позволяет повысить точность анализа молока и часто для этого применяется [21]. Для поточного анализа качества молока технология неприменима.

Анализ сырого коровьего молока возможно проводить и в режиме отражения, и в режиме поглощения. Анализ молока с использованием спектроскопии пропускания подразумевает диапазон длин волн 1100...2500 нм. При этом для проведения анализа методом спектроскопии пропускания требуется наличие минимального оптического пути в 0,5-1 мм [22], [23]. В научных работах сравнивали спектроскопию отражения с спектроскопией пропускания в видимом

и ближнем инфракрасном диапазоне для анализа таких параметров молока, как жир, белок и лактоза, также возможно определение мочевины в молоке. Было определено, что спектроскопия отражения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне позволяет проводить анализ содержания жира и белка в сыром молоке, но не лактозы [24]. В тоже время спектроскопия пропускания позволила точно определить содержание жира, сырого белка и лактозы [25].

Уровень жирности молока в процессе доения не является стабильной величиной и резко меняется в начале и конце доения.

Известно, что если в разовом удое содержание жира равно 4,03%, то цистернальное молоко должно быть жирностью 2,58%, а альвеолярное - 5,58%. Первые струйки молока, полученные ручным сдаиванием, содержат минимальное количество жира в 1,30 %, в то время как в остаточном молоке жирности 8,88 % [26].

Из литературы известно, что последние порции альвеолярного молока обладают жирностью 15-20%, а первые порции цистернального молока 0,8%-1,5%, поэтому необходимо наиболее полно выдаивать вымя для получения молока высокого качества [27].

Литературный анализ показал, что молоко является сложной для полного анализа полидисперсной жидкостью. В следующем подразделе рассмотрены современные технические средства и технологии для экспресс-анализа параметров качества молока.

1.2 Технические средства и технологии для анализа параметров качества молока

Состав молока и его питательные характеристики необходимо определять в процессе доения для оперативного контроля качества продукции и избежания попадания некачественной продукции к потребителям. В молоке основными компонентами считаются жир и белок. Отношение жира к белку и их массовая доля содержание в молоке используют для определения его качества и пищевой

ценности. Эти показатели также определяют подходит ли кормовой рацион для животных и каково их физиологическое состояние.

Массовые доли жира и общего белка, а также концентрация соматических клеток являются основополагающими факторами определения товарной стоимости молока [28]. Поэтому контроль массовой доли жира и общего белка должен регулярно проводиться на каждом молочном предприятии.

Возможность сортировать молоко по уровню жирности позволит фермеру лучше контролировать качество производства и увеличить прибыль, не смешивая молоко с различной жирностью. Определение концентрации соматических клеток также необходимо, поскольку превышение этого значения вредно для человека и показывает, что молочные животные болеют. Необходимость отбраковки молока с превышением концентрации соматических клеток неоспорима и интеграция устройства, позволяющего это делать процессе доения, улучшит качество производимого молока.

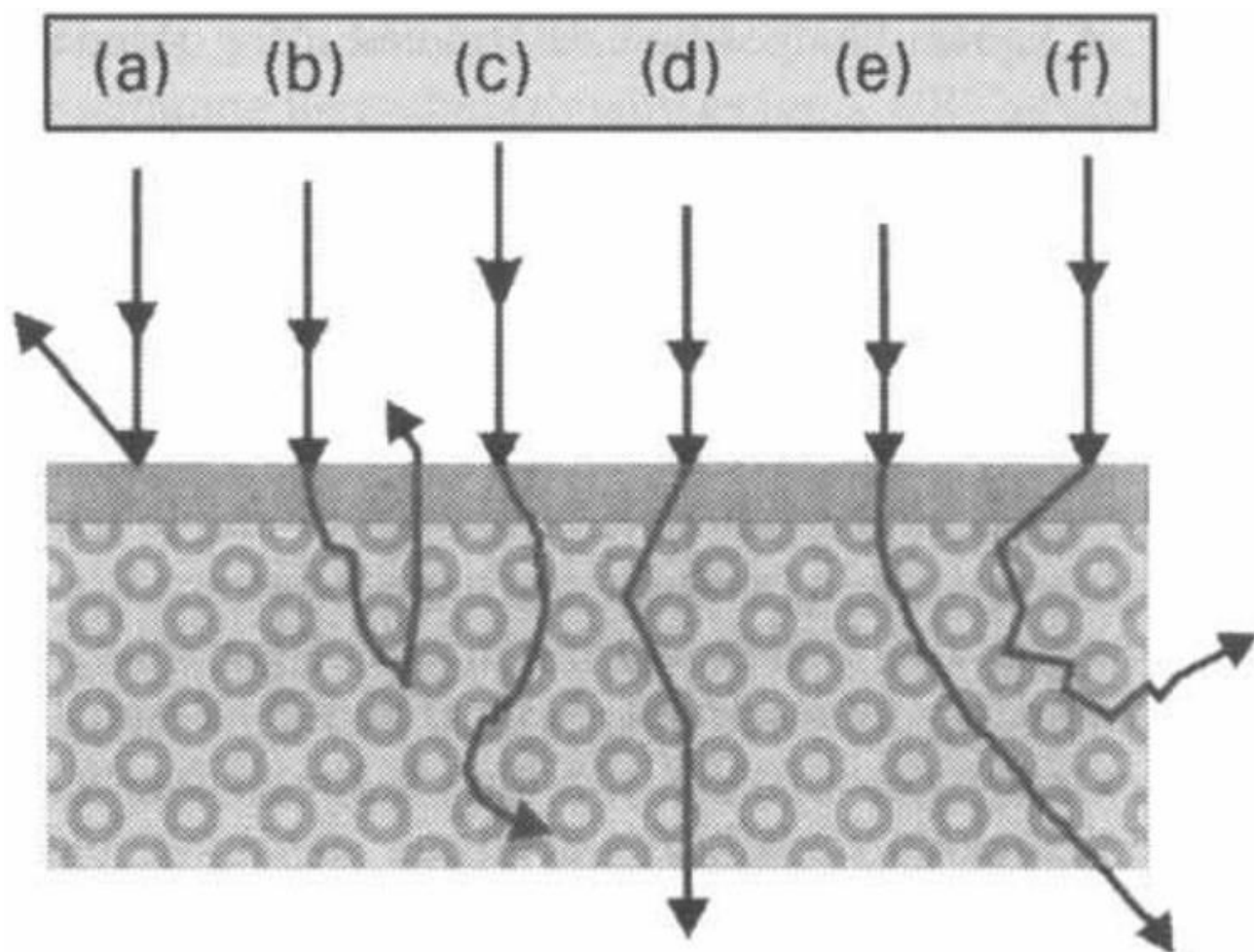
С годами методы экспресс-анализа пришли к тому, чтобы дополнить или заменить существующие методы оценки молока и молочных продуктов. Применение химических методов анализа качества молока является слишком длительным для оценки качества на молочно-товарной ферме. Но благодаря высокой точности химические методы применимы для эталонного определения качества молока на молочных заводах и для калибровки приборов. Современные приборы для экспресс-оценки качества молока используют сразу несколько различных технологий, но наиболее распространенными являются ультразвуковые и оптические.

Все анализаторы молока, использующиеся в лабораториях для точного анализа качества молока, являются стационарными и требуют подготовки пробы молока перед проведением анализа. Это увеличивает затрачиваемое время на получение результатов анализа качества молока (помимо доставки молока в лабораторию, которая зачастую находится за пределами территории молочной фермы). Необходимость подготовки пробы и использования реагентов,

консервации или замораживания пробы требует обучения специалиста, а также исключает получение информации о качестве производимого молока сразу после доения. Применение спектральных анализаторов качества молока позволит решить эти проблемы и реализовать оперативное получение информации о параметрах надаиваемого молока. Современные оптические методы анализа состава молока – это измерение оптической плотности, метод люминесцентной спектроскопии, методы анализа светорассеяния, а также метод инфракрасной спектроскопии [29], [30].

Применение БИК-спектроскопии (ближний инфракрасный диапазон) в молочной промышленности привело к повышению качества анализа параметров молока [31]. БИК-спектроскопия применима на молочной ферме в системах умного животноводства. Это может быть экономически жизнеспособная система, обеспечивающая правильное количество дневных питательных веществ с меньшим количеством метаболических изменений, стремясь к высокой эффективности использования корма и высокого качества производимого молока.

БИК-спектроскопия - это широко используемый спектроскопический метод в молочной промышленности, использующий ближнюю инфракрасную область (интервал длин волн 800–2500 нм) электромагнитного спектра путем излучения ближнего инфракрасного света заранее известной интенсивности на исследуемый объект или вещество, а затем измерения интенсивности отраженного или прошедшего излучения. Спектроскопия в ближней инфракрасной области является мультианалитическим методом, который позволяет прогнозировать несколько параметров одновременно с хорошей точностью. Одним из наиболее перспективных типов спектроскопии является рассеяние благодаря возможности отдельно рассматривать исходящее и рассеянное излучение. При этом взаимодействие света с изучаемой средой бывает 6 видов, как представлено на рисунке 1.1 [32]:



а - зеркальное отражение, б - диффузное отражение, с – поглощение, d – пропускание, е – преломление, f - рассеяние

Рисунок 1.1 – Типы взаимодействия света с изучаемой средой

Этот метод является быстрым, неразрушающим, точным и экономичным по сравнению с другими лабораторными методами [33]. В одном из актуальных литературных обзоров сообщалось о широком спектре сельскохозяйственных применений БИК-спектроскопии [34].

В зависимости от исследуемого образца метод БИК и ИКС может применяться в 2 режимах: поглощение (пропускание) и отражение. При измерении пропускания детектор размещается за исследуемым образцом, который освещается источником ИК-излучения. Образец должен быть частично прозрачным, поэтому такой тип анализа иногда невозможен с массивными и оптически непрозрачными образцами [35].

Спектроскопия поглощения отличается высокой скоростью анализа и высокой чувствительностью, реализует качественный и количественный состав молока. Расположение полос поглощения в полученном спектре несет информацию о качественном составе образца, а интенсивность полос - о концентрации соответствующего компонента [36]. Оптическая спектроскопия в ближнем и дальнем инфракрасном диапазоне позволяет идентифицировать колебательные переходы и охватывает диапазон от 2500 до 50,000 нм [37], [38]. Все молекулы, содержащие атом водорода, имеют измеряемый спектр в ближней ИК-области, что способствует тому, что более широкий спектр органических материалов подходит для анализа в ближнем ИК-диапазоне, чем для анализа в среднем ИК-диапазоне [39]. Также популярна спектроскопия с преобразованием Фурье благодаря многокомпонентному анализу вещества (преимущественной полидисперсных жидкостей) [40].

Существенной проблемой при анализе сырого молока является агрегация жировых глобул и белковых мицелл, которые не позволяют оценить вещество вследствие рассеяния [41]. Присутствие воды в молоке, а также наличие микро- и макропузырьков газов усложняет БИК-спектроскопический анализ, что также снижает точность анализа молока [42].

На качество молока может влиять не только условия содержания, но и время суток. Это влияние было изучено в исследовании состава дневного и ночного молока дойных коров [43]. Средне-инфракрасная спектроскопия использовалась для анализа содержания макроэлементов в молоке. Результаты показывают, что состав ночного молока значительно отличается от дневного. Заметные изменения в циркадном ритме также изменили состав молока. Эти результаты предоставляют доказательства в поддержку стратегического использования и классификации дневного и ночного молока.

Проводились исследования по оценке влияния гомогенизации молока на точность анализа в среднем инфракрасном диапазоне для определения жира, истинного белка и безводной лактозы с помощью традиционного фильтра и моделей прогнозирования методом частичных наименьших квадратов [21]. В

исследовании рассматривали пять гомогенизаторов с различными характеристиками гомогенизации, основанными на анализе размера частиц с помощью рассеяния лазерного света. Сравнение проводилось путем проведения 17 последовательных измерений молока, гомогенизированного извне для прибора (т. е. контроля), и негомогенизированного молока. На прогнозы компонентов молока для внешнего гомогенизатора влияли различия в производительности гомогенизатора, но величина эффекта была небольшой (т. е. $<0,025\%$), когда молоко прокачивалось как через эффективные, так и через неэффективные гомогенизаторы в анализаторе молока MIR. Различия в производительности гомогенизаторов оказали незначительное воздействие на точность, основное влияние гомогенизация оказала на точность анализа жира, при этом на определение лактозы оказало незначительное влияние.

Важно определять состав молока в реальном времени, это можно использовать для гарантии качества и безопасности молока, предлагая дополнительную информацию производителям и потребителям молочных продуктов [44]. Компактные и мобильные устройства для проведения анализов «на месте» имеют большой потенциал. В работе были использованы несколько моделей прогнозирования параметров молока в реальном времени. Таким образом, онлайн-сенсорная система, использующая метод прогнозирования в реальном времени, может использоваться точного анализа состава молока на ферме после каждого отдельного доения.

Современные технологии даже позволяют использовать для анализа качества молока мобильные приложения [45]. Это исследование представляет новый подход к анализу отдельных образцов коровьего молока в режиме реального времени, чтобы получить оценку необходимых параметров контроля качества, таких как лактоза, белок, жир и обезжиренные твердые вещества (SNF), чтобы различать их концентрации в обычном коровьем молоке. Это позволит классифицировать образцы молока по их качеству и поможет избежать штрафов за проблемы с качеством на молочных предприятиях. Для достижения этой цели было реализовано недавно разработанное мобильное приложение, а также модель

на основе нейронной сети, в которую поступают спектральные данные от портативного спектрофотометра с коэффициентом отражения в ближней инфракрасной области (NIR). Благодаря сочетанию этого приложения и портативного NIR-датчика параметры качества молока могут быть оценены молочными фермами в их собственных помещениях. Модель была получена с помощью широко используемого фреймворка машинного обучения TensorFlow, предоставленного Google Inc. Для обучения и проверки моделей было использовано 903 образца свежего коровьего молока, собранных за трехлетний период. Преимущества, предоставляемые этим мобильным приложением на этапе доения, позволяют нам в реальном времени узнавать параметры контроля качества для каждой пробы коровьего молока индивидуально. Это предлагает возможность руководству немедленной смены стратегии наряду с расширенным потенциалом принятия решений на уровне фермы, что приводит к оптимизации качества производства молока.

В России было проведено исследование большого набора образцов свежего коровьего молока, собранных в течение года у многих поставщиков на большой территории с помощью прибора ближнего ИК диапазона для построения моделей содержания жира и общего белка, которые были построены с использованием регрессии частичных наименьших квадратов (PLS), демонстрирующих удовлетворительные характеристики прогнозирования, позволяющие их практическое применение для молочных продуктов [46].

Важное исследование проводилось для сравнения приборов ближнего и среднего ИК диапазона, а конкретно в том, чтобы проверить гипотезу о том, что более частые, но менее точные анализы компонентов молока могут дать более репрезентативную оценку общей лактации коровы [47]. Ежедневные записи по надоям молока и концентрации жира и белка, собранные системой регистрации AfiLab с января 2014 года по январь 2016 года из 47 крупных стад, распределенных по всему Израилю, в общей сложности обследовав 37 486 коров израильской голштинской породы по сравнению с той же статистикой, полученной из ежемесячных отчетов тестовых дней, полученных с помощью

анализаторов молока Bentley и Foss в центральной лаборатории Израильской ассоциации животноводов. Средние показатели лактации по всем признакам были довольно схожими для двух методов в обоих паритетах, за исключением производства жира, которое было ниже для ежедневных записей. Ежедневная регистрация в реальном времени концентрации жира и белка системой ежедневной регистрации может быть предпочтительнее ежемесячного анализа для принятия решений по управлению стадом и генетической оценки. Также было проведено исследование для оценки согласованности между быстрым анализатором ближнего ИК диапазона и более точным анализатором проб среднего ИК диапазона. Данные AfiLab собирались два раза в день для каждой дойной коровы в стаде с 12-часовыми интервалами из доильного зала двойной 12 в молочном отделении Университета Флориды (Гаага, Флорида) с января 2010 по декабрь 2011 года. Данные Bentley также были получены в тестовые дни в 2010 и 2011 годах. Ежемесячно тестировалось около 450 коров. Тестируемое молоко собирали во время 1 доения каждый месяц, чередуя ежемесячные утренние и вечерние доения. Данные AfiLab были сопоставлены с жирами и белками Bentley ($n = 10\,273$; 23 дня испытаний) и лактозой ($n = 6741$; 16 дней испытаний). Общие средние стандартные отклонения (SD) среднемесячных значений содержания жира, белка и лактозы Bentley составили $3,74 \pm 0,80\%$, $3,06 \pm 0,37\%$ и $4,76 \pm 0,30\%$ соответственно. Согласованность между наблюдениями AfiLab и Bentley было лучше для белка и лактозы, чем для жира. Комбинация наблюдений AfiLab на различных дойках улучшила согласованность по белку и лактозе.

Устройство AfiLab пробовали использовать для поточной сортировки молока на фермах в Италии [48]. Автоматизированный анализ и сепарация молока в доильном зале в основном полезны для производства молока низкого или высокого качества и для мониторинга состояния здоровья животных. Молоко с высоким содержанием белка и жира может снизить интенсивность стандартизации в процессе производства сыра, что снижает производственные затраты. Целью исследования была оценка эффективности сепарации молока в реальном времени во время доения и производительности доильного аппарата

после внедрения AfiMilk MCS. Кроме того, были оценены экономические аспекты. Для сепарации молока потребовалось оборудовать существующие доильные залы дополнительным молокопроводом, чтобы можно было направлять молоко с низкими и высокими свойствами коагуляции в два разных охлаждающих танка. Результаты показали, что фракция молока с высокой степенью коагуляции по сравнению с молоком в массе увеличилась в концентрации жира (с 18% до 43%) и белка (с 3% до 7%). Протестированная технология дала многообещающие результаты, демонстрирующие надежность и эффективность сепарации молока в режиме реального времени при доступных затратах на внедрение. На рисунке 1.2 представлена экспериментальная доильная установка, оснащенная таким устройством.



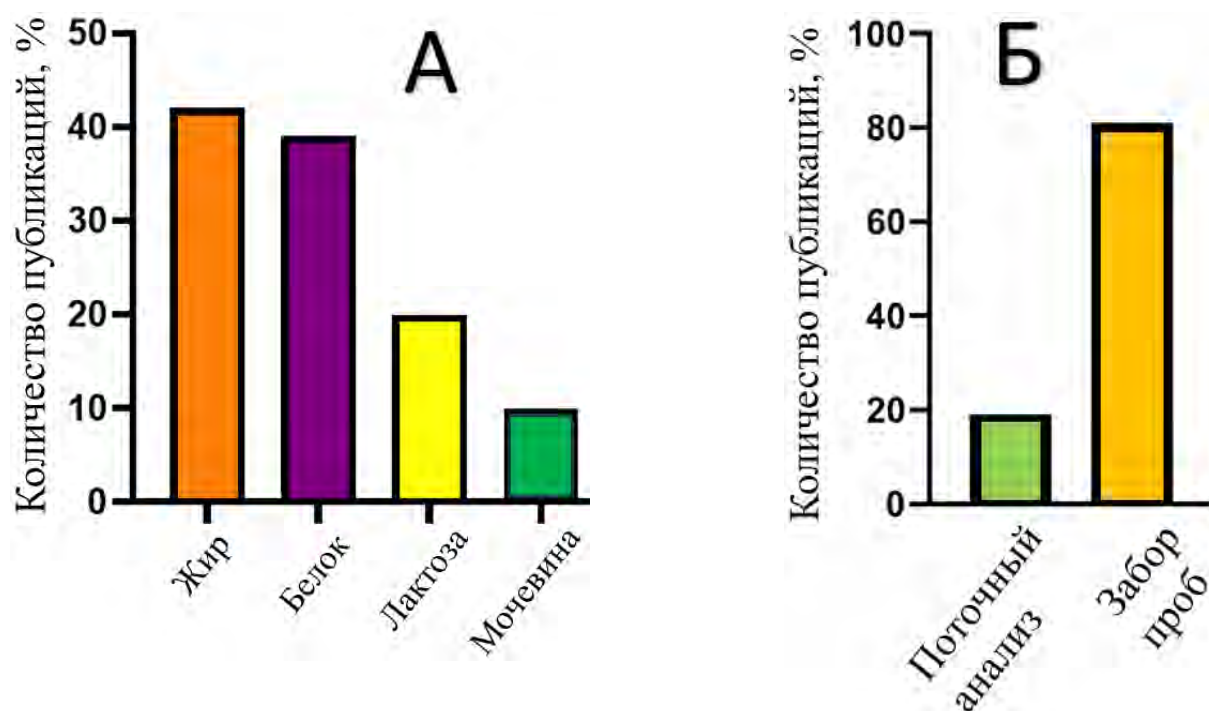
1 - молокомер, 2 – анализатор качества молока AfiMilk Afilab, 3 – клапаны для разделения молока, 4 и 5 – молочные линии для разделенного молока

Рисунок 1.2 – Типы взаимодействия света с изучаемой средой

Патенты, заявленные на создание систем анализа качества молока различными методами многочисленны, однако большинство из них относятся к анализу проб молока. В исследовании рассматривался патент на коммерчески реализуемый анализатор качества молока. Патент на проточное устройство оценки качества молока (US 7236237 B2) описывает устройство, применимое для анализа молока в процессе доения. Известный способ определения процентных концентраций молока в потоке, заключающийся в облучении потока молока, протекающего в стеклянной трубке, попеременно несколькими лазерными полупроводниковыми излучателями с заранее заданной длиной волн, одновременную регистрацию угловой зависимости интенсивности рассеянного излучения, проходящего сквозь поток молока при помощи фотоприемников и обработку полученных данных для определения процентных концентраций содержания сухого вещества в молоке. Известное устройство содержит ударопрочный влагозащищенный пластиковый корпус с пазами для фиксации стеклянной трубки, запрессованной в манжеты из упругого материала, лазерные полупроводниковые излучатели и фотоприёмники. Недостатками известного патента на изобретение являются нарушающая поток молока в молочной трубке кювета, а также охватывающие меньшую часть ближнего инфракрасного диапазона длины волн источников излучения, что негативно влияет на качество анализа молока. В целом, представленное устройство имеет ряд недостатков, но фундаментально демонстрирует реалистичность потоковой оценки качества молока.

В изученных научных публикациях, где для исследования использовались устройства экспресс-анализа качества молока самыми распространенными исследуемыми параметрами молока являлись жир и белок, реже лактоза и мочевины. Остальные параметры молока, такие как, например, уровень соматических клеток и наличие специфических бактерий, исследовалось менее, чем в 5% изученных публикаций высоких квартилей. В изученных научных публикациях только в 20% случаев использовали поточные технологии анализа качества молока (включая как коммерчески используемое устройство, так и

только лабораторные образцы). Визуально результаты представлены на рисунке 1.3.



А – Распределение параметров молока, исследуемых в научных публикациях,

Б – Сравнение использования поточных- и пробоанализаторов.

Рисунок 1.3 – Визуализация литературного исследования

1.3 Исследование скорости молокоотдачи и длительности доения машинным способом у животных с различным физиологическим состоянием

Для создания технологии проточного анализа параметров качества молока нужно изучить параметры потока молоковоздушной смеси, для чего было проведено экспериментальное исследование [49]. Поток протекает в молочном шланге доильной установки и обладает сложной структурой. Также необходимо было изучить, как отличается процесс доения здоровых животных и зараженных маститом субклинической и клинической форм. В этом исследовании были определены три критических важных для работы устройства параметра процесса доения:

1. Скорость молокоотдачи;

2. Длительность доения;
3. Общий объем молока, протекающего в молочной трубке.

Знание о длительности доения лактирующих коров необходимо для определения условий работы анализатор качества молока, способного работать в процессе доения коров. Также нужно точно знать, какой объем молока и воздуха протекает в молочном шланге доильной установки. Информация должна быть собрана как для здоровых, так и заболевших маститом животных. Подробная информация о влиянии мастита на удои и скорость молокоотдачи животных очень важна и с зоотехнической и производственной точек зрения. Например, одно из проведенных в соавторстве исследований показало, что есть значимая связь между температурой поверхности кожи вымени и удоем коров, больных маститом [50].

Помимо здоровых животных, аналогичные параметры процесса доения (длительность, скорость молокоотдачи, общий объем) необходимо определить также и для животных, болеющих маститом субклинической и клинической форм. Заболевание маститом без своевременного лечения может привести к хроническому снижению удоя и скорости молокоотдачи. Мастит лечат антибиотиками, а еще преднизолоном и его аналогами. Это помогает корове усилить гемато-молочный барьер и восстановить сниженное качество молока [51]. На степень снижения удоев и скорости молокоотдачи влияет тяжесть заболевания и важно надежно оценить тяжесть клинического мастита, чтобы предсказать результаты лечения и соответствующим образом адаптировать протоколы лечения.

В ходе исследования был проведен анализ скорости молокоотдачи коров Ярославской породы, как здоровых, так и заболевших маститом разной степени тяжести, учитывая такие факторы, как микроклимат на ферме, стадия лактации, средний разовый удой и температура поверхности вымени, а также сравнение со скоростью молокоотдачи здоровых животных. Проведена оценка влияния мастита на скорость молокоотдачи коров. Определена целесообразность использования

падающего режима управления доильной установкой при доении коров, болеющих маститом.

Для экспериментального исследования отобрали нескольких животных на 5-6 месяце лактации из одного коровника на 250 голов [49].

Всего были собраны 3 группы изучаемых животных по физиологическому состоянию:

«здоровые» – 11 животных, выступающих как контрольная группа (стандартные удои, 8,9 кг средний разовый удой);

«субклинический мастит» – 8 животных, имеющих сниженные удои (5,4 кг средний разовый удой) из-за мастита, с повышенной температурой;

«клинический мастит» - 7 животных, имеющих сильно сниженные удои (2,5 кг средний разовый удой) из-за мастита, с высокой температурой.

Измеряли объем надоев молока через каждые 15 секунд, а затем рассчитывали скорость молокоотдачи на каждом из 15-секундных отрезков.

Определение скорости молокоотдачи производится по формуле:

$$\Delta V_m = \frac{Q_{\Delta t}}{t}, \quad (1.1)$$

где ΔV_m – скорость молокоотдачи, л/мин;

$Q_{\Delta t}$ – удой молока в промежуток времени, кг;

t – время измерения параметров удоя, мин.

По результатам исследования были сформированы 3 графика для групп животных «здоровые», «субклинический мастит» и «клинический мастит», все 3 построены в общих координатах. По графикам можно визуально оценить изменение скорости молокоотдачи и различия в длительности доения.

В группе «здоровые» полученные результаты исследования скорости молокоотдачи использовались в качестве образца нормальных показателей. Доение оканчивалось на 285-й секунде для большинства животных. У двух животных из группы доение завершилось за 255 и 270 секунд, поэтому среднее время доения для группы «здоровые» - 281 секунда. Значимым временем доения являются 4 минуты, за которые в среднем производят 88% надоев. Средний

разовый удой в группе составил 8,9 кг, минимальные значения внутри группы 79% от среднего, максимальные 110%. Среднее значение скорости молокоотдачи составило 1,9 кг/мин, минимальное значения внутри группы 80%, максимальное 111%. Дисперсия по группе составила 0,30. Стандартное отклонение по группе составило 0,53 кг/мин.

Краевые значения от минимального до максимального для средней скорости молокоотдачи в группе «здоровые» составляют от 0,67 кг/мин до 2,85 кг/мин (последние 15 секунд не учитывались, поскольку это был завершающий отрезок). Для поминутной оценки изменения скорости молокоотдачи были взяты первые 4 минуты доения (240 секунд), поскольку они содержат основной значимый удой животного.

В 1-ю минуту скорость молокоотдачи составляет 1,76 кг/мин, затем растет к пиковой 2-й минуте доения с показателем в 2,66 кг/мин, далее снижается до 2,49 кг/мин на 3-ей минуте и резко снижается на 4-й минуте до 1,49 кг/мин. После 4-й минуты скорость молокоотдачи быстро снижается до 0. Результаты измерений для группы «здоровые» представлены на рисунке 1.4.

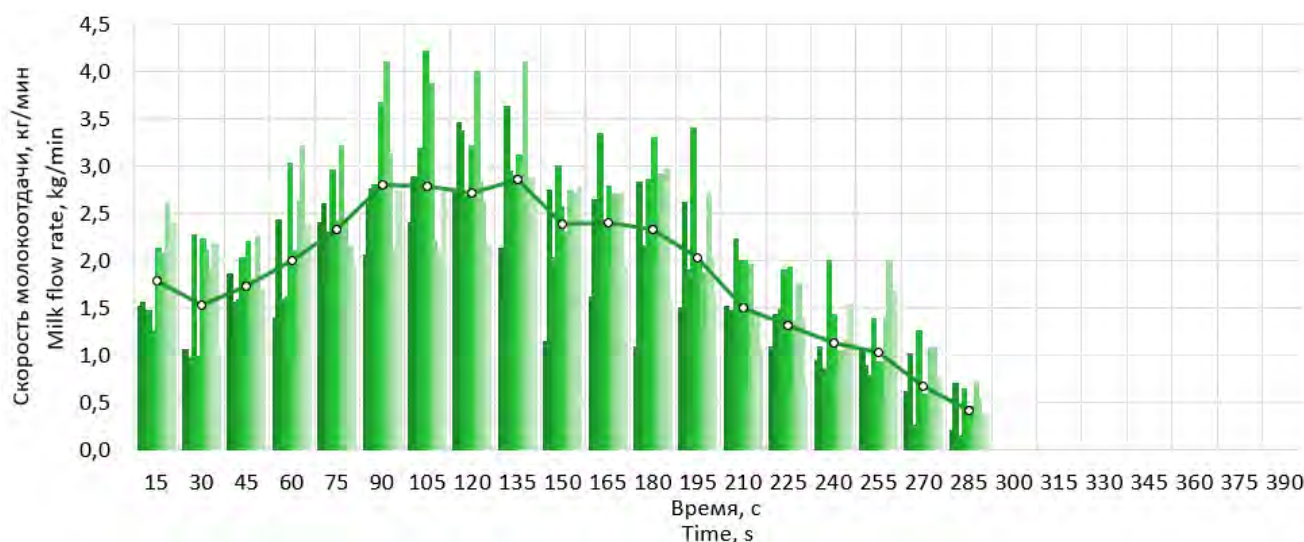


Рисунок 1.4 – Изменение скорости молокоотдачи для группы «здоровые»

Для 9 животных из группы «субклинический мастит» проведены аналогичные исследования, показавшие среднее время доения 375 секунд. Значимым временем доения являются первые 5 минут, за которые производят

около 91% надоев. Средний разовый удой в группе составил 5,4 кг, минимальные значения удоя внутри группы составили 72% от среднего, максимальные 140%. Среднее значение скорости молокоотдачи составило 0,89 кг/мин, минимальные значения внутри группы 80%, максимальные 136%. Стандартное отклонение по группе составило 0,373 кг/мин. Дисперсия по группе 0,16.

Значения от минимального до максимального значения средней скорости молокоотдачи составили от 0,36 кг/мин до 1,57 кг/мин (последние 15 секунд не учитывались, поскольку это был завершающий отрезок). В первую минуту скорость молокоотдачи составляет 0,87 кг/мин, на 2-й минуте увеличивается до 1,02 кг/мин, на 3-й минуте достигает пика в 1,43 кг/мин и затем снижается до 0,95 кг/мин на 4й минуте доения и продолжает медленно снижаться в течении следующих двух минут. Результаты измерений для группы «субклинический мастит» представлены на рисунке 1.5.

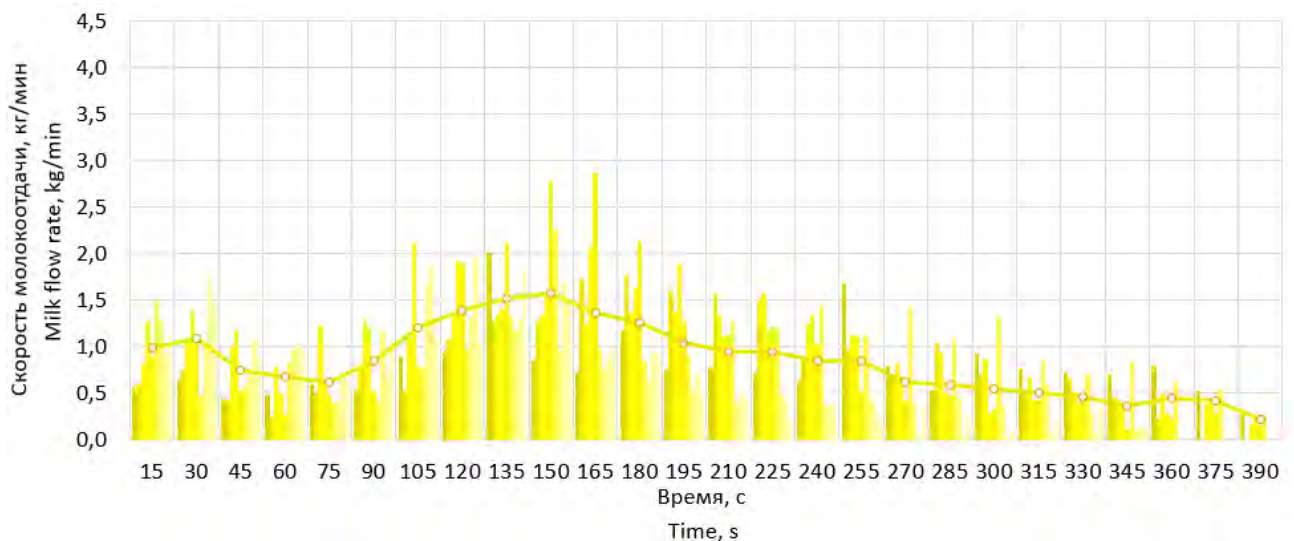


Рисунок 1.5 – Изменение скорости молокоотдачи для группы «субклинический мастит»

Для 6 животных из группы «клинический мастит» проведены аналогичные исследования, показавшие среднее время доения 294 секунды. Значимым временем доения являются первые 4 минуты, за которые производят около 92% надоев. Средний разовый удой в группе составил 2,5 кг, минимальные значения удоя внутри группы составили 84% от среднего, максимальные 112%. Среднее

значение скорости молокоотдачи составило 0,49 кг/мин, минимальные значения внутри группы 82% от среднего, максимальные 129%. Стандартное отклонение по группе составило 0,373 кг/мин. Дисперсия по группе 0,16.

Значения от минимального до максимального значения средней скорости молокоотдачи в процессе доения составили от 0,2 кг/мин до 0,99 кг/мин (последние 15 секунд не учитывались, поскольку это был завершающий отрезок). В первую минуту скорость молокоотдачи составила 0,55 кг/мин, затем увеличилась до 0,59 кг/мин ко 2-й минуте и до 0,69 кг/мин к 3-й минуте, после уменьшилась до 0,49 кг/мин на 4й минуте и далее постепенно снижалась. Результаты измерений для группы «клинический мастит» представлены на рисунке 1.6.

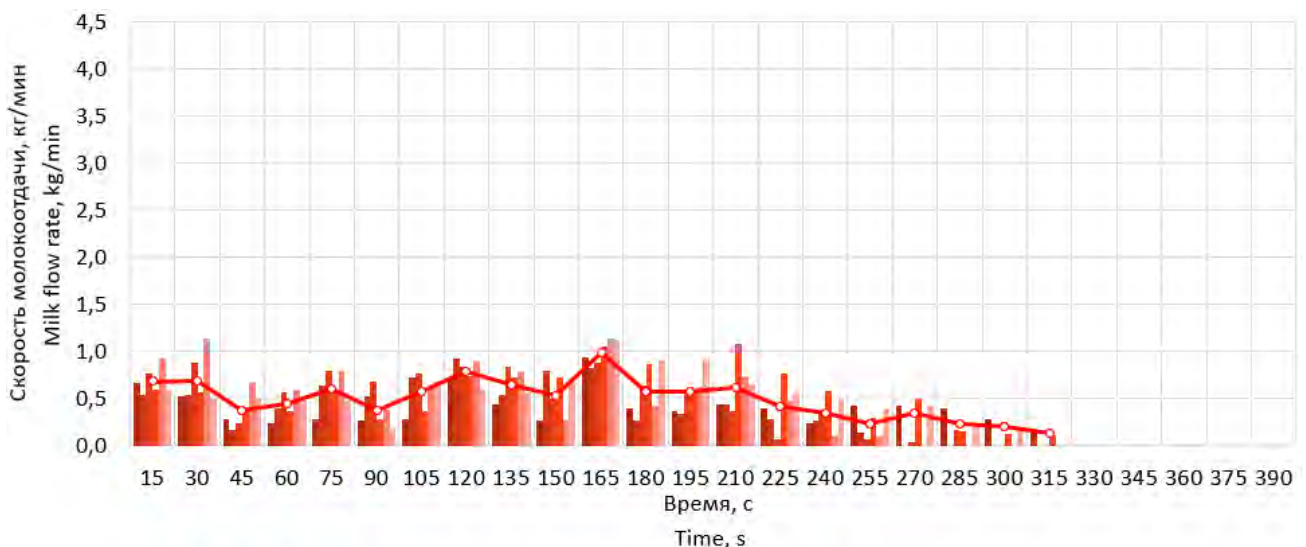


Рисунок 1.6 – Изменение скорости молокоотдачи для группы «клинический мастит»

Для наглядного представления результатов всех трёх групп животных средние значения скорости молокоотдачи по группам объединили в график с общими координатами, представленный на рисунке 1.7. График позволяет визуально сравнить относительную разницу в скорости молокоотдачи, различия в пиках молокоотдачи и общую длительность доения. Также очевидным становятся отличия кривых скорости молокоотдачи у всех трёх групп животных.

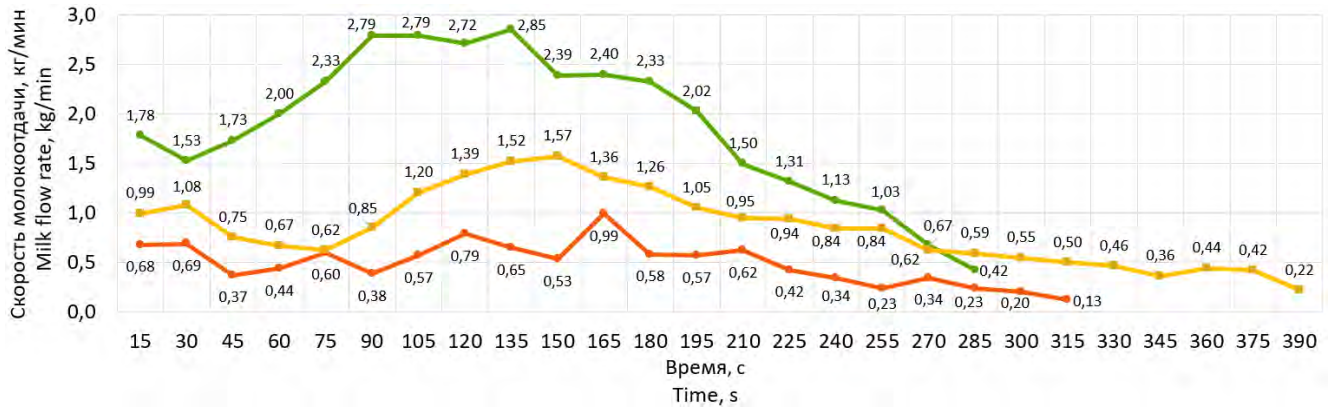


Рисунок 1.7 – Изменение средней скорости молокоотдачи для 3-х групп животных (зеленым – «здоровые», желтым – «субклинический мастит», красным – «клинический мастит»)

Значительные различия обнаружены в пиках скорости молокоотдачи. По нашему мнению, важным являются отличия средней длительности доения между группами исследованных животных. У заболевших животных наибольшая длительность доения приходится на группу «субклинический мастит», которая на минуту дольше, чем группа «клинический мастит» и почти на 2 минуты превышает среднюю длительность доения группы «здоровые».

Необходимо обратить внимание на разницу в изменении показателей скорости молокоотдачи животных из группы «клинический мастит». Значительная разница демонстрирует, что заболевших коров надо доить по смягченному в сравнении со здоровыми режиму, без применения режима интенсивного доения. В группе «субклинический мастит» считаем оправданным режим интенсивного доения. Пик доения смещен относительно здоровых животных на 15-30 секунд, а также длится меньше.

Был проведен расчет процентных показателей скорости молокоотдачи первых четырех минут для определения пиков скорости молокоотдачи. За 100% принята минута с максимальной скоростью молокоотдачи, остальные рассчитаны относительно нее, результаты приведены в таблице 1.2. В таблице 1.2 указаны показатели для всех трёх групп исследованных животных.

Таблица 1.2 – Поминутные значения скорости молокоотдач

Группа	1-я минута	2-я минута	3-я минута	4-я минута
«Здоровые»	66%	100%	94%	56%
«Субклинический мастит»	61%	71%	100%	66%
«Клинический мастит»	80%	86%	100%	71%

Результаты группы животных «Здоровые»: в 1-ю минуту доения низкая скорость молокоотдачи незначительно изменяется. После 1-й минуты происходит резкий рост скорости молокоотдачи и вход в пик интенсивности молокоотдачи. Пик интенсивности молокоотдачи длится в среднем 2 минуты и значительно (на 40-50%) превосходит показатели до и после пика. После 4-й минуты доения скорость молокоотдачи резко снижается.

Результаты группы животных «Субклинический мастит»: выявлен короткий пик скорости молокоотдачи длительностью в среднем 1 минуту. Пиковая скорость молокоотдачи на 30-40% превышает скорости до и после пика. После 4-й минуты скорость молокоотдачи постепенно снижается.

Результаты группы животных «Клинический мастит»: не выявлено выраженного пика скорости молокоотдачи. Скорость молокоотдачи примерно одинакова в первые 3 минуты и затем постепенно снижается следующие 2 минуты.

Для наглядности результатов нами также приведен график изменения стандартного отклонения скорости молокоотдачи (рисунок 1.8), демонстрирующий динамику его изменения на 15-секундных отрезках доения для всех групп исследованных животных.

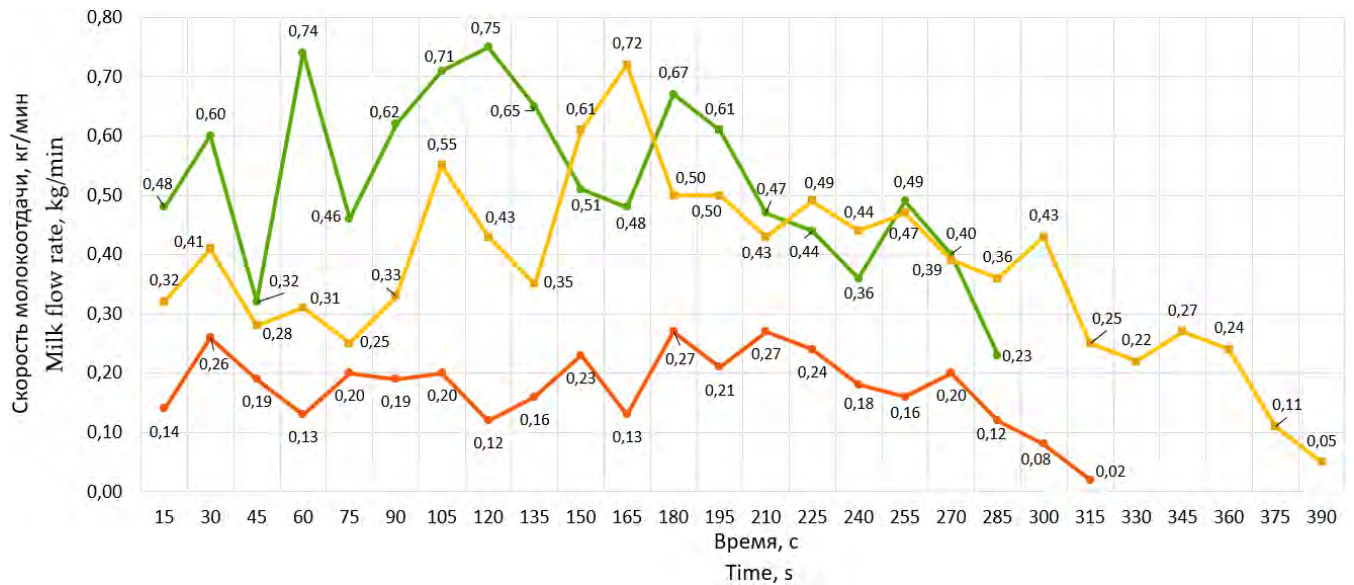


Рисунок 1.8 – Динамика изменения стандартного отклонения для 3-х групп животных (зеленым – «здоровые», желтым – «субклинический мастит», красным – «клинический мастит»)

В этом подразделе была подробно изучена скорость молокоотдачи коров с разным состоянием здоровья. Проведен подробный анализ длительности доения, удоев и скорости молокоотдачи здоровых животных, а также больных маститом в субклинической и клинической формах для формирования рекомендаций по режимам доения маститных животных. При субклиническом мастите животным необходимо сместить режим интенсивного доения, также применять его с меньшей длительностью. При клиническом мастите применение режима интенсивного доения не рекомендуется, поскольку отсутствует фаза интенсивной молокоотдачи и может быть нанесен лишний вред вымени животного.

Выводы по главе 1

1. Выявлены два параметра, необходимые для определения качества молока в процессе доения – концентрация жира и соматических клеток, определяемые оптическими неразрушающими методами.

2. По результатам анализа современных технических средств и технологий для экспресс-анализа параметров качества молока и определен приоритетный метод – спектроскопия рассеяния в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне от 280 до 1100 нм.

3. Проведен подробный анализ средней длительности доения в 280-390 секунд, средних удоев в 2,5-8,9 кг и средние скорости молокоотдачи в 0,49-1,9 кг/мин в зависимости от состояния здоровья животных, включая здоровых животных, а также больных маститом в субклинической и клинической формах для определения необходимых параметров работы устройства экспресс-анализа качества молока.

4. Выявлена применимость метода скаттерометрии для всех видов доильных систем, а также отсутствие необходимости в пробоподготовке и нарушении работы доильных систем.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА МОЛОКОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ УСТРОЙСТВА ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА КАЧЕСТВА МОЛОКА

2.1 Обоснование основных принципов конструкции устройства экспресс-анализа качества молока в процессе доения

Поскольку целью работы является разработка устройства для анализа молока в процессе доения, единственным возможным вариантом является интеграция устройства в доильную систему. Использование бесконтактного метода диагностики является оптимальным благодаря возможности разработать интегрируемое устройство, которое не приведет к нарушению работы доильной системы, а также позволит проводить бесконтактную и неразрушающую диагностику с высокой чувствительностью и скоростью [52]–[54]. Для интеграции устройства в доильную систему, необходимо обеспечить сохранение нормального режима работы доильной системы. Это включает сохранение давления в молочных шлангах и отсутствие забора молока, а также малогабаритность устройства.

Для выполнения этих условий было принято несколько решений о конструкции разрабатываемого устройства:

1. Разделить устройство на 2 модуля, в одном будет реализована измерительная камера с источником и приемниками излучения, в другом будут проводиться обработка данных, полученных с приемников излучения и формирование результатов измерения в понятные пользователю значения;
2. Минимизировать перепад внутренних диаметров между молочным шлангом и измерительной камерой устройства для сохранения параметров потока молоковоздушной смеси;
3. Размеры модуля измерений не должны превышать 200 мм в любой из проекций для доступности интеграции устройства в доильные установки.

В этой работе примером типовой доильной системы является распространенная система «Елочка», использующая вакуумную линию с параметрами вакуума (47 ± 1) кПа. В соответствии с требованиями ГОСТ 34496-2018 максимально возможный перепад давления является 3 кПа. У устройства экспресс-анализа качества молока внутренний диаметр измерительной камеры должен соответствовать производительности доильной системы (до 6 л/мин).

Из литературного исследования известно, что для применения оптического метода внутренний диаметр измерительной камеры устройства должен быть 10-15 мм, поскольку в этом случае выполняется условие преобладания многократного рассеяния и возможно проводить исследования методами спектроскопии рассеяния и пропускания [55]. Также физические размеры счетчика предполагают наличия не менее 150 мм длины молочного шланга до и после точки интеграции устройства.

У рассматриваемой доильной системы есть несколько молочных шлангов с внутренним диаметром в диапазоне 10-15 мм:

1. От доильных стаканов к коллектору (внутренний диаметр 10-14 мм);
2. От коллектора к счетчику молока (внутренний диаметр 14- мм);
3. От счетчика молока к молокоприемнику (внутренний диаметр 14 мм).

В остальных зонах сечение молочных шлангов отличается.

Схема использовавшейся в исследовании доильной системы с указанием расположения молочных шлангов, подходящих для интеграции разрабатываемого устройства представлены на рисунке 2.1.

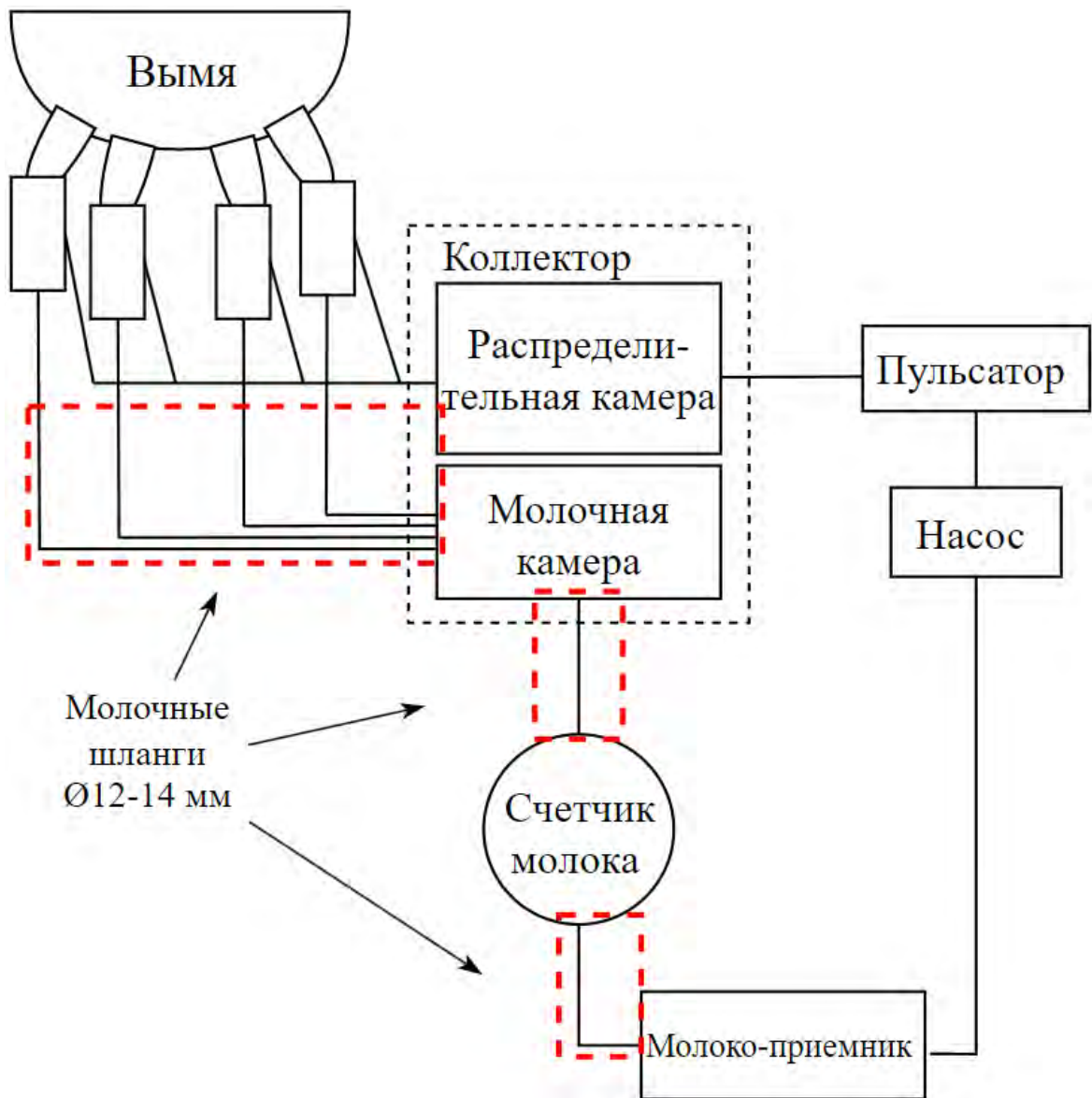


Рисунок 2.1 – Участки молочных шлангов, подходящие для интеграции устройства

Изучив физический образец доильной системы, был сделан вывод о молочном шланге, соединяющем коллектор и счетчик молока доильной системы как оптимальном варианте, благодаря достаточному пространству для интеграции и фиксации устройства [56].

Для разработки устройства экспресс-анализа качества молока необходимо разработать математическую и компьютерную модель протекания молоковоздушной смеси в молочном шланге и измерительной камере доильной системы, чтобы оценить влияние интеграции разрабатываемого устройств в

доильную системы. Необходимо обосновать методику расчета измеряемых параметров молока (определение процентной концентрации жира и проведение качественного анализа концентрации соматических клеток), обеспечивающую возможность разработки конструктивно совместимого с имеющимися условиями интеграции устройства в доильные системы (включая совместимость с молочными шлангами доильной системы, обеспечение нормальной работы доильной системы, сохранение давления в системе, выбор и обоснование подходящих источников и приемников излучения, а также устойчивый к агрессивной внешней среде корпус); обосновать конструкцию, включая точный внутренний диаметр измерительной камеры разрабатываемого устройства; разработать алгоритм работы устройства.

2.2 Разработка математической модели протекания потока молоковоздушной смеси в молочном шланге доильной системы и измерительной камере устройства

Перемещение молоковоздушной смеси в молочном шланге осуществляется гидродинамическим способом за счёт дросселирования в коллекторе и вакуума в молочной линии. Основным параметром, рассчитываемым в математической модели, будет падение давления Δp . В модели будут учтены параметры протекания потока молоковоздушной смеси как в молочном шланге доильной установки, так и измерительной камере устройства.

Поскольку устройство интегрируется в молочный шланг доильной системы, математическая модель протекания потока молоковоздушной смеси на участке от коллектора до счетчика молока усложняется наличием дополнительного участка. Участок можно описать как разделение внутреннего сечения на 3 части: молочный шланг – устройство – молочный шланг. При этом, в измерительной камере устройства внутреннее сечение также не является одинаковым и состоит из двух различных внутренних диаметров, штуцера и измерительной кюветы. На рисунке 2.2 представлены эти переходы внутренних диаметров.

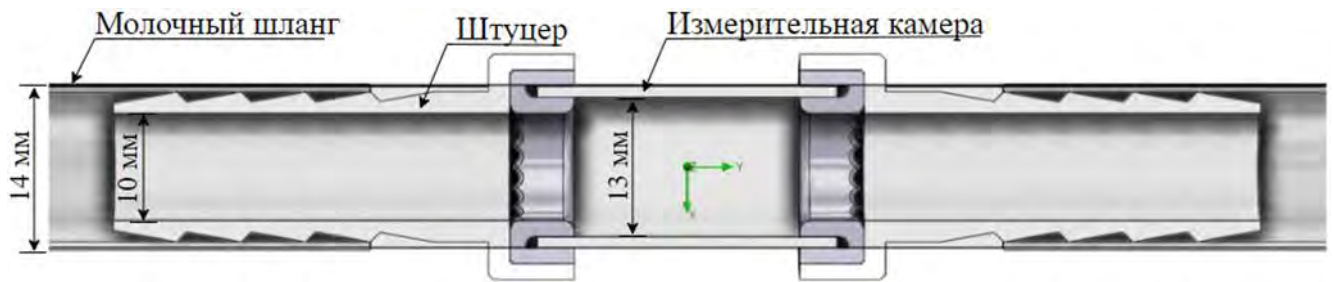


Рисунок 2.2 – Переходы внутренних сечений

Итого, на рассматриваемом участке 5 раз изменяется внутреннее сечение, а также 3 раза наклон относительно вертикальной оси (при этом сохраняется нисходящий наклон протекания потока молоковоздушной смеси, меняющийся в диапазоне от 20° до 90°).

На участках с молочным шлангом рассматривается нисходящий поток молоковоздушной смеси с переменным углом наклона, на участке с устройством нисходящий поток в строго вертикальном варианте протекания потока молоковоздушной смеси. Внутреннее сечение у молочного шланга круглое постоянное, у измерительной камеры устройства сечение рассматривается как круглое переменное.

Поток молоковоздушной смеси в рассматриваемом участке молочного шланга рассматривается для определения влияния интеграции устройства на физические параметры протекания потока и наличия падения давления в молочном шланге доильной системы, поэтому было исключено описание параметров протекания потока молоковоздушной смеси в доильных стаканах, коллекторе и молокопроводе как не влияющее на работу устройства и доильной системы. Протекание потока молоковоздушной смеси в молочном шланге доильной установки описывается для диапазона стандартных объемов протекания молока – от 1 кг/мин до 6 кг/мин. Изначально поток молоковоздушной смеси рассматривается как пробковый режим протекания турбулентного потока. Формирование молочных и воздушных пробок и накопление молока в коллекторе доильной установки было описано в более ранних работах [29].

Научные работы, описывающие поведение потока молоковоздушной смеси в молочном шланге доильной системы, также существуют, однако в них нет описания влияния интегрированного в молочный шланг устройства с отличающимся внутренним сечением измерительной камеры [57]. Поэтому за основу была взята актуальная модель протекания потока молоковоздушной смеси в молочном шланге доильной системы, представленная Рыловым и др. в 2020 году, а затем была разработана адаптированная математическая модель для модернизированных доильных систем, имеющих в своем составе интегрируемые в молочный шланг измерительные устройства.

Основными режимами потока молоковоздушной смеси, протекающей в случае нисходящего потока, являются расслоенный волнистый и пробковый, продемонстрированные на рисунке 2.3 [57].



Рисунок 2.3 – Режимы протекания потока

При доении животных в доильной системе с внутренним диаметром молочного шланга 14 мм (0,014 м) средняя скорость протекания молоковоздушной смеси составляет от 0,11 м/с при производительности доения животного 1 кг/мин до 0,65 м/с при производительности в 6 кг/мин.

Прокачивание молока в молочном шланге осуществляется благодаря разнице давлений в коллекторе и молокопроводе. Для поддержания разницы давлений осуществляется подсос воздуха в коллекторе через специальное отверстие [58], [59].

Далее будут приведены основные выражения исходной математической модели, взятые за основу при разработке адаптированной математической модели для модернизированных доильных систем, имеющих в своем составе интегрируемые в молочный шланг измерительные устройства с отличающимися внутренними диаметрами [57].

Для расчета массового расхода поступающего воздуха:

$$G_2 = \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2k p_0 \rho_0}{(k-1)} \left[\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (2.1)$$

где μ – это коэффициент расхода через малое отверстие с острой кромкой;

d – это диаметр калиброванного отверстия, м;

k – это показатель адиабаты для воздуха;

p_0 – это атмосферное давление, Па;

p_1 – это давление в молочной камере коллектора, Па;

ρ_0 – это плотность воздуха при атмосферном давлении, кг/м³.

Для расчета объемного расхода воздуха используют формулу:

$$Q_2 = \frac{G_2}{\rho_2}, \quad (2.2)$$

где ρ_2 определяется как плотность воздуха в коллекторе, кг/м³.

Воздух, поступающий в молочный шланг, является сильно сжимаемой субстанцией, поэтому учитывается его сжимаемость.

Для расчета объемного расхода воздуха в системе:

$$Q_2 = \mu \frac{\pi d^2}{4 \rho_2} \sqrt{\frac{2k p_0 \rho_0}{(k-1)} \left[\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (2.3)$$

Для расчета плотности воздуха в камере коллектора:

$$\rho_2 = \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{1}{k}} \rho_0, \quad (2.4)$$

Для расчета объемного расхода воздуха, который поступает в молочный шланг доильного аппарата:

$$Q_2 = \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2k p_0 \rho_0}{(k-1)} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (2.5)$$

Для учета воздействия внешних сил используем критерий Фруда. Критерий Фруда – один из безразмерных критериев подобия движения жидкостей и газов, который применяется в тех случаях, когда существенно воздействие внешних сил. В математической модели рассматривается только нисходящий поток молоковоздушной смеси. Он характеризуется либо расслоенным, либо пробковым режимом движением молоковоздушной смеси [60].

Для расчета касательных напряжений потока молоковоздушной смеси в молочном шланге:

$$\tau = \frac{\lambda_{\text{см}}}{8} \rho_{\text{см}} U_{\text{см}}^2, \quad (2.6)$$

где τ – касательное напряжение на стенке молочного шланга, Н/м²;

$\lambda_{\text{см}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления;

$\rho_{\text{см}}$ – плотность смеси, кг/м³;

$U_{\text{см}}^2$ – квадрат скорости молоковоздушной смеси, м/с.

Для расчета факторов потери давления:

$$dp_{\text{тр}} = \lambda_{\text{см}} \frac{dz}{D \sin \alpha} \frac{\rho_{\text{см}} U_{\text{см}}^2}{2}, \quad (2.7)$$

Для расчета потерь давления на значениях высоты подъема z и угла наклона α :

$$\int_{z_i}^{z_{i+1}} \lambda_{\text{см}} \frac{dz}{D \sin \alpha} \frac{\rho_{\text{см}} U_{\text{см}}^2}{2} + \int_{z_i}^{z_{i+1}} \rho_{\text{см}} g dz, \quad (2.8)$$

Для расчета объемного расходного содержания воздуха β :

$$\beta = \frac{Q_2}{(Q_2 + Q_1)}, \quad (2.9)$$

где Q_1 – объемный расход молока,

Q_2 – объемный расход воздуха.

Для расчета фактических условий движения молоковоздушной смеси в молочном шланге с использованием числа Фруда:

$$Fr_{см} = \left[\frac{4(Q_1+Q_2)}{\pi D^2} \right]^2 \frac{1}{gD}, \quad (2.10)$$

где $Fr_{см}$ – критерий Фруда;

D^2 – квадрат диаметра молочного шланга, м².

Для расчета скорости смеси:

$$W_* = \frac{4(Q_1+Q_2)}{\pi D^2} \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{g\sigma} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{0,5}, \quad (2.11)$$

где ρ_1 и ρ_2 – это плотности молока и воздуха, кг/м³;

σ – это коэффициент поверхностного натяжения молока, Н/м.

Граница смены режима движения потока молоковоздушной смеси определяется по $W_{кр}$, определяемой по формуле:

$$W_{кр} = (2,2 - 0,0017\bar{\mu}^{-0,6}) 10^{(5,3+115\mu)(1-\beta)}, \quad (2.12)$$

где $\bar{\mu} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$ – относительная вязкость молоковоздушной смеси;

μ_2 – динамическая вязкость воздуха, Па·с;

μ_1 – динамическая вязкость молока, Па·с.

Оцениваем неравенство $W_* < W_{кр}$. Если справедливо, тогда считаем режим течения пробковым или расслоенным, в противном случае считаем, что течение идет в кольцевом режиме.

В этом разделе мы рассматриваем нисходящие и вертикальные участки молочного шланга (диапазон 20-90° относительно горизонта), поэтому при каждом значении β существование пробкового или расслоенного движения молоковоздушной смеси определяется по величине критерия Фруда. Граничному значению позволяет отделять потоки:

$$Fr^{гр} = \left[0,2 + \frac{2\sin\alpha}{\lambda} \right] e^{-2,5\beta} \frac{1}{(1-\beta)^2}, \quad (2.13)$$

где $Fr^{гр}$ – граничные значения для критерия Фруда.

Если $Fr_{cm} > Fr^{rp}$, то режим потока считаем пробковым, иначе режим потока считаем расслоенным.

Для расчета эквивалентных диаметров сечения потоков молока $D_{1э}$ и воздуха $D_{2э}$:

$$D_{1э} = \sqrt{\frac{4Q_1}{\pi U_1}}, \quad (2.14)$$

$$D_{2э} = \sqrt{D^2 - \frac{4Q_1}{\pi U_1}}, \quad (2.15)$$

Необходимо заметить, что особенностью рассматриваемого нами молочного шланга с интегрированным измерительным модулем является наличие нескольких переходов в сечениях: больший диаметр у резинового молочного шланга переходит в малый диаметр у штуцера и сразу после расширяется в области измерительной камеры устройства, а затем в обратном порядке. За счет значительно меньшей сжимаемости жидкости в сравнении с воздухом, при прохождении того-же объема молоковоздушной смеси, эквивалентный диаметр для потока воздуха уменьшится на 28,57% в самом узком месте (область штуцера).

Поэтому, в формуле расчета потерь давления необходимо учитывать то, что из-за деления молочного шланга на 5 частей итоговая формула будет иметь 5 слагаемых, описывающих потери на каждом участке.

Для расчета числа Рейнольдса:

$$Re_1 = \frac{U_1 D_{1э}}{\nu_1}, \quad (2.16)$$

где U_1 – скорость движения молока, м/с;

ν_1 – кинематическая вязкость молока, м²/с.

Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления λ_1 :

$$\lambda_1 = f(Re_1), \quad (2.17)$$

При использовании метода последовательного приближения необходимо последовательно вычислять эквивалентный диаметр фракции молока в потоке, число Рейнольдса и коэффициент гидравлического сопротивления по формулам

(2.14), (2.16) и (2.17). Вычисления проводятся до тех пор, пока не будет выполняться неравенство:

$$\frac{\left(\Delta h - \lambda_1 \frac{\Delta l}{D_{1\text{э}2g}} \frac{U_1^2}{2g}\right)}{\Delta h} \leq 0,01, \quad (2.18)$$

где Δh – разница высот в начале и конце молочного шланга, м;

Δl – длина молочного шланга на рассчитываемом участке, м.

В рассматриваемых участках молочного шланга и измерительной камеры важнейшим критерием потерь давления является истинное содержание воздуха φ [61], [62].

Для расчета потерь давления на нисходящих и горизонтальных участках применяется формула, в общем виде представленная выражением:

$$\Delta p = \left(\lambda_2 \frac{l}{D_3} + \sum_1^n \zeta_i \right) \left(\frac{\rho_2 U_2}{2} \right), \quad (2.19)$$

где l – длина молочного шланга на рассчитываемом участке, м;

D_3 – эквивалентный диаметр молочного шланга для протекания потока воздуха, м;

ζ_i – коэффициент местных потерь;

U_2 – скорость воздуха в молоковоздушной смеси, м/с;

λ_2 – коэффициент сопротивления.

Для рассматриваемого нами случая с математической моделью протекания потока молоковоздушной смеси в молочном шланге доильной установки, модернизированной устройством экспресс-анализа качества молока, необходимо адаптировать существующее выражение к наличию 5 участков расчета: молочный шланг до точки интеграции с пологим нисходящим режимом потока, штуцер с отвесным нисходящим режимом потока, измерительная камера с отвесным нисходящим режимом потока, штуцер с отвесным нисходящим режимом потока и молочный шланг после точки интеграции с пологим нисходящим режимом потока.

Исходя из этих условий, для расчета потерь давления в рассматриваемой системе, независимо от частных случаев выбора молочного шланга или углов наклона шланга и измерительной камеры модуля была разработана формула:

$$\begin{aligned} \Delta p = & \left(\left(\lambda_2^1 \frac{l_1}{D_9^{\text{мш}}} + \sum_1^n \zeta_{i1} \right) \left(\frac{\rho_2 U_2^1}{2} \right) \right) + \left(\left(\lambda_2^2 \frac{l_2}{D_9^{\text{штц}}} + \sum_1^n \zeta_{i2} \right) \left(\frac{\rho_2 U_2^2}{2} \right) \right) + \\ & \left(\left(\lambda_2^3 \frac{l_3}{D_9^{\text{ик}}} + \sum_1^n \zeta_{i3} \right) \left(\frac{\rho_2 U_2^3}{2} \right) \right) + \left(\left(\lambda_2^4 \frac{l_4}{D_9^{\text{штц}}} + \sum_1^n \zeta_{i4} \right) \left(\frac{\rho_2 U_2^4}{2} \right) \right) + \\ & + \left(\left(\lambda_2^5 \frac{l_5}{D_9^{\text{мш}}} + \sum_1^n \zeta_{i5} \right) \left(\frac{\rho_2 U_2^5}{2} \right) \right), \end{aligned} \quad (2.20)$$

где l_1, l_2, l_3, l_4 – длины каждого из участков, м;

$D_9^{\text{мш}}$ – эквивалентный диаметр молочного шланга, м;

$D_9^{\text{штц}}$ – эквивалентный диаметр штуцера, м;

$D_9^{\text{ик}}$ – эквивалентный диаметр измерительной камеры, м;

U_2^1 – скорость воздуха в молочном шланге до точки интеграции, м/с;

U_2^2 – скорость воздуха во входном штуцере, м/с;

U_2^3 – скорость воздуха в измерительной камере, м/с;

U_2^4 – скорость воздуха в выходном штуцере, м/с;

U_2^5 – скорость воздуха в молочном шланге после точки интеграции, м/с.

Длины обоих штуцеров равны, скорость молоковоздушной смеси на участках будет отличаться, что отражено в формуле 2.20. При числовом расчете этой формулы будут определены потери давления в молочном шланге модернизированной интегрируемым модулем доильной системе.

Необходимо учитывать длину участка с интегрированным устройством экспресс-анализа параметров качества молока относительно общей длины молочного шланга. Для этого сопоставим процентное соотношение средней длины участка молочного шланга между коллектором доильных стаканов и счетчиком молока с длиной штуцеров и измерительной камеры устройства. Сам молочный шланг длиной 1,5 метра, штуцеры имеют одинаковую длину в 0,086 метра, измерительная камера длиной 0,021 метра. Итого, длина устройства

составляет всего 7,13% ($5,73\% + 1,4\%$) от минимальной длины молочного шланга. Из этой пропорции, а также формулы 2.20 можно сделать вывод, что интеграция устройства в доильную систему не может привести к значительному влиянию на нормальную работу системы.

2.3 Имитационное моделирование гидродинамических параметров потока молоковоздушной смеси, протекающей в молочном шланге доильной системы и измерительной камере разрабатываемого устройства

В этом разделе будет проведено имитационное моделирование влияния разрабатываемого устройства экспресс-анализа качества молока в процессе доения на протекание потока молоковоздушной смеси. В исследовании рассматривается поток, протекающий в молочных шлангах типовой доильной системы, и будут оценены его гидродинамические параметры [63].

Из научной литературы известно, что молоковоздушная смесь, заполняющее трубку диаметром 10-15 мм, является многократно рассеивающей средой [64], [65]. Из практики известно, что реальное заполнение молочного шланга никогда не является полным. Обычно это 30-60% его объема. Сам поток не является равномерным, а представляет собой чередование молочных и воздушных пробок [29].

Разрабатываемое устройство предполагается к использованию в составе модернизированных доильных систем, что повысит технологическую оснащенность молочных ферм и позволит эффективнее ими управлять, основываясь на получаемых массивах данных о ходе доения. Моделирование их работы важно для оценки безопасности проведения модернизации доильных систем. Имитационная модель основана доильной системе типа «Елочка». Результаты будут схожими и для других доильных систем по причине использования тех-же физических принципов.

Устройство совместимо с молочными шлангами, имеющими внутренний диаметр 14 мм. Схематичное расположение элементов типовой доильной системы

представлено на рисунке 2.4 (областью расположения устройства является молочный шланг между коллектором и счетчиком молока).

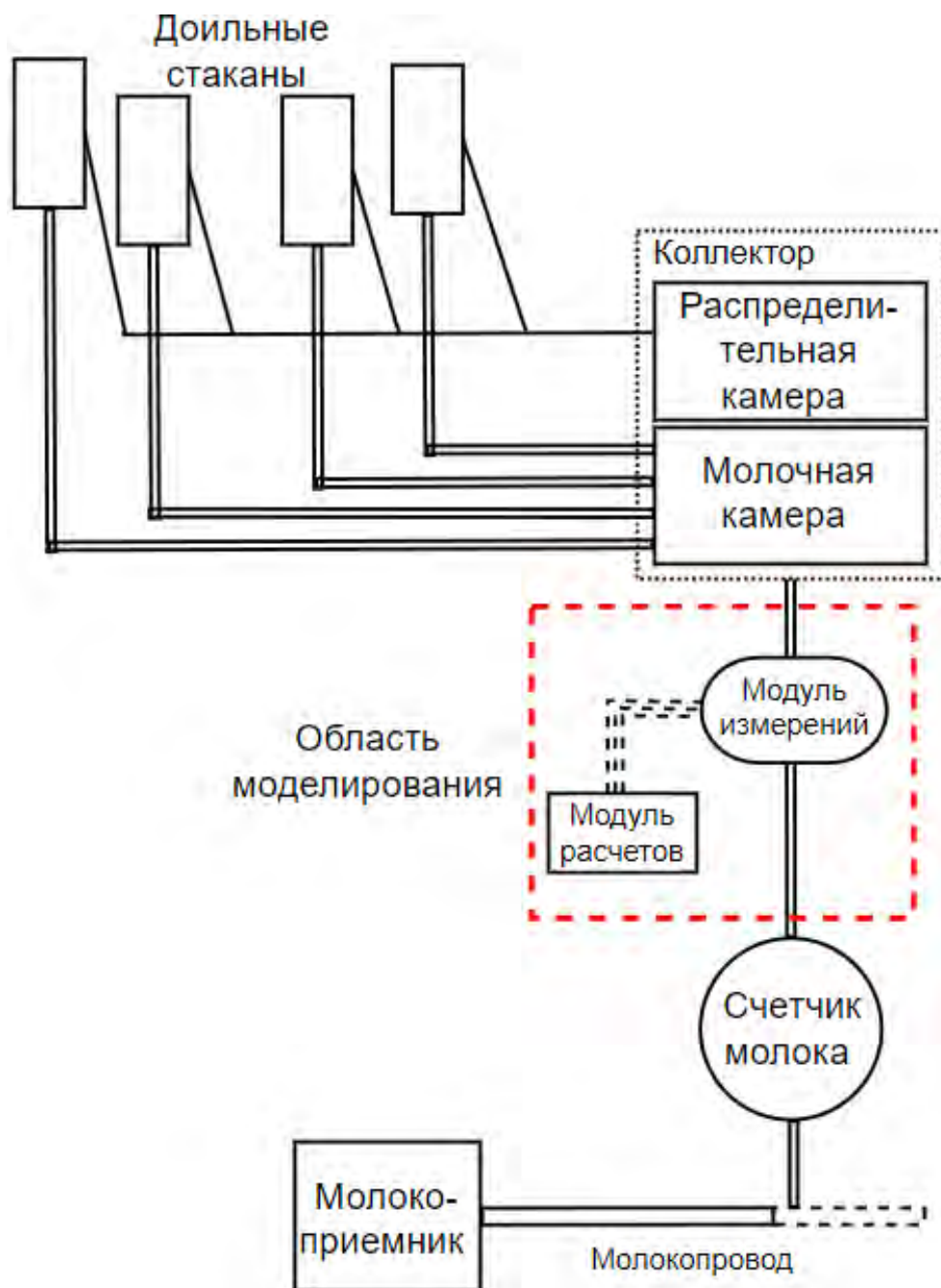


Рисунок 2.4 – Расположение области моделирования

Имитационная модель устройства разработана в программе SolidWorks. У созданной модели были заданы физические параметры молочного шланга, штуцеров и измерительной камеры устройства, а также параметры молоковоздушной смеси, протекающей в молочном шланге. Поток молоковоздушной смеси задан турбулентным, с ежесекундным объемом 0,0001

м³/с (соответствует 6 л/мин). Известно, что скорость движения газа в потоке выше, чем скорость жидкости [60], [66]. Молочный шланг имеет внутренний диаметр 14 мм и длину 200 мм, штуцеры имеют внутренний диаметр 10 мм и длину 43 мм, измерительная камера имеет внутренний диаметр 13 мм и длину 21 мм.

Расчет плотности молоко воздушной смеси был выведен из выражения истинной плотности смеси [60]:

$$\rho_{см} = \rho_v \varphi + \rho_m * (1 - \varphi), \quad (2.21)$$

где φ – коэффициент истинного газосодержания потока.

Движение молоковоздушной смеси по молочному шлангу описывается системой дифференциальных уравнений [60]:

$$\begin{aligned} T_m S Q_m + Q_m &= k_m \Delta p; \\ T_v S Q_v + Q_v &= k_v \Delta p, \end{aligned} \quad (2.22)$$

где Q_m и Q_v – объемный расход молока и воздуха, м³/с,

Δp – разность давлений, под действием которой происходит транспортировка молока и воздуха, кПа,

k_m, k_v – коэффициенты усиления,

S – площадь сечения, м²

T_m, T_v – постоянные времени, с.

На скорость потока в молочном шланге влияет только разница внутренних диаметров молочного шланга, штуцеров и измерительной камеры и потери давления, описанные в предыдущем разделе. Сам процесс измерения качества молока осуществляется без контакта с исследуемой средой.

Основной задачей моделирования было выяснить, различается ли скорость потока молоковоздушной смеси в молочном шланге до и после проточного устройства экспресс анализа качества молока. Вид трехмерной модели разрабатываемого устройства представлен на рисунке 2.5.

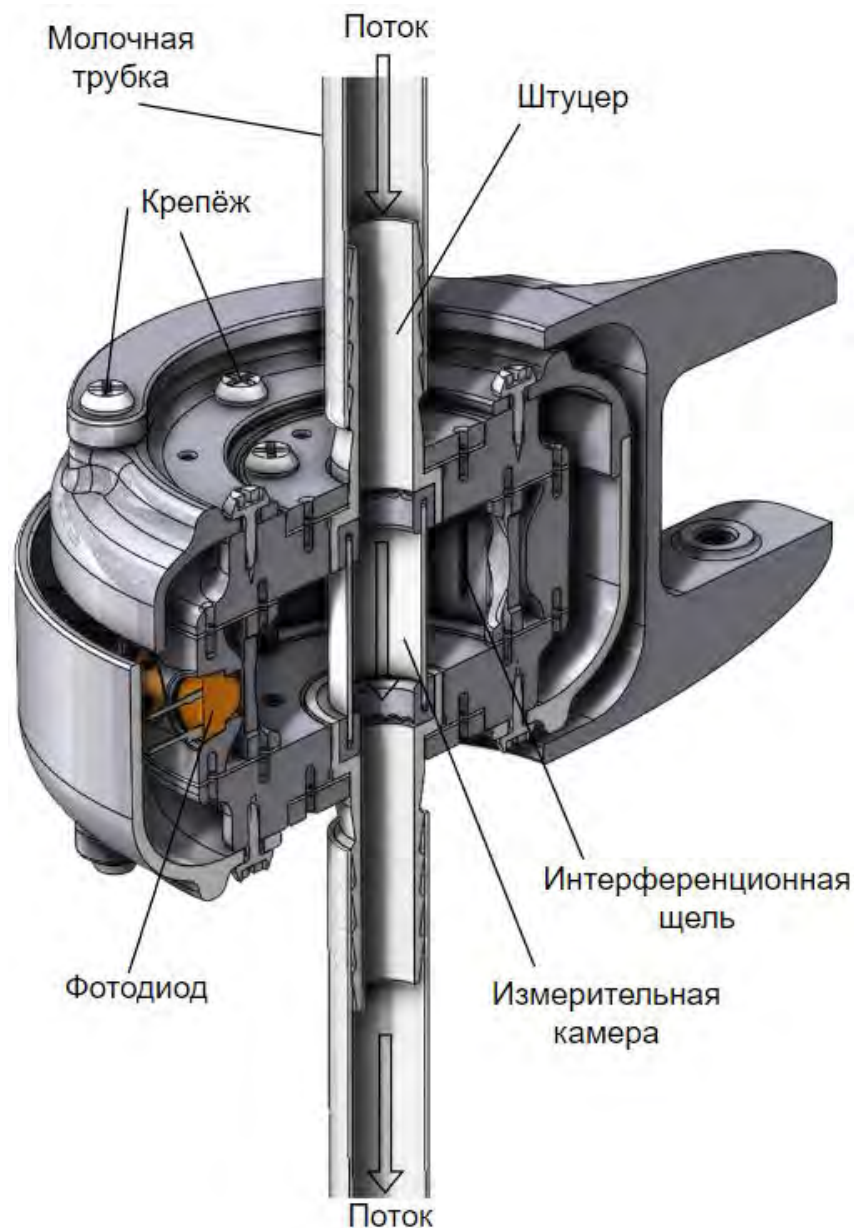


Рисунок 2.5 – Модель измерительного модуля устройства экспресс анализа качества молока

Имитационная модель разрабатывалась для реализации аналога реального потока молоковоздушной смеси, который является скважным и с неполным заполнением молочного шланга. Имитационная модель позволила изучить изменения скорости потока в нескольких точках.

Процесс протекания молоковоздушной смеси был разделен на 4 фазы. Первая фаза это заполнение молочного шланга, доля молока F в молоковоздушной смеси $< 5\%$. Вид потока представлен на рисунке 2.6.

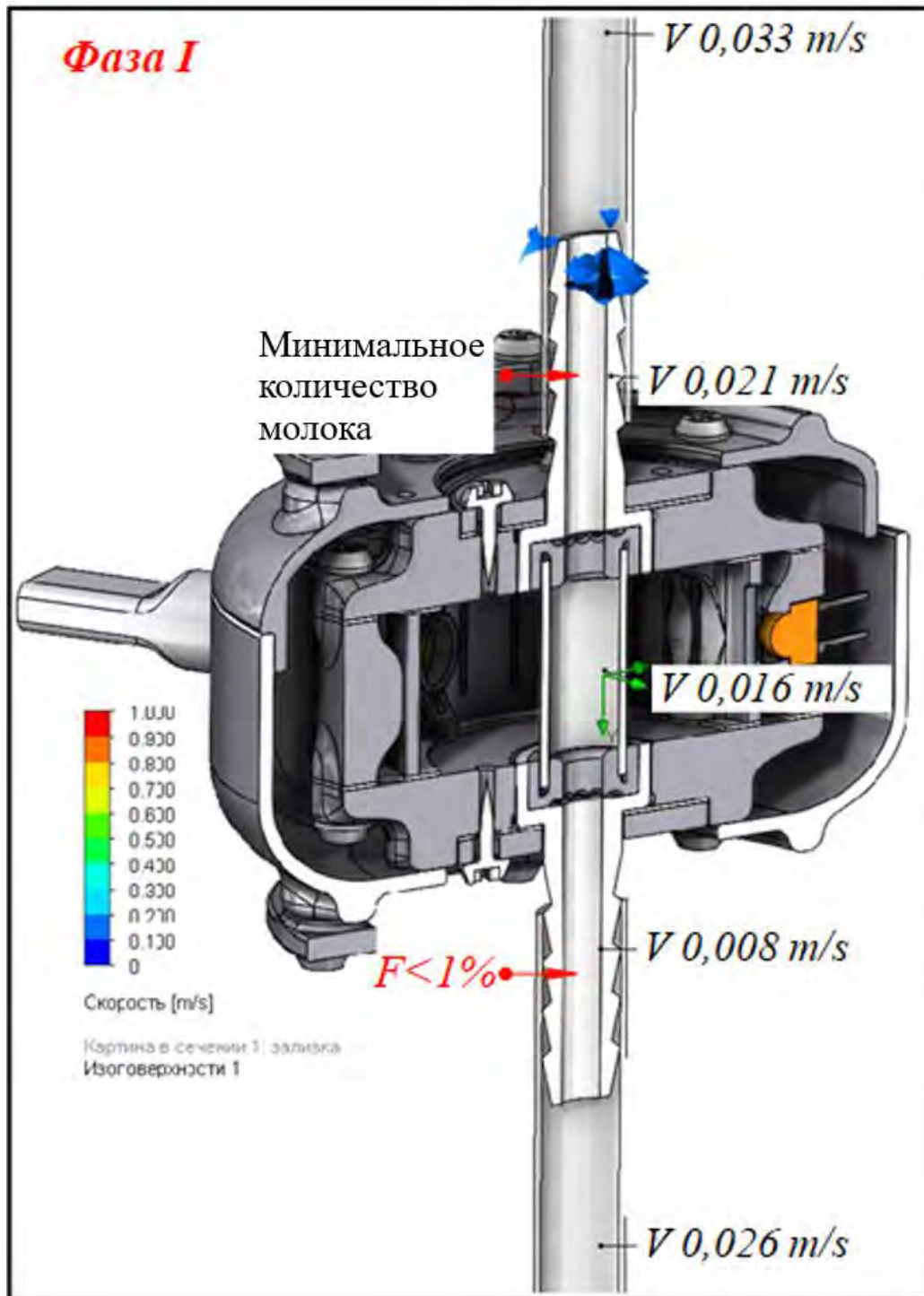


Рисунок 2.6 – Параметры потока в фазе I

Вторая фаза это увеличение доли молока F в молочном шланге, при этом в зоне перехода между молочным шлангом и штуцером доля молока составляет $<95\%$, а в измерительной камере $<40\%$. Вид потока представлен на рисунке 2.7.

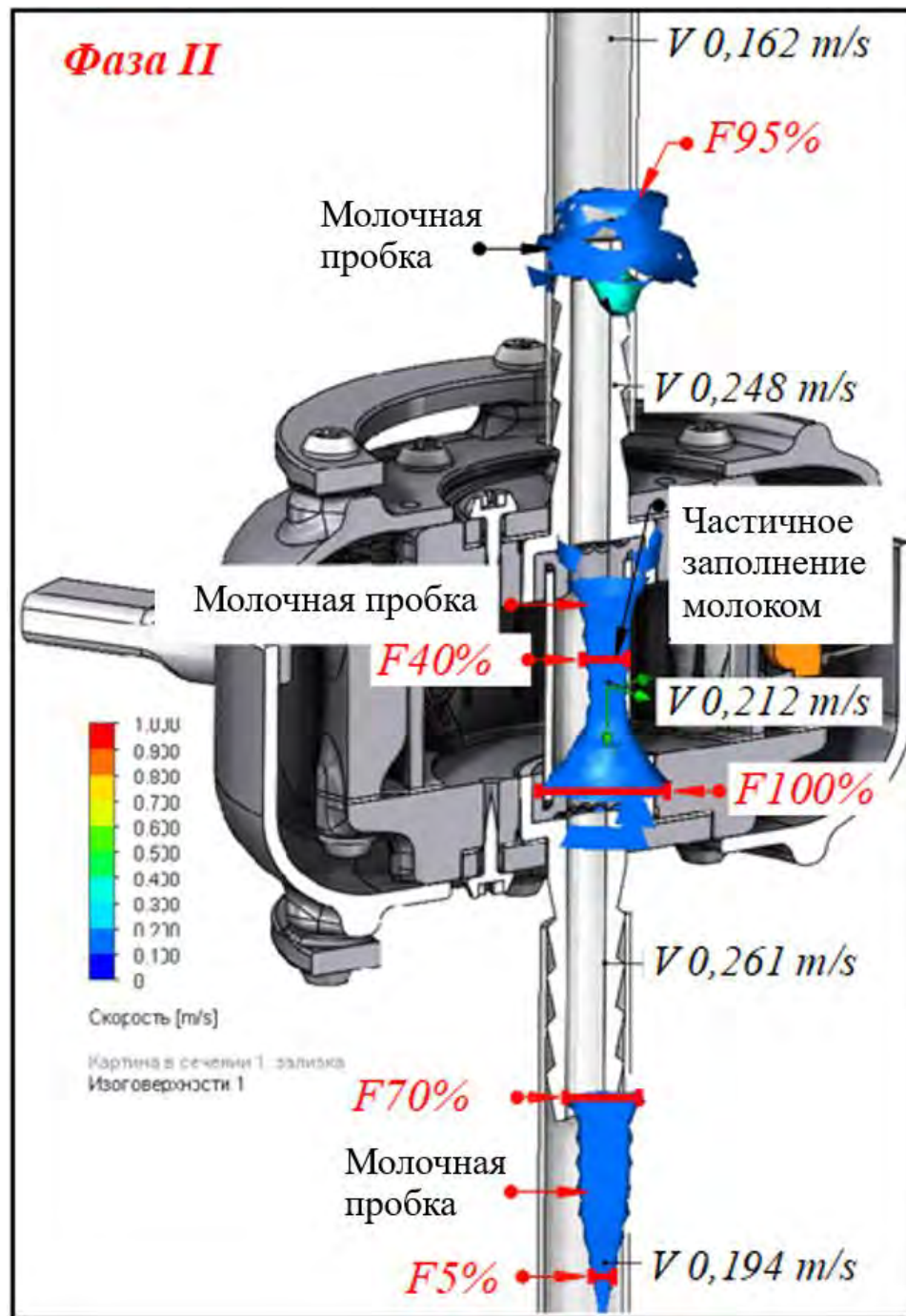


Рисунок 2.7 – Параметры потока в фазе II

Третья фаза это максимальное заполнение молочного шланга, штуцеров и измерительной камеры. Молочный шланг заполнен на 15-40%, область соединения молочного шланга и штуцер заполнена на <95% и сам штуцер на 70%. Измерительная камера устройства заполняется на 40%, область соединения между измерительной камерой и штуцером со стороны выхода заполнена на <95%. Вид потока представлен на рисунке 2.8.

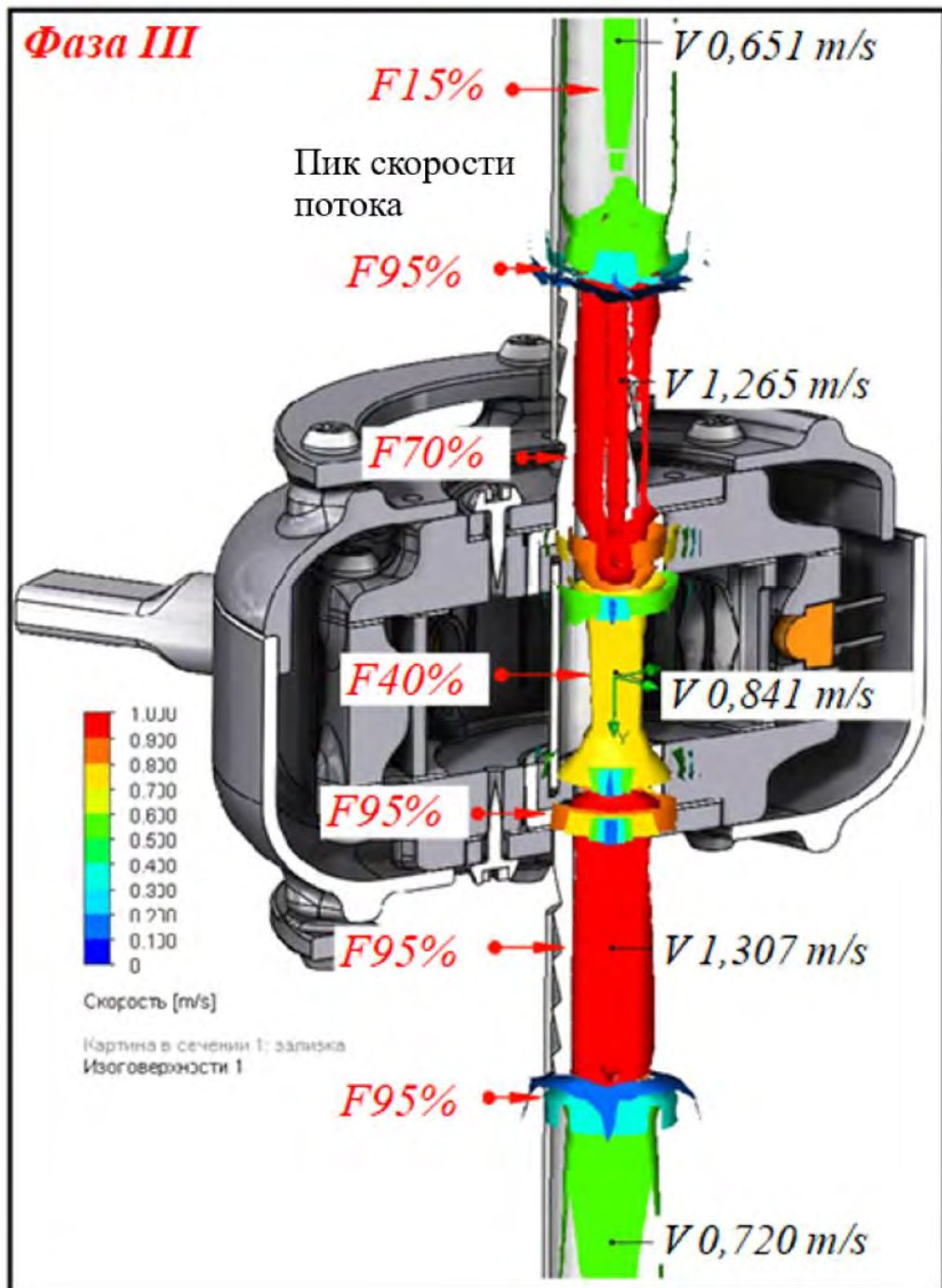


Рисунок 2.8 – Параметры потока в фазе III

Четвертая фаза это снижение заполнения шланга. Заполнение штуцеров снижается до 15%, измерительной камеры до 30-40%, близкое к полному заполнение сохраняется в областях перехода между штуцерами и молочным шлангом и между штуцерами и измерительной камерой. Вид потока представлен на рисунке 2.9.

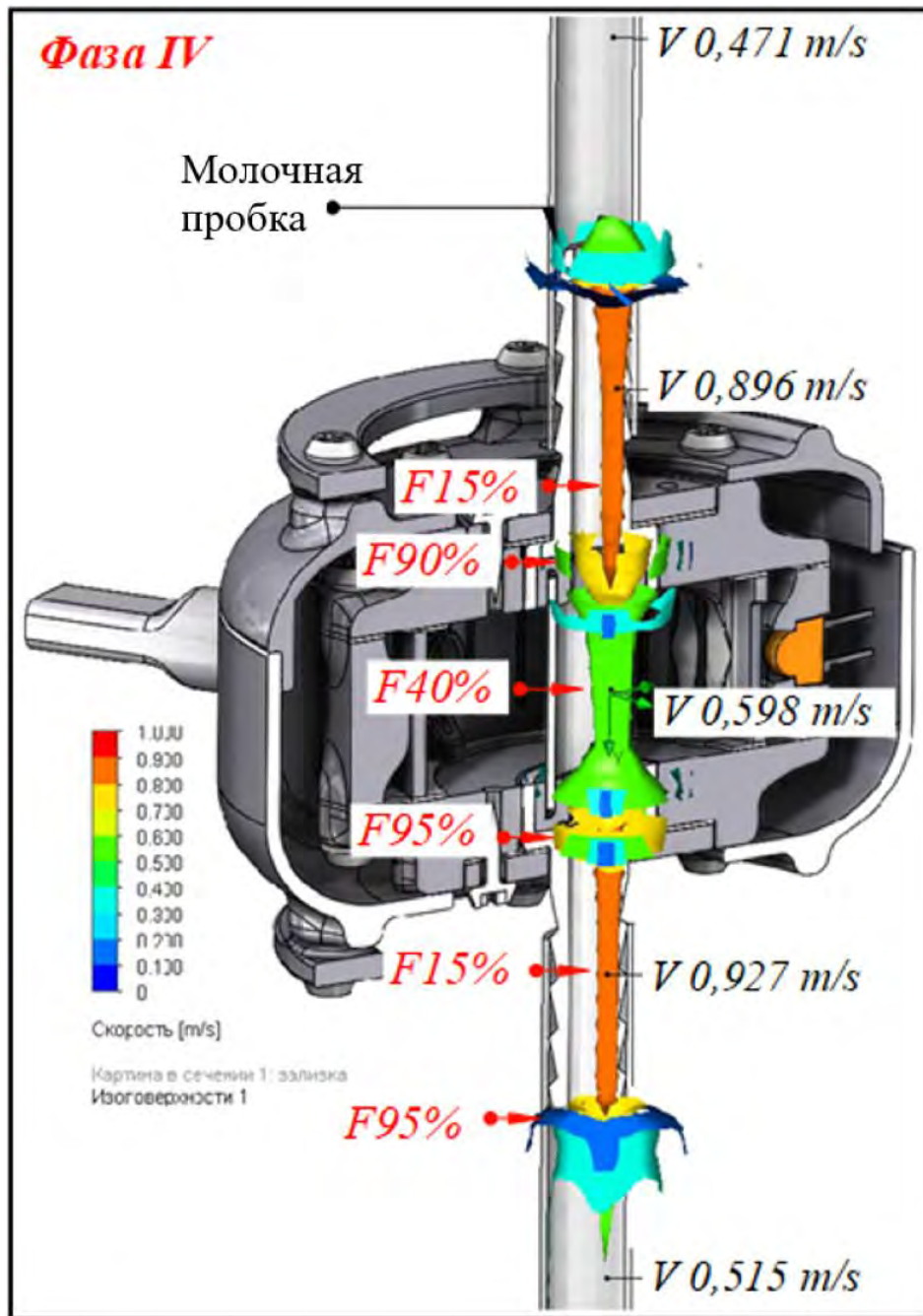


Рисунок 2.9 – Параметры потока в фазе IV

Проведена оценка изменения скоростей потока ΔV . Числовое определение влияния рассчитывается простым выражением:

$$\Delta V = V_{\Pi} - V_{\text{д}}, \quad (2.23)$$

где $V_{\text{д}}$ – скорость потока до устройства, м/с;

V_{Π} – скорость потока после устройства, м/с.

Затем была составлена таблица изменений скоростей (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Влияние устройства на скорость потока

Номер итерации	V_d , м/с	V_n , м/с	ΔV , м/с	ΔV , %
1.	0,033	0,026	-0,007	-27%
2.	0,048	0,045	-0,003	-7%
3.	0,162	0,194	0,032	20%
4.	0,258	0,341	0,083	32%
5.	0,283	0,374	0,091	32%
6.	0,302	0,343	0,041	14%
8.	0,354	0,415	0,061	17%
9.	0,471	0,515	0,044	9%
10.	0,503	0,619	0,116	23%
11.	0,596	0,659	0,063	11%
12.	0,651	0,720	0,069	11%

Проведенное исследование позволило установить, что при скорости потока молоковоздушной смеси выше 0,3 м/с разница скоростей до и после устройства составляет в среднем 14% в сторону ускорения потока. Однако, поток молоковоздушной смеси не нарушается благодаря неполному заполнению молочного шланга.

В модели были реализованы молочный шланг доильной установки с внутренним диаметром 14 мм, штуцеры внутренним диаметром 10 мм, измерительная камера устройства с внутренним диаметром 13 мм, а также источник-генератор молоковоздушной смеси.

2.4 Обоснование методики расчета параметров качества молока устройством экспресс-анализа качества молока в процессе доения

Для выбора методики расчета параметров качества молока с точностью, соответствующей поставленным задачам, необходимо изучить существующие методики, использующие спектральные методы.

Для проведения неразрушающего анализа параметров вещества используются различные спектральные методы, основанные на регистрации проходящего или рассеянного света [67]–[69]. Из-за того, что стандартные оптические приборы измеряют только интенсивность света, при этом без учета остается изменение состояния поляризации света. Матрица Мюллера (4×4) наиболее полно описывает взаимодействие произвольного объекта с полностью или частично поляризованным электромагнитным излучением; поэтому существующие поляриметрические методы могут быть обобщены формализмом матриц Мюллера, и это обобщение называется Мюллеровской матричной поляриметрией (ММП) [70]–[72]. В сильно рассеивающей полидисперсной среде матрица рассеяния света (МРС) зависит от физических характеристик рассеивателей напрямую. Также она чувствительна к оптическим свойствам частиц, их форме и размеру, благодаря этому свойству матрицы возможно определить количество, размер частиц и их агрегатное состояние [73], [74]. Матрица Мюллера применима для исследования свойств коллоидных растворов и суспензий, шероховатых поверхностей материалов, покрытий из наночастиц и композиционных материалов.

Спектральные методы анализа качества вещества, основанные на ММП, активно используются в сельском хозяйстве для диагностики молочных продуктов [75]–[76]. Распределения капель жира и агрегатов казеина по размерам реконструировали по блочно-диагональным элементам матрицы рассеяния образцов молока, разбавленных по объему водой [22]. Используя гистограммы размера, оценивались содержание жира и белка и отношение белка к жиру.

Матрица рассеяния света $\mathbf{M}$ описывает преобразование вектора Стокса $\vec{S}$, который представляет собой состояние поляризации света вследствие взаимодействия света с объектом. Компоненты вектора Стокса, называемые параметрами Стокса, могут быть выражены по формуле через интенсивности основных поляризованных компонент световой волны следующим образом [70]:

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x + I_y \\ I_x - I_y \\ I_{45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_R - I_L \end{bmatrix}, \quad (2.24)$$

где I, Q, U, V — параметры Стокса,

$I_x, I_y, I_{\pm 45^\circ}$ — интенсивности линейно поляризованных компонент, ориентированных вдоль соответствующих направлений ($x, y, \pm 45^\circ$),

$I_{R,L}$ — интенсивности право- и левополяризованных компонент.

Выходные значения вектора Стокса $\vec{S}$ определяются через умножение матрицы рассеяния света $\mathbf{M}$ [70]:

$$\vec{S}_{out} = \mathbf{M} \vec{S}_{in}, \quad (2.25)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix}, \quad (2.26)$$

В дисперсных средах ММ позволяет получить полную информацию о светорассеивающих частицах. Элементы матрицы Мюллера являются функциями угла рассеяния. Они зависят от длины волны зондирующего излучения, а также оптических свойств и распределения по размерам дисперсного вещества [67]-[69]. В частном случае сферических частиц матрица Мюллера имеет блочно-диагональную структуру:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & 0 & 0 \\ M_{21} & M_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} & M_{34} \\ 0 & 0 & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix}, \quad (2.27)$$

где $M_{11} = M_{22}, M_{12} = M_{21}, M_{34} = -M_{43}$ и $M_{33} = M_{44}$.

Физический смысл элемента $M_{11}(\theta)$ — индикатриса рассеяния, то есть угловое распределение интенсивности рассеянного света (θ — угол рассеяния).

Диагностика частиц проводится с помощью МРС путем расчета её элементов, измеренных на рассеяние, поглощение и испускание света [68]. Частицы могут быть как твердыми элементами, так и скоплениями таких частиц, а

также иметь различную форму и размеры, к которым также чувствительна МРС [69].

Принцип работы оптических приборов для измерения МРС можно проиллюстрировать общей структурной схемой (рисунок 2.10). Представленная структурная схема позволяет оценить необходимые элементы для оптического устройства.

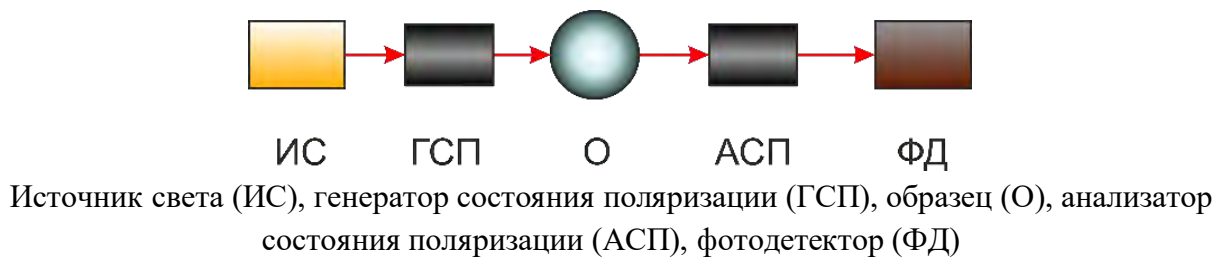


Рисунок 2.10 – Общая структурная схема приборов для измерения МРС

Поляриметр состоит из источника света (ИС), генератора состояния поляризации (ГСП), кюветы с тестовым образцом (О), анализатора состояния поляризации (АСП) и фотодетектора (ФД). Источник излучения варьируется в зависимости от назначения устройства и необходимой точности измерений [72], [77]–[79].

Генератор состояния поляризации (ГСП) представляет является пропускающей оптической системой для генерации необходимого состояния поляризации. На основе полных пучков Пуанкаре можно реализовать генератор состояния поляризации [80].

Анализатор состояния поляризации (АСП) также представляет собой комбинацию фазовых оптических элементов и линейного поляризатора, служащего для измерения компонент вектора Стокса излучения, выходящего из объекта. Фактически в АСП последовательно реализуются частные случаи линейного поляризатора, ориентированного на 0° , 90° и $\pm 45^\circ$, и кругового поляризатора.

Пространственное распределение диффузного пропускания от слоя молока толщиной несколько миллиметров измеряется цифровой камерой с использованием трех светодиодов, излучающих на разных длинах волн, а затем

анализируется с помощью регрессионной модели для определения содержания жира и белка [81].

Оптическое пропускание и внутреннее отражение молока можно измерить с помощью волоконно-оптических технологий [82], [83].

Поскольку молоко является сложной полидисперсной средой, работа скаттерометрических устройств ограничена узким диапазоном длин волн. Существуют различные скаттерометрические схемы для характеристики и контроля дисперсных сред [84]–[86]. Реализован датчик для аэрозольных приложений с лазером в 532 нм и аксиальной фотоприемной геометрией [84].

Поскольку конструкция скаттерометрического датчика будет использоваться именно для молокопровода, его реализация уникальна возможностью встраивания в уже введенную в работу доильную систему без внесения фундаментальных изменений в ее конструкцию или режим работы. Выбор длины волны основан на теоретическом исследовании существующих научных работ, доказывающих, что на длине волны в 532 нм зафиксировано наилучшее поглощение света глобулами жира, поэтому для создания анализатора качества молока, использующего спектроскопию рассеяния, она оптимальна.

На рисунке 2.11 представлены индикатрисы рассеяния в молоке. Условия исследования: температура исследуемой среды 20°C, нулевая скорость движения молока [87].

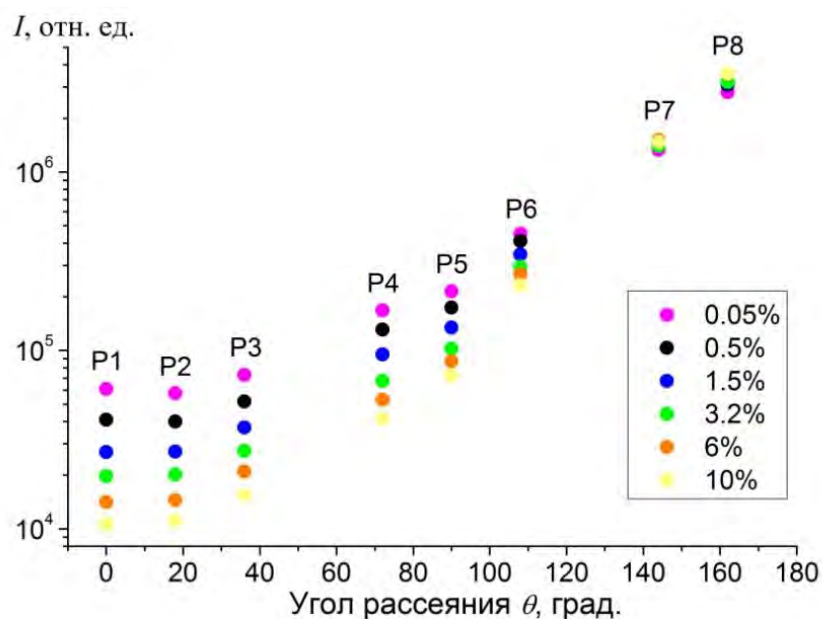


Рисунок 2.11 – Индикатрисы рассеяния для молока жирностью 0,05-10 %

Известна монотонная зависимость интенсивности рассеяния от содержания жира при каждом угле рассеяния [87], [88]. Значения интенсивности бокового и прямого рассеяния дают возможность определять жирность молока в диапазоне 0,05-10%. Однако, как будет показано дальше, на интенсивность на углах прямого рассеяния оказывает сильное влияние присутствие крупномасштабных примесей, в то время как боковое рассеяние более устойчиво к их присутствию.

Интенсивность рассеяния при углах обратного рассеяния $\{144^\circ, 162^\circ\}$ схожа для всех процентных долей жира [89]. Исходя из этого, был введен параметр, описывающий интенсивности при боковых углах рассеяния к интенсивности излучения.

Расчет параметра производится через десятичный логарифм [89]:

$$X_i = -\log\left(\frac{I(\theta_i)}{I(144^\circ)}\right), \theta_i = \{72^\circ, 90^\circ, 108^\circ\}. \quad (2.28)$$

Углы бокового рассеяния для стабильных измерений содержания жира $\theta_i = \{72^\circ, 90^\circ, 108^\circ\}$.

Существует экспериментально определенная зависимость содержания жира в молоке C от специального параметра скаттерометрии X_i при углах бокового рассеяния θ_i в диапазоне 0,05% - 10% при нулевой скорости потока в трубке при температуре 20°C , представленная на рисунке 2.12 [89]. Экспериментальные точки для каждого θ_i аппроксимируются полиномом четвертой степени, который может служить калибровочной кривой для преобразования сигналов фотодиода в процент жирности [89]:

$$C_i = A_{i0} + A_{i1}X_i + A_{i2}(X_i)^2 + A_{i3}(X_i)^3 + A_{i4}(X_i)^4, \quad (2.29)$$

$$i = 1 \dots N$$

где $N = 3$ – количество обрабатываемых каналов бокового рассеяния, обеспечиваемых соответствующими фотодиодами, расположенными под углами $\theta_i = \{72^\circ, 90^\circ, 108^\circ\}$.

X_i — скаттерометрический параметр каждого канала.

Если используется усреднение, то процентное содержание жира FP можно определить как:

$$FP = \sum_i C_i / N. \quad (2.30)$$

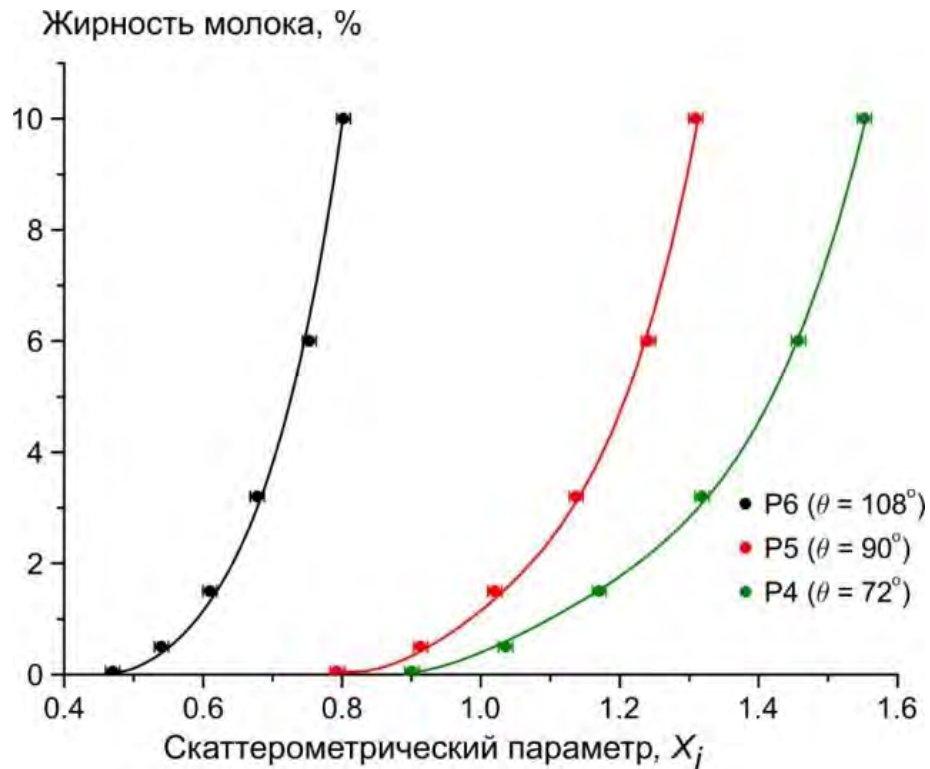


Рисунок 2.12 – Зависимость между жирностью молока и скаттерометрическим параметром

Как показано ниже, калибровка, полученная в статическом случае (рисунок 2.13), действительна и при оценке потока молока. Скаттерометрический параметр сохраняется таким же для скоростей потока до 0,1 л/сек. На рисунке 2.12 приведены значения скаттерометрического параметра X_i , измеренные при трех углах рассеяния $\theta_i = \{72^\circ, 90^\circ, 108^\circ\}$, соответствующих фотодиодам P4-P6. При каждой скорости потока фотосигналы измерялись в течение 3 мин, а затем рассчитывались среднее время и стандартное отклонение для скаттерометрического параметра [87]–[89]. Для соматических клеток введен параметр наличия крупных частиц, обладающий возможностью качественного

анализа их наличия в молоке с диодов P1-P3. Параметр представляется в условных единицах (у.ед.) и определяется в диапазоне 0,06-0,11., что соответствует наличию 600-1100 тыс. клеток/мл.

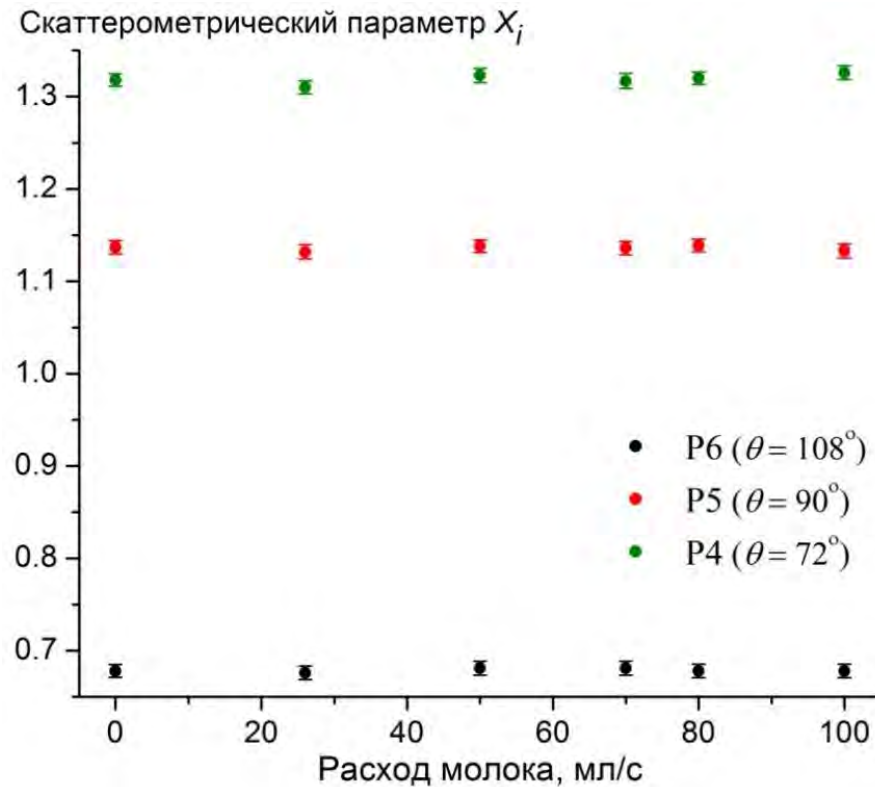


Рисунок 2.13 – Зависимость скаттерометрического параметра X_i от расхода молока для молока жирностью 3.2% при температуре 20°C

Скаттерометрический параметр для молока в диапазоне 0-10% практически постоянен при скоростях потока молока до 100 мл/сек. Стабильные результаты ожидаемы в случае ламинарного течения, при этом в турбулентном потоке результаты будут менее стабильными.

Выбранная методика расчета параметров качества молока, описанная и оцененная в этом разделе, отвечает поставленным задачам по расчету процентной концентрации жира и проведению качественного анализа концентрации соматических клеток с достаточной точностью, а также использует спектральный неразрушающий метод анализа [88].

2.5 Разработка алгоритма работы устройства экспресс-анализа качества молока в составе доильной системы

Разрабатываемое устройство для экспресс-анализа качества молока в процессе доения предполагает интеграцию в доильную систему. Соединение устройства и доильной установки осуществляется путем подключения штуцеров устройства к молочному шлангу. Был разработан алгоритм управления интегрированным устройством, описывающая взаимодействие устройства с доильной установкой.

Работа устройства контролируется специализированным ПО, обеспечивающим оптимальный режим работы, а также фиксирующим отклонения от нормальной работы. При автоматизированном доении решения принимает оператор, контролирующий работу устройства, при роботизированном производится модернизация программного обеспечения. Работа устройства делится на три основных блока – запуск и самодиагностика, измерение углового рассеяния света, расчет и вывод результатов.

Включение устройства происходит автоматически при подключении к источнику питания. При включении устройство проводит самодиагностику. Измерения начинают проводиться через несколько секунд после включения каждые 12 секунд вплоть до отключения питания.

Результаты измерений отправляются на компьютер, подключенный к устройству (используются стандарты передачи данных USB 2.0 и RS232). Блок-схема управления устройством в составе модернизированной доильной системы представлен на рисунке 2.14.

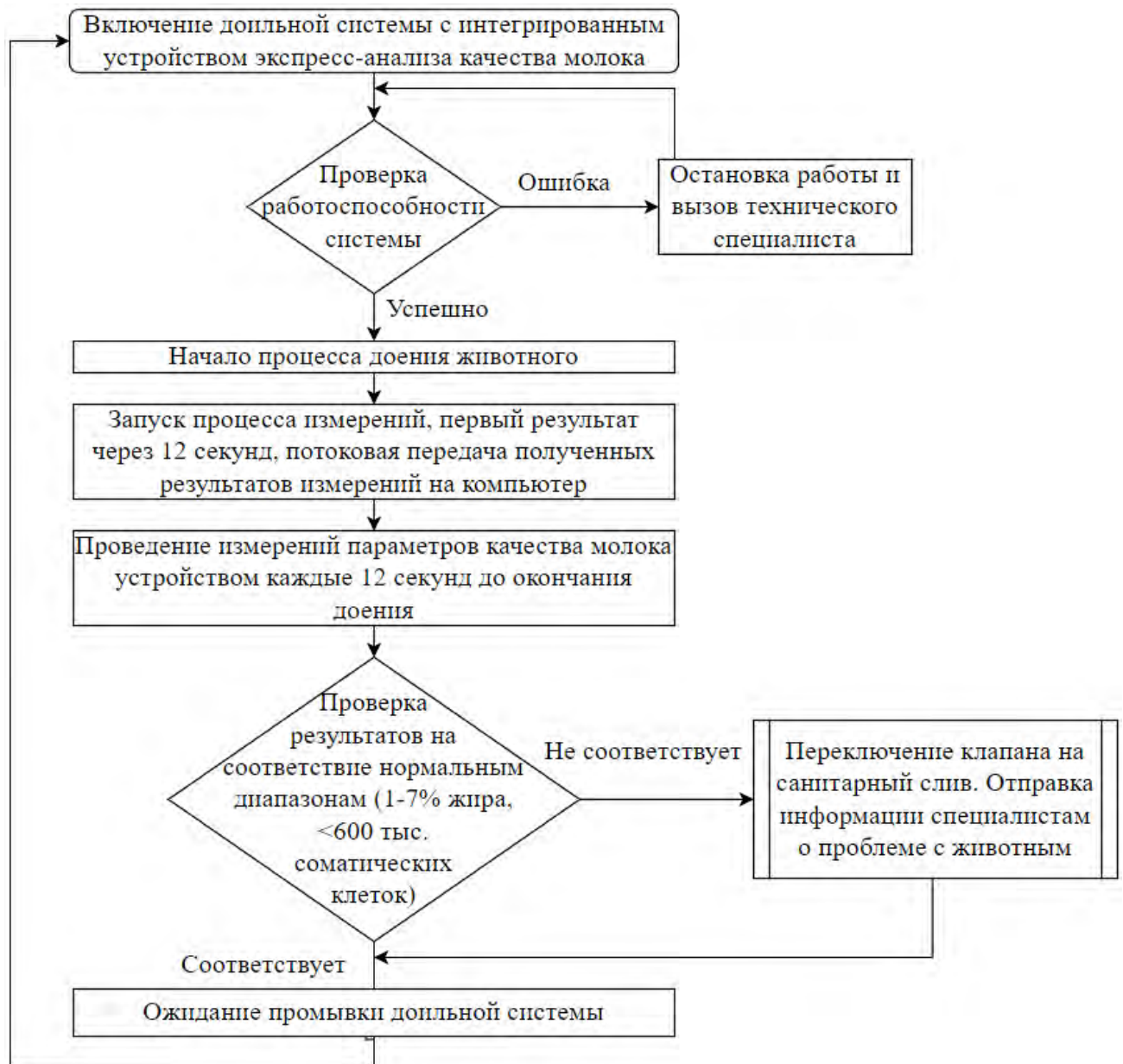


Рисунок 2.14 – Блок-схема управления устройством

Помимо работы в составе модернизированной доильной установки, устройство обладает возможностью автономной работы без подключения к молочному шлангу для калибровки и сервисных задач. В этом случае, алгоритм работы отличается, поскольку для работы используется USB кабель, подключаемый к компьютеру с установленной средой разработки Arduino. Последовательность работы в этом случае представлена на рисунке 2.15.

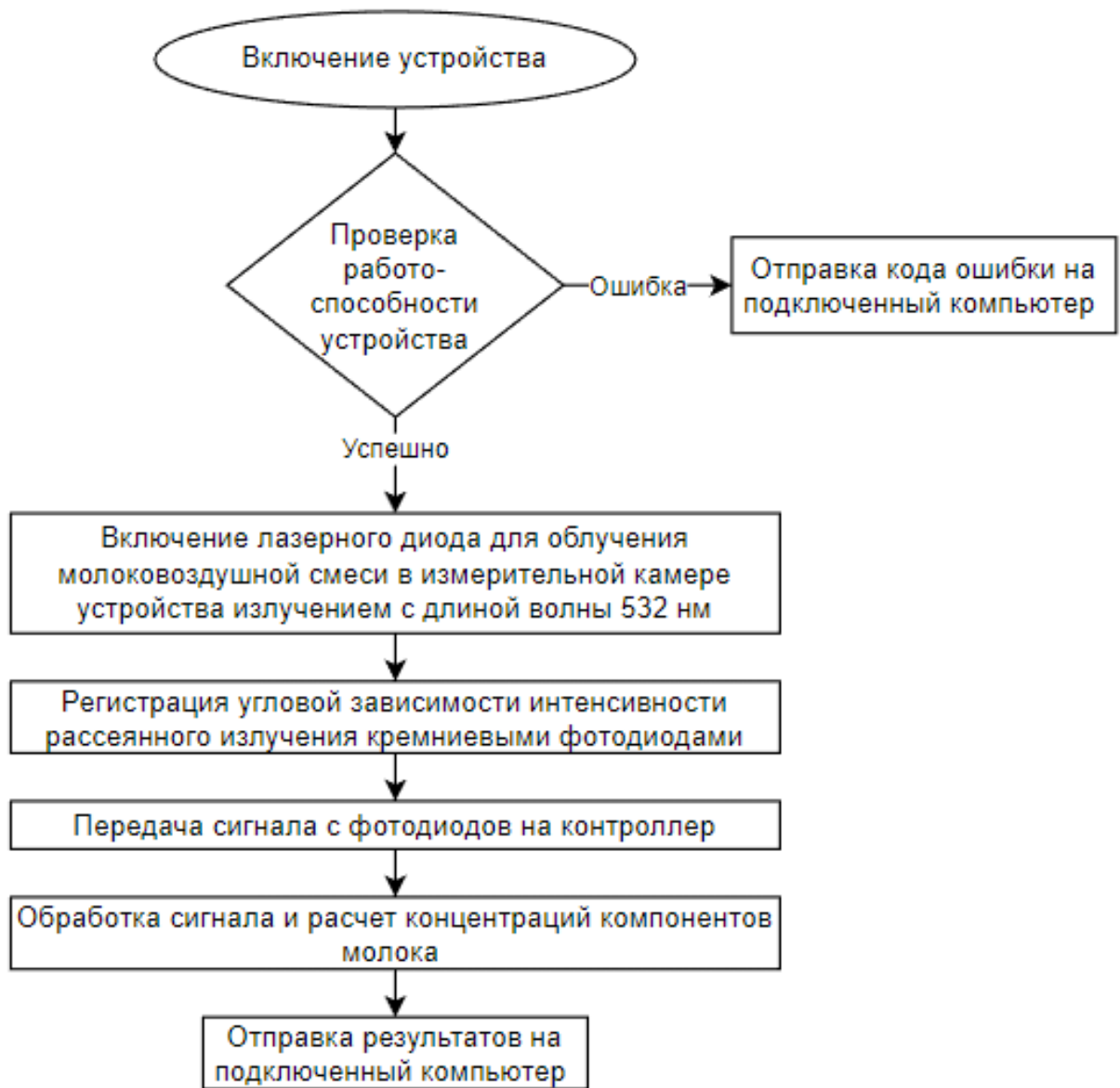


Рисунок 2.15 – Блок-схема работы интегрированного устройства в автономном режиме

На алгоритм управления устройством получено свидетельство ЭВМ, представленное в приложении А.

2.6 Разработка устройства экспресс-анализа качества молока в процессе доения

Разработанное устройства экспресс-анализа качества молока в процессе доения состоит из двух модулей: модуля измерений и модуля расчетов. Модуль

измерений выполнен в цилиндрической геометрии для обеспечения радиального расположения приемников излучения и оснащен съемным кронштейном для совместимости с балками креплений доильной системы. Модуль расчетов выполнен в форме параллелепипеда и оснащен съемным кронштейном для совместимости с балками креплений доильной системы. В ходе разработки устройства были получены патент на изобретение и свидетельство регистрации программы для ЭВМ (Приложения Б и В).

Основная задача конструкции устройства – проведение экспресс-анализа качества молока в потоке молока. Для этого используется явление светорассеяния в молоке.

Техническая реализация процесса измерения заключается в облучении молока светом с использованием лазера. Заданная длина волны полупроводникового лазера 532 нм. Рассеянный молоком свет имеет определенно угловое распределение, для его измерения применяются фотодиоды, расположенные на нескольких разных углах.

Предложенная методика из раздела 2.4 обладает особенностью, отличающей от турбидиметрии: сравниваются формы угловых распределений света, рассеянного молоком с разным процентным содержанием жира [89]. Для этого используется выведенный безразмерный скаттерометрический параметр.

Для обеспечения взаимодействия модули устройства связаны шлейфом. Используется радиальное расположение компонентов в модуле измерений, который включает ударопрочный влагозащищенный пластиковый корпус, штуцеры для соединения с молочными шлангами, стеклянную кварцевую трубку, выполняющую функцию измерительной камеры, источник излучения и фотоприемники в корпусе измерения, а также аналого-цифровой преобразователь и контроллер в корпусе обработки. Устройство создано с учётом того, что поток молока в доильной установке не является равномерным, а представляет собой чередование молочных и воздушных пробок при неполном заполнении молочного шланга [29].

Диаметр модуля измерений — 94 мм. Расстояние между лазером и трубкой варьируется в зависимости от фокуса лазера, в представленном варианте расстояние от лазера до стенки составляет 17,5 мм, а от лазера до оси трубки 25 мм. Для корректной работы устройства необходимо соблюсти также строго заданное расстояние между фотодиодами и трубкой в 19,5 мм между фотодиодом и стенкой измерительной камер. В таком случае расстояние от фотодиода до центральной оси измерительной камеры составит 27 мм.

Радиальное исполнение корпуса и расположение компонентов также обеспечивает компактность устройства. Штуцеры устройства заменяемы и позволяют интегрировать датчик во все типовые молочные шланги, используемые в доильных установках. В прототипе используются штуцеры длиной 43 мм, с максимальным наружным диаметром 21 мм, максимальным и минимальным внутренним диаметром 18 и 10 мм соответственно.

Ширина области применения устройства достигается за счет применения типовых для доильных аппаратов креплений и молочных шлангов, позволяющих упростить интеграцию устройства в доильные установки различных моделей, а также современных износостойких материалов для повышения надежности и долговечности устройства.

Преимуществом лазера перед простыми светодиодами является эффект диффузного рассеяния в полидисперсной среде. Длина волны в 532 нм, она обеспечивает максимальное взаимодействие с глобулами жира в молоке. Выбрана мощность лазера в 5 мВт, поскольку ее достаточно для облучения потока молока толщиной до 15 мм.

Теоретически, возможно установить еще 1 лазер с другой заданной длиной волны, например, излучающего длину волны 280 нм, для возбуждения флуоресценции казеина в молоке, однако это предположение требует дополнительной проработки в виде сложных экспериментальных исследований влияния различных факторов на работу устройства [90]–[91].

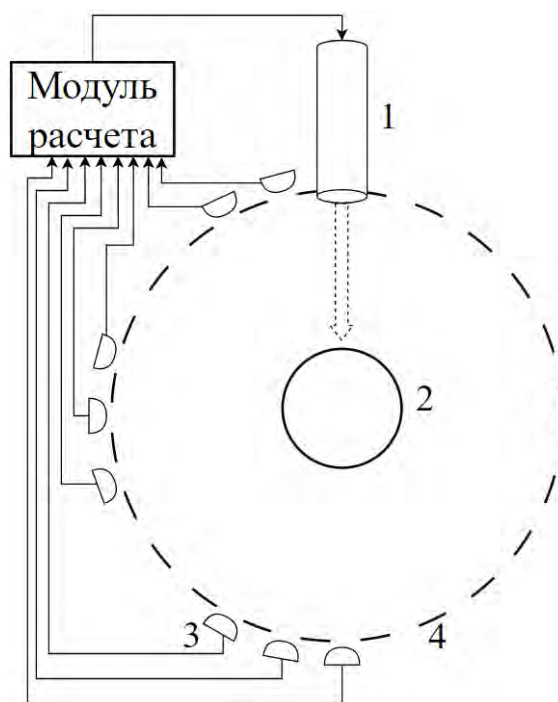
Внутренний диаметр измерительной камеры составляет 13 мм, а толщина стенки 1 мм. Учитывая средний внутренний диаметр молочного шланга в 14 мм, обеспечивается совместимость и отсутствие резкого измерения внутреннего диаметра. К измерительной камере устройства в виде трубки подсоединены штуцеры, благодаря которым происходит соединение измерительной камеры и молочных шлангов.

Для регистрации углового распределения интенсивности рассеянного света оптимально использовать восемь фотодиодов, расположенных по окружности с шагом 18° [88]. Используются фотодиоды ФД-263-01 с фоточувствительным элементом площадью 9 мм^2 и с пластиковой литой линзой. 3 группы фотодиодов охватывают угловые диапазоны прямого рассеяния (0° , 18° , 36°), бокового рассеяния (72° , 90° , 108°) и обратного рассеяния (144° , 162°).

Их количество обусловлено габаритными соображениями, количеством каналов аналогового кабеля и заданным распределением фотодиодов по диапазонам (фотодиоды №8-№7 используются для регистрации обратного рассеяния, сигнал от которых используется как нормирующая величина; №6-№4 используются для регистрации бокового рассеяния, по сигналу которых определяется жирность, №6 — основной, №5-№4 — дублирующие; №3-№1 используются для регистрации прямого рассеяния, по сигналу которых определяется наличие соматических клеток, №1 — основной, №3-№2 — дублирующие). В конструкции устройства также используются диафрагмы, ограничивающие параметры поля. ФД-263-01 работают в фотопроводящем режиме.

При усилении сигналы фотодиодов оцифровываются с применением АЦП ADS 1256, подключенным к микроконтроллеру Arduino Leonardo. Микроконтроллер включает лазерный модуль в прямоугольном режиме.

Оптическая схема модуля измерений устройства представлена на рисунке 2.16.



1 — лазерный диод с длиной волны 532 нм, 2 — цилиндрическая трубка внутренним диаметром 13 мм, 3 — фотодиоды №1-№8, 4 — кольцо с прямоугольными диафрагмами

Рисунок 2.16 – Оптическая схема модуля измерений

В модуле расчетов используется микроконтроллер Arduino Leonardo с микроконтроллером ATmega32U4. Корпус модуля расчетов создается с применением 3D-печати, из того же материала, что и модуль измерений. В ходе разработки была создана электрическая схема устройства, представленная в приложении Г. Данный микроконтроллер отличается от ATmega328 наличием USB порта, что позволяет осуществлять независимую коммуникацию через два последовательных интерфейса: один на базе USB порта, и второй совместимый с RS232 на TTL контактах D0 и D1 платы контроллера. При этом модуль Arduino Leonardo полностью совместим по назначению контактов с Arduino Uno, поэтому схема и прошивка могут использоваться на последнем без значительных модификаций. На микроконтроллер возложены следующие функции:

1. Коммуникация с внешним оборудованием по интерфейсу RS232.
2. Настройка микросхемы АЦП ADS1256 и получение результатов оцифровки аналоговых данных.
3. Управление полупроводниковым лазером для формирования последовательности измерения с помощью ключа Q1.

АЦП ADS1256 подключен по стандартному интерфейсу SPI, который в случае микроконтроллера ATmega32U4 реализован программно. Для того, чтобы гарантировать постоянные характеристики был использован специальная модульная плата, содержащая ADS1256, источник опорного напряжения, кварцевый резонатор, линейный стабилизатор напряжения, фильтры НЧ. Модуль подключается через разъемы JP1 (цифровой интерфейс) и JP2 (аналоговый интерфейс).

Для усиления сигналов с фотодиодов на двух четырехканальных операционных усилителях OP462 (IC1 и IC3) реализованы трансимпедансные усилители с сопротивлением обратной связи 1МОм (R1-R8).

Для формирования двухполярного питания для операционных усилителей и отрицательного напряжения питания фотодиодов используется DC-DC преобразователь DC1.

Фотодиоды и лазер подключаются к разъему SV1.

Схема компонентов устройства и их расположение в корпусе представлены на рисунке 2.17.

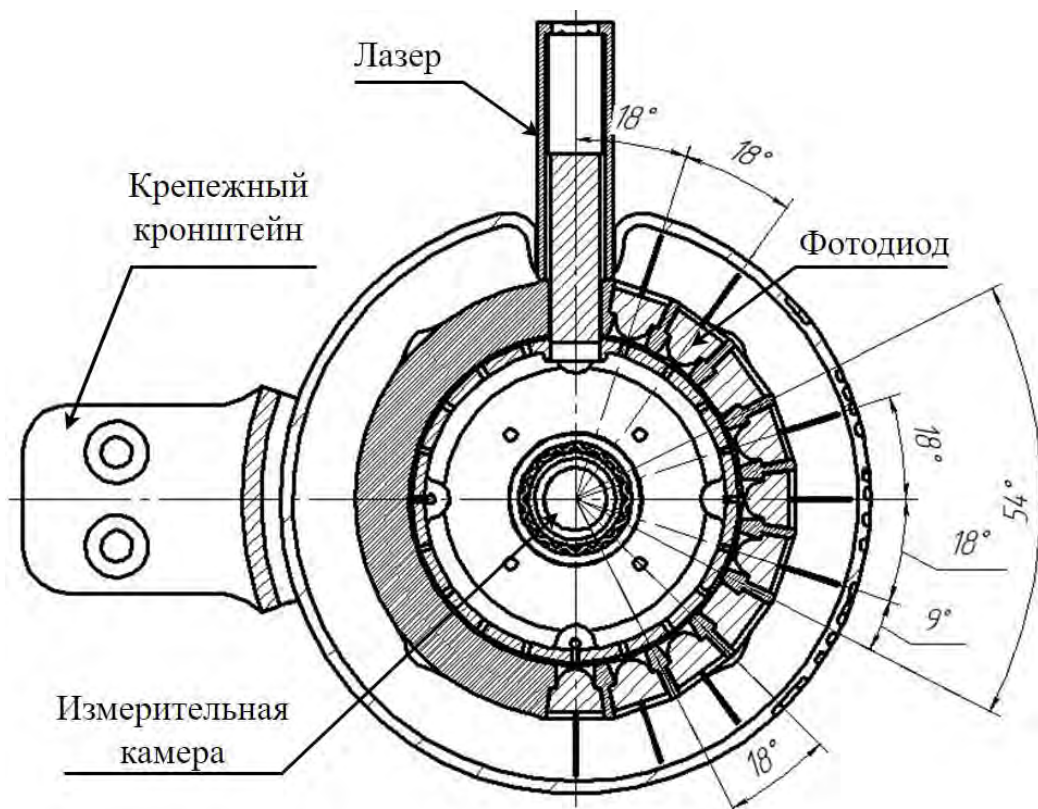
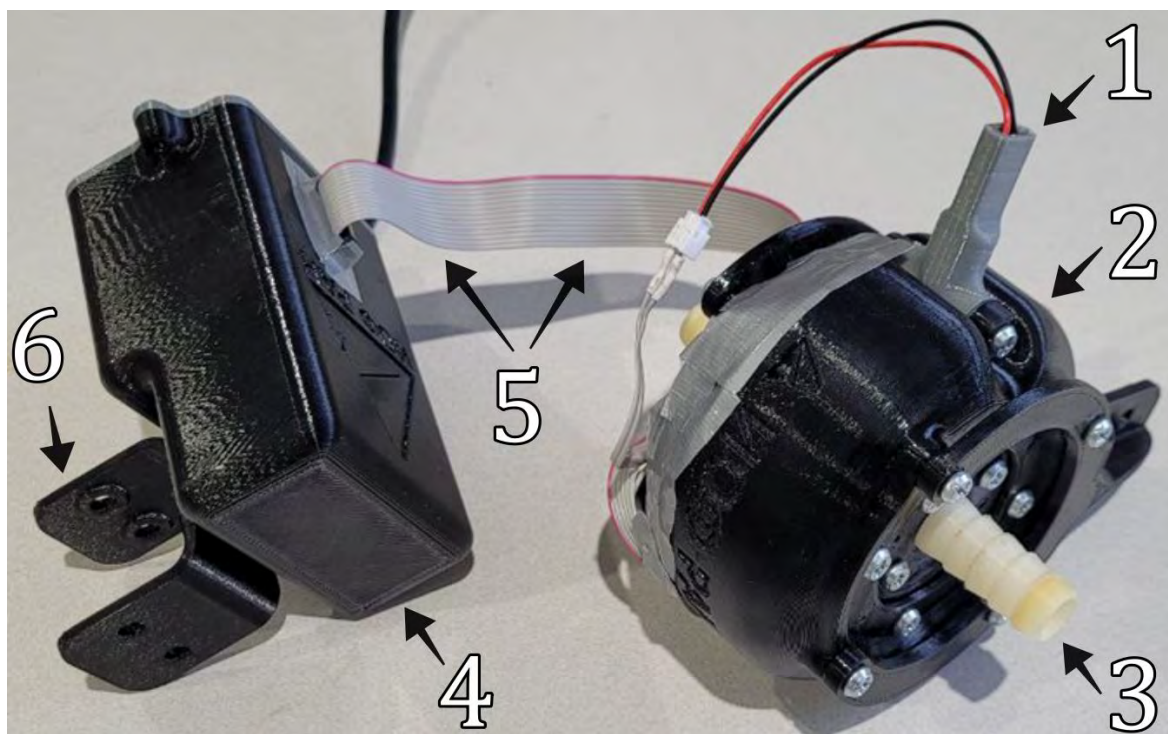


Рисунок 2.17 – Схема компонентов разработанного устройства

После разработки и обоснования компонентной базы устройства был создан образец для проведения лабораторных и натурных испытаний и проверки работоспособности оптического метода. Созданный образец устройства представлен на рисунке 2.18.



1 – полупроводниковый лазер, 2 – корпус модуля измерений, 3 – соединительный штуцер, 4 – корпус модуля расчетов, 5 – соединительный шлейф, 6 – кронштейн

Рисунок 2.18 – Фотография лабораторного прототипа прибора

Выводы по главе 2

1. Обоснована конструкция устройства с разделением на два модуля: модуль измерений с радиальным расположением компонентов, интегрируемый в молочный шланг доильной системы и модуль расчета для безопасного и компактного расположения контроллера. Обоснованы внутренний диаметр измерительной камеры устройства в диапазоне 10-15 мм для совместимости с молочными шлангами доильной системы и необходимая длина молочного шланга в 150 мм до и после точки интеграции устройства.

2. Разработана математическая модель протекания потока молоковоздушной смеси в молочном шланге доильной системы и измерительной

камере устройства, позволяющая рассчитать падение давления Δp при интеграции устройства. Рассчитана составляющая интегрированного устройства относительно длины молочного шланга, составляющая 7,13% от общей длины.

3. Проведено имитационное моделирование гидродинамических параметров потока молоковоздушной смеси, протекающей в молочном шланге доильной системы и измерительной камере разрабатываемого устройства. Выявлено, что существует разница скоростей потока молоковоздушной смеси ΔV до точки интеграции и после. При скоростях потока выше 0,3 м/с скорость потока после точки интеграции устройства в среднем на 14% выше, чем до точки интеграции. Обосновано отсутствие нарушения эффективности работы доильной системы и протекания потока молоковоздушной смеси в молочном шланге доильной системы при увеличении скорости на расчетные значения.

4. Обоснована методика расчета параметров качества молока в потоке, использующая спектроскопию рассеяния и измерение углового рассеяния света. Обосновано использование углов бокового рассеяния света (72° , 90° , 108°) для измерения процентной концентрации жира в молоке и углов прямого рассеяния света (0° , 18° , 36°) для проведения качественного анализа концентрации соматических клеток.

5. Разработаны алгоритм управления устройства экспресс-анализа качества молока и схема интеграции в работу доильной системы. Определена последовательность работы компонентов устройства, а также параметры работы устройства как в составе доильной системы, так и в автономном режиме.

6. Разработано и изготовлено устройство экспресс-анализа качества молока в процессе доения. С применением 3D-печати изготовлены штуцеры и корпус для модулей устройства. В качестве источника излучения установлен полупроводниковый лазер с длиной волны 532 нм, в качестве приемников установлены 8 кремниевых фотодиодов ФД-263-01. Внутренний диаметр измерительной камеры устройства задан равным 13 мм, что очень близко к внутреннему диаметру молочных шлангов доильной системы (14 мм) в месте интеграции устройства. Модули устройства соединены шлейфом для обеспечения связи объединенного питания.

ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ УСТРОЙСТВА ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА КАЧЕСТВА МОЛОКА

Для проведения экспериментов был разработан лабораторный стенд и составлены методики исследований. Задачами экспериментов было оценить работоспособность и точность разработанного устройства в лабораторных и производственных условиях в соответствии с поставленными основными задачами диссертации и результатами теоретического исследования. Принятая программа экспериментальных исследований включала 3 эксперимента:

Эксперимент 1. Разработка аппаратно-измерительного стенда и методики проведения лабораторного исследования работоспособности устройства экспресс-анализа качества молока для анализа процентной концентрации жира в потоке молоковоздушной смеси. Цель эксперимента в оценке работоспособности и точности устройства экспресс-анализа качества молока в лабораторных условиях при измерении процентной концентрации жира в потоке молоковоздушной смеси. В разработанном экспериментальном стенде устройство будет встроено в молочный шланг на участке между коллектором и счетчиком молока. Результаты эксперимента позволят проверить работоспособность устройства при работе в составе доильной системы с производительностью от 1 до 6 л/мин и оценить точность измерения процентной концентрации жира в молоке. Также будет исследовано влияние пространственных параметров установки устройства на точность измерений.

Эксперимент 2. Разработка методики проведения лабораторного исследования для определения устройством экспресс-анализа качества молока процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в процессе доения. Цель эксперимента в оценке

работоспособности и точности устройства экспресс-анализа качества молока в лабораторных условиях при измерении процентной концентрации жира и при проведении качественного анализа концентрации соматических клеток в молоке. В разработанном экспериментальном стенде устройство будет встроено в молочный шланг на участке между коллектором и счетчиком молока. Результаты эксперимента позволят проверить работоспособность устройства при работе в составе доильной системы с производительностью от 1 до 6 л/мин, а также оценить точность измерения процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в молоке.

Эксперимент 3. Разработка методики проведения натурного эксперимента по определению устройством экспресс-анализа качества молока процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в процессе доения. Цель эксперимента в оценке работоспособности и точности устройства экспресс-анализа качества молока на действующей молочно-товарной ферме при измерении процентной концентрации жира и проведении качественного анализа концентрации соматических клеток. Результаты эксперимента позволят проверить работоспособность устройства при интеграции в доильную систему, а также оценить точность измерения процентной концентрации жира и проведение качественного анализа концентрации соматических клеток в процессе доения молочных коров.

3.1 Разработка аппаратно-измерительного стенда для исследования работы устройства экспресс-анализа качества молока в потоке молоковоздушной смеси

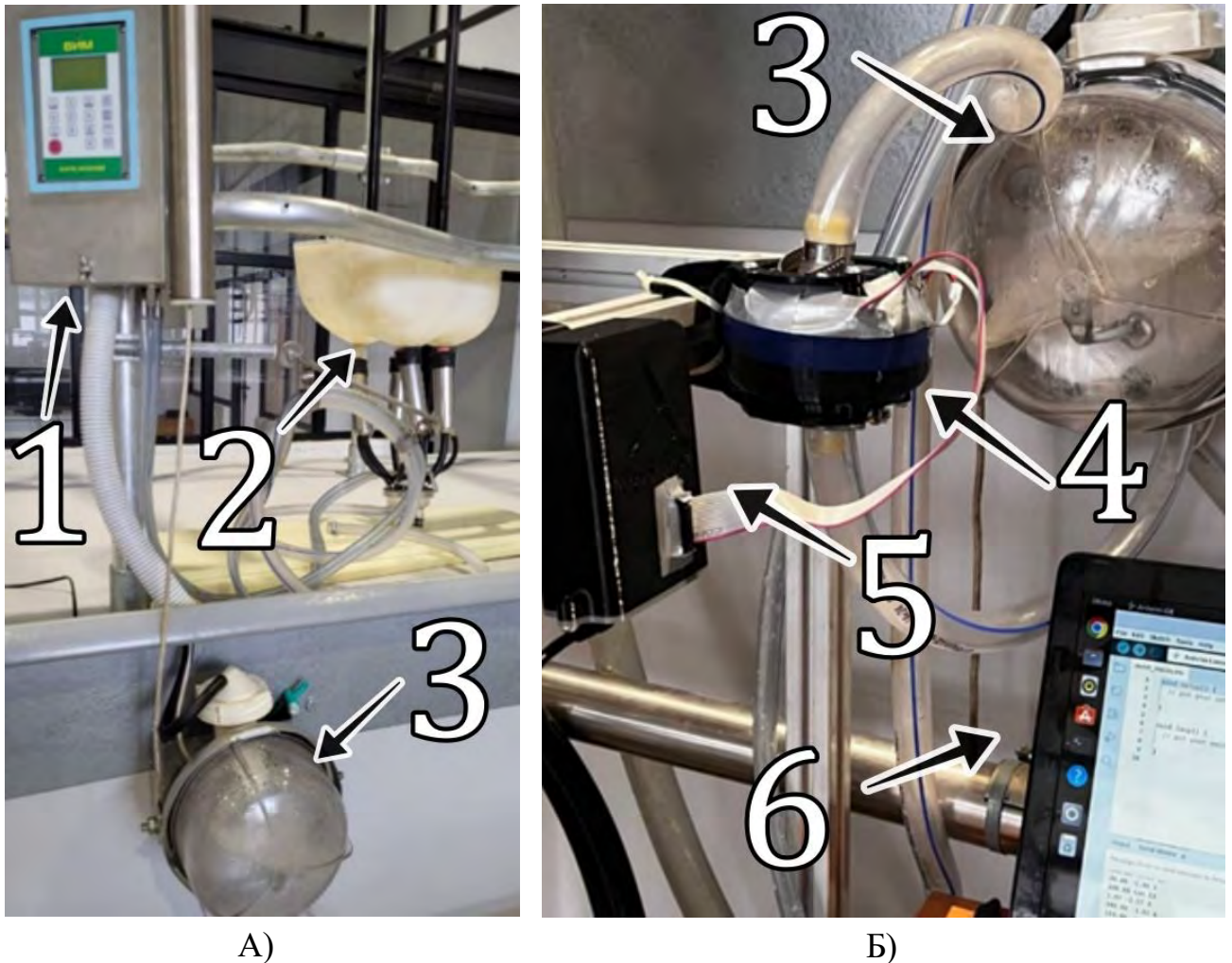
Для проведения исследования был разработан экспериментальный стенд на основе доильной системы типа «Елочка». Цель испытаний – определить работоспособность устройства и точность измерения процентной концентрации жира в молоке.

Стенд состоит из 3 основных модулей:

1. Доильная система типа «Елочка».
2. Устройство экспресс-анализа качества молока в процессе доения.
3. Резервуар и молочные шланги для создания замкнутой системы циркулирования молоковоздушной смеси.

Поскольку только один из двух модулей устройства экспресс-анализа качества молока подключается к молочному шлангу, монтаж модулей в экспериментальном стенде производится разными способами: модуль расчета был неподвижно закреплен на одной из балок экспериментального стенда с помощью кронштейна; модуль измерений был зафиксирован в молочном шланге экспериментального стенда с использованием двух хомутов и дополнительно неподвижно закреплен на одной из балок экспериментального стенда с помощью кронштейна. Модули связаны шлейфом, поэтому максимальное расстояние между ними составляет 150 мм.

Фотографии изготовленного экспериментального стенда представлены на рисунке 3.1 и включают в себя изображения панели управления доильной системой, макета вымени коровы с подключенными доильными стаканами (заполняемого молоком при проведении экспериментального исследования), счетчик молока типовой доильной системы типа «Елочка», послужившей основой экспериментального стенда (рисунок 3.1А), а также подключенное к молочному шлангу экспериментального стенда устройство экспресс-анализа качества молока и компьютер с выводимыми результатами измерений (рисунок 3.1Б).



А – Вид доильной системы, Б – Установленное устройство экспресс-анализа качества молока
 1 – контроллер управления доильной системы, 2 – макет вымени и доильные стаканы, 3 – счетчик молока, 4 - модуль измерений устройства, 5 – модуль расчетов устройства, 6 - компьютер

Рисунок 3.1 – Экспериментальный стенд

Задача экспериментального исследования заключалась в определении точности измерения процентной концентрации жира в молоке, поэтому экспериментальный стенд был изготовлен для обеспечения проведения множества измерений при круговой циркуляции молока в молочном шланге стенда. Фактически назначением стенда было обеспечение многократных измерений для получения статистически значимых результатов измерения точности работы устройства.

3.2 Разработка методики проведения лабораторного исследования работоспособности устройства экспресс-анализа качества молока для анализа процентной концентрации жира в потоке молоковоздушной смеси

Для исследования работоспособности устройства используется специально изготовленный экспериментальный стенд, включающий доильную систему, в молочном шланге которой протекает поток молоковоздушной жидкости и дополнительный резервуар для молока. Конструкция стенда позволяет прокачивать молоко в замкнутом цикле неограниченное время, однако делать это дольше 30 минут не рекомендуется из-за разрушения структуры молока при длительной прокачке в молочных шлангах экспериментального стенда.

Для проведения лабораторного эксперимента необходимо выполнить следующие шаги:

1. Заполнить макет вымени молоком.
2. Подключить устройство экспресс-анализа качества молока к компьютеру и запустить программу вывода результатов измерений.
3. Включить экспериментальный стенд и задать режим максимальной производительности (6 л/мин).
4. Фиксировать результаты измерений (программа вывода результатов измерений позволяет переносить результаты в файл текстового редактора компьютера).

Устройство интегрируется в молочный шланг экспериментального стенда и фиксируется кронштейном на специальном креплении в различных положениях относительно вертикальной оси. Для исследования используется молоко жирностью 2,5%. Измерения проводятся по 12 раз с различными вариациями пространственного положения. Устройство проводит измерение каждые 12 секунд, что соответствует 5 измерениям в минуту. Программа вывода результатов измерений также указывает точное время при выводе результата измерения.

Оценка точности работы устройства проводится сравнением результатов, полученных устройством экспресс-анализа качества молока, со значением жирности молока, полученным эталонным сертифицированным устройством анализа качества молока. Эталонными способами параметры молока измеряются до и после проведения эксперимента путем забора и анализа двух проб молока (для оценки процентной концентрации жира в молоке используется анализатор качества молока Лактан 1-4М, производства ООО ВПК "СибagroПРИБОР" определяющий массовую долю жира в молоке в диапазоне 0-10% с пределом допускаемых значений систематической составляющей основной абсолютной погрешности 0,1%).

Применение пробоанализатора качества молока Лактан 1-4М обусловлено его относительной компактностью (возможность доставить в лабораторию, где проводилось экспериментальное исследование работы устройства экспресс-анализа качества молока), возможностью с высокой точностью измерить процентную концентрацию жира в молоке и простотой работы с анализатором, не требующей привлечения специалиста.

3.3 Разработка методики проведения исследований по определению устройством экспресс-анализа качества молока процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси

Методика исследования включает оценку двух параметров качества молока: процентная концентрация жирности и качественный анализ концентрации соматических клеток. Для проведения исследования необходимы эталонный анализатор качества молока для оценки процентной концентрации жирности и референсный способ качественной оценки концентрации соматических клеток. По причине логистической недоступности доставки сырого коровьего молока с высокой концентрацией соматических клеток для проверки точности

качественного анализа концентрации соматических клеток в молоке были использованы клетки карциномы молочной железы человека размером около 20 мкм, разбавленные в молоке для обеспечения концентрации в 1×10^6 клеток на миллилитр, используя существующую методику создания модели соматических клеток [89].

Для исследования используется стенд, описанный в разделе 3.1.

Для проведения лабораторного эксперимента необходимо выполнить следующие шаги:

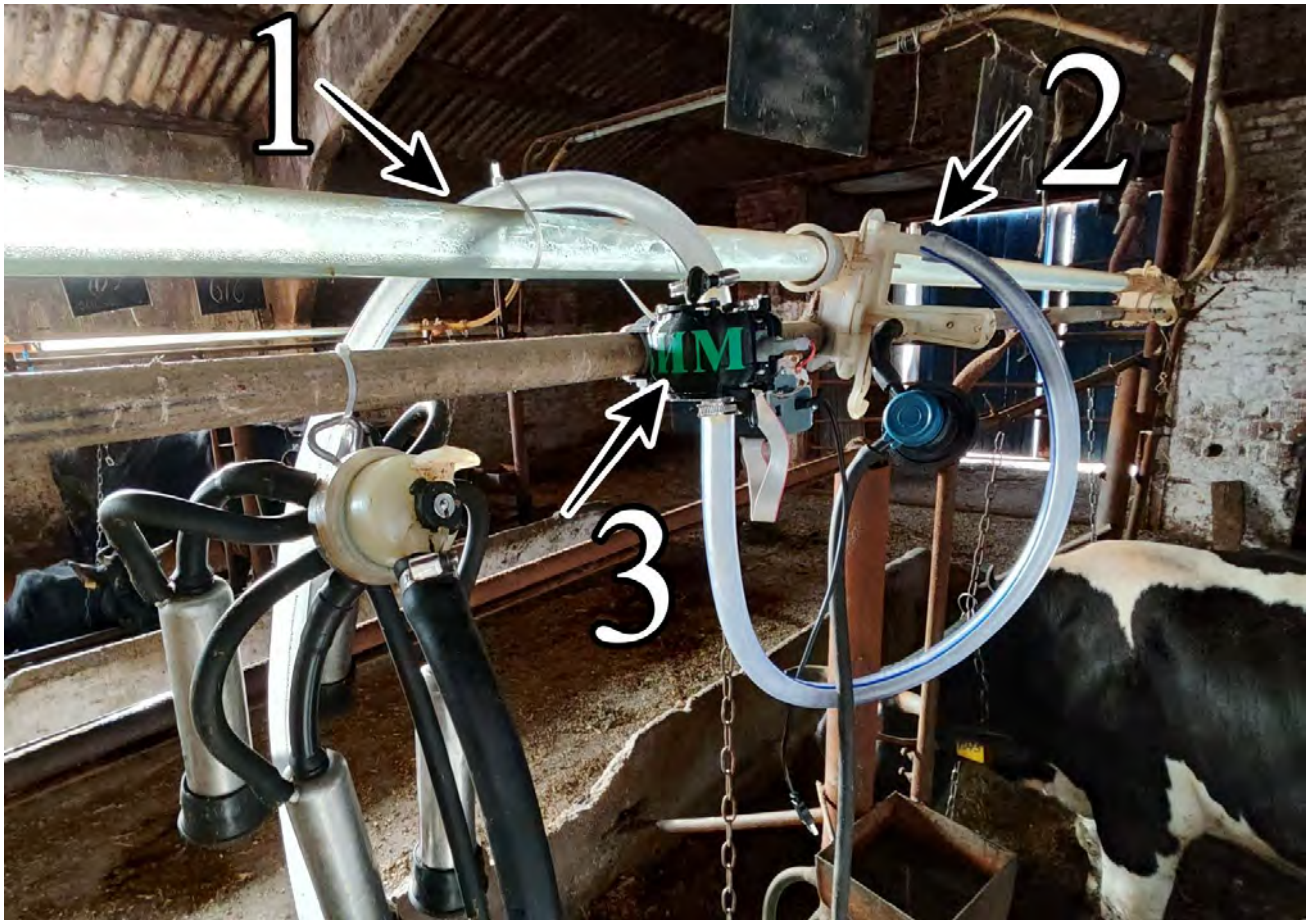
1. Заполнить макет вымени молоком, где растворены клетки, используемые в качестве аналога соматических клеток;
2. Подключить устройство экспресс-анализа качества молока к компьютеру и запустить программу вывода результатов измерений;
3. Включить экспериментальный стенд и задать режим максимальной производительности (6 л/мин);
4. Фиксировать результаты измерений (программа вывода результатов измерений позволяет переносить результаты в файл текстового редактора компьютера).

Измерения проводятся по 32 раза с каждым типом молока. Устройство проводит измерение каждые 12 секунд, что соответствует 5 измерениям в минуту. Программа вывода результатов измерений также указывает точное время при выводе результата измерения.

Оценка точности работы устройства проводится сравнением результатов, полученных устройством экспресс-анализа качества молока, с процентной концентрацией жирности и качественным анализом концентрации соматических клеток, полученными эталонным способами, описанными выше. Эталонным способом молоко измерялось на жирность до и после проведения эксперимента путем забора и анализа двух проб молока (для оценки процентной концентрации жира в молоке используется анализатор качества молока Лактан 1-4М).

3.4 Разработка методики проведения натурного эксперимента по определению устройством экспресс-анализа качества молока процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси

Методика исследования включает оценку процентной концентрации жирности и качественный анализ концентрации соматических клеток в молоке, протекающем турбулентным потоком в молочном шланге доильной установки. Исследование проводится на действующей молочно-товарной ферме ФГБУ ОПЫТНАЯ СТАНЦИЯ «СНЕГИРИ», Московская область, н.п. Рождествено. Животные на ферме находятся на привязном содержании, доение производится дважды в сутки в молочную линию. Для эксперимента на ферме были отобраны 3 группы животных, находящихся в статусе «здоровые» и 1 группа животных, находящихся в статусе «субклинический мастит». Животные, чье молоко было исследовано, имели одинаковый рацион, находились на одной стадии лактации и содержались в одном помещении. Натурный эксперимент проводился во время утренней дойки. Для обеспечения возможности оценить точность работы устройства относительно молока каждого животного, доение во время эксперимента производилось в доильное ведро. Устройство экспресс-анализа качества молока подключалось в молочный шланг доильной установки на участке между коллектором и доильным ведром. После доения зоотехником собирались пробы молока для проведения анализа эталонным методом (для оценки процентной концентрации жира в молоке используется анализатор качества молока Лактан 1-4М, для качественного анализа концентрации соматических клеток используется препарат Кенотест). Изображение подключенного устройства перед началом испытаний продемонстрировано на рисунке 3.2.



1 – молочная линия, 2 – подключение молочного шланга к молочной линии, 3 – устройство экспресс-анализа качества молока

Рисунок 3.2 – Подготовленное к доению устройство экспресс-анализа качества молока

Методика проведения исследования:

1. Подключить устройство экспресс-анализа качества молока в молочный шланг доильной системы на участке между коллектором и доильным ведром, зафиксировав молочный шланг червяными хомутами.
2. Зафиксировать кронштейны измерительного и вычислительного модулей устройства на трубе вакуумной линии доильной системы.
3. Подключить устройство к компьютеру, запустить на компьютере программу вывода результатов измерений в реальном времени.
4. Провести доение животного в доильное ведро.
5. Отключить доильные стаканы, завершить процесс доения животного.

6. Сохранить полученные результаты измерений процентной концентрации жира и количественной концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси на компьютере.

7. Взять 2 пробы молока из доильного ведра для проведения сравнения точности работы устройства, опорожнить и промыть доильное ведро.

8. Повторить пункты 4-7 не менее 5 раз.

9. Опорожнить и промыть доильное ведро, закрыть программу вывода результатов измерений, отключить устройство от доильной установки, промыть измерительную камеру устройства.

10. У собранных проб молока (по 2 на каждое животное) проверить процентную концентрацию жира и провести качественный анализ концентрации соматических клеток эталонными методами, описанными выше, результаты внести в протокол испытаний.

Выводы по главе 3

1. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд для исследования работоспособности устройства и точности измерения процентной концентрации жира в потоке молоковоздушной смеси устройством экспресс-анализа качества молока.

2. Разработана методика проведения лабораторного исследования работоспособности устройства и точности измерения процентной концентрации жира в потоке молоковоздушной смеси устройством экспресс-анализа качества молока.

3. Разработана методика проведения лабораторного исследования точности измерения процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси устройством экспресс-анализа качества молока.

4. Разработана методика проведения натурного эксперимента по определению устройством экспресс-анализа качества молока процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси в процессе доения на молочной ферме.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты экспериментального исследования работоспособности устройства для измерения процентной концентрации жира в потоке молоковоздушной смеси

Для исследований использовалось коровье молоко жирностью 2,5%. Работающее устройство экспресс-анализа качества молока проводит измерение параметров качества молока каждые 12 секунд независимо от наличия молока в измерительной камере устройства, поэтому значения в моменты отсутствия молока в измерительной камере устройства были исключены из результатов. Жирность молока была измерена эталонным устройством анализа качества молока (Лактан 1-4М).

Изначально, при проведении эксперимента наклон модуля измерений устройство не регламентировался и устройство могло быть расположено в трех положениях относительно вертикальной оси – 45° , 30° и 0° . Для обеспечения статистической значимости и соответствия методике проведения испытаний предполагалось провести по 12 измерений с каждым типом пространственного положения. Первые измерения показали, что при положении датчика под углами в 30° и 45° показатели являлись неудовлетворительными, включая нулевые и отрицательные значения. Для вертикального положения в 0° к вертикальной оси результаты оказались значительно точнее. Для изучения влияния положения устройства в пространстве было проведено по 12 измерений в каждом из трех положений. Результаты этих измерений показаны на рисунке 4.1.

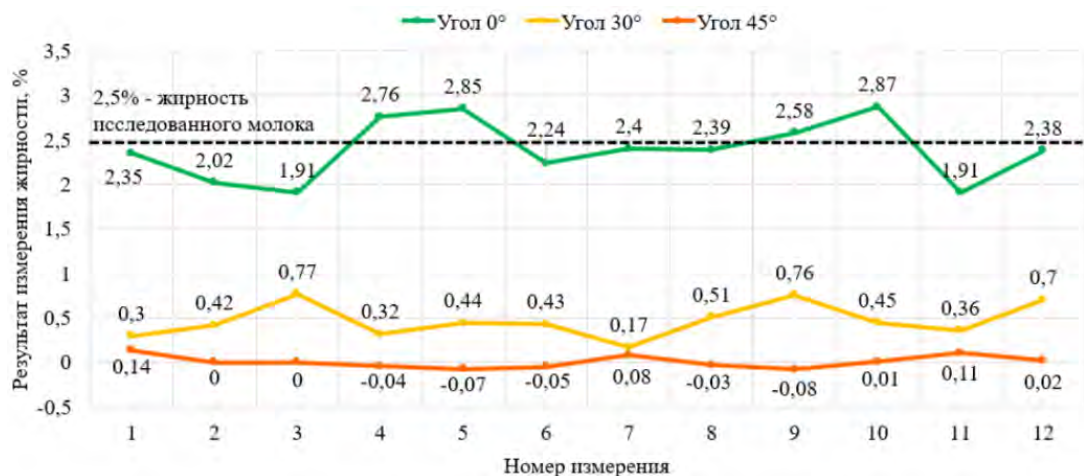


Рисунок 4.1 – Результаты исследования с различными положениями устройства относительно вертикальной оси

Было принято решение адаптировать методику проведения испытаний и устройство было зафиксировано в вертикальном положении для всех дальнейших испытаний, в результате показатели измерений стабилизировались.

Среднее значение $\pm$ стандартное отклонение составили $(2,54 \pm 0,06) \%$. Достоверность результатов подтверждена при $P < 0,05$.

При жирности молока в 2,5% точность измерения жира в молоке прототипа датчика можно считать соответствующей поставленным задачам при условии вертикального расположения прототипа датчика. Изображение устройства в момент проведения эксперимента представлено на рисунке 4.2.



1 – молочный шланг, заполненный молоковоздушной смесью, 2 – модуль измерений устройства, 3 – модуль расчетов устройства, 4 – компьютер для сбора результатов

Рисунок 4.2 – Устройство в момент проведение эксперимента

Длина вертикального расположения молочного шланга до соединения со штуцером устройства составляла ~100 мм. Этого оказалось достаточно для протекания в измерительной камере устройства измеримого потока молоковоздушной смеси.

4.2 Результаты лабораторного исследования точности измерения процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси

Для испытаний использовалось коровье молоко жирностью 2,51% и 3,17%. Работающее устройство экспресс-анализа качества молока проводит измерение параметров качества молока каждые 12 секунд независимо от наличия молока в измерительной камере устройства, поэтому значения в моменты отсутствия молока в измерительной камере устройства были исключены из результатов. Жирность молока была измерена эталонным устройством анализа качества молока (Лактан 1-4М). Для проверки точности оценки количественной концентрации соматических клеток в молоко были добавлены клетки морских водорослей количестве 1×10^6 клеток. Для обеспечения статистической значимости и соответствия методике проведения испытаний было проведено по 32 измерения молока обеих жирностей.

На первом этапе эксперимента была проверена точность работы устройства с молоком жирностью 2,5% и количеством соматических клеток 1×10^6 . В результате среднее значение $\pm$ стандартное отклонение жирности составили ($2,62 \pm 0,16$) %, а коэффициент соматических клеток ($0,097 \pm 0,006$) у.ед., что соответствует диапазону 900-1000 тыс. соматических клеток. Достоверность результатов подтверждена при $P < 0,05$.

На втором этапе эксперимента была проверена точность работы устройства с молоком жирностью 3,17% и количеством соматических клеток 10^6 . В результате эксперимента среднее значение $\pm$ стандартное отклонение жирности составили ($3,32 \pm 0,20$) %, а коэффициент соматических клеток ($0,094 \pm 0,005$)

у.ед., что также соответствует диапазону 900-1000 тыс. соматических клеток. Достоверность результатов подтверждена при $P < 0,05$.

Таблица результатов лабораторного исследования представлена в Приложении Д.

Для наглядности результаты измерений двух этапов лабораторного эксперимента представлены на рисунках 4.3 и 4.4, которые визуальнo демонстрируют показатели точности разработанного устройства. На графике 4.3 визуальнo можно оценить результаты по измерению жирности молока, а на графике 4.4 качественного анализа концентрации соматических клеток.



Рисунок 4.3 – Результаты испытаний точности устройства по измерению процентной концентрации жира в молоке



Рисунок 4.4 – Результаты испытаний точности устройства по проведению качественного анализа концентрации соматических клеток

Из результатов эксперимента можно сделать вывод о погрешности средних значений измеряемой жирности молока в $\sim 0,1-0,2\%$ жирности измеряемого

молока, а разовые измерения имеют максимальную погрешность менее 0,5% жирности. При этом, если оценивать среднее значение и стандартное отклонение, результаты показали меньшую среднюю погрешность.

Для оценки однородности полученных результатов использовался коэффициент вариации, благодаря которому можно оценить полученные выборки данных. Точность работы устройства в ходе проведенного лабораторного исследования позволит сделать предположения о достоверности и применимости сбора массива цифровых данных и последующего анализа ветеринарами для оценки стада. Рассчитанный коэффициент вариации c_v измерений был определен с использованием отношения стандартного отклонения выборки σ к среднему значению выборки x по формуле (4.1):

$$C_v = \frac{\sigma}{x} \quad (4.1)$$

Максимальный коэффициент вариации составил 6%, что демонстрирует стабильность работы устройства. Подробное изучение массива цифровых данных, которые будут получены при производственных испытаниях устройства помогут находить даже слабо выраженные закономерности изменения параметров качества молока животных.

Поскольку в процессе доения выдаивается молоко двух типов – цистернальное и альвеолярное, то и ошибка измерений может измениться. В известных исследованиях было выявлено, что жирность этих двух фракций может значительно отличаться [26]. Цистернальное молоко находится в крупных молочных ходах вымени и в сосках, оно выдаивается первым и, при этом, обладает невысокой жирностью. Альвеолярное молоко, содержащееся в мелких и средних молочных ходах, обладает гораздо большей жирностью и, теоретически, может превысить 10% жирности, являющихся максимальным измеряемым значением. Литературный поиск показал, что жирность последних струек альвеолярного молока может достичь 9% при доении черно-пестрой породы [26].

При проведении натурного эксперимента на молочной ферме будет очень важным фактором изменение жирности от начала до окончания процесса доения.

Одним из потенциальных преимуществ разрабатываемого устройства экспресс-анализа качества молока является возможность отслеживать переход от цистернального молока к альвеолярному и, в перспективе, проводить сепарирование молока большей жирности (например, для изготовления сыра и аналогичных продуктов, которым требуется повышенный уровень жирности).

Стоит отметить, что на возможную точность результатов исследования может оказывать влияние загрязнение молочных шлангов. В лабораторной установке промывка молочных шлангов производится своевременно и в соответствии с инструкцией по эксплуатации, поэтому молочные шланги сохраняют свою функциональность. Однако в производственных условиях возможны нарушения условий эксплуатации, что может привести к загрязнению протекающего в молочных шлангах доильной системы потока молоковоздушной смеси и возможному снижению точности измерений устройством.

4.3 Результаты натурного эксперимента по определению устройством экспресс-анализа качества молока процентной концентрации жира и качественного анализа концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси

Эксперимент проводился с 4 группами животных, включая 3 группы здоровых животных, сформированных по показателю жирности производимого молока и 1 группы животных с диагнозом «субклинический мастит», также проводилось сравнение результатов с эталонным методом для оценки точности. В каждой группе было по 5 животных. Ввиду технической невозможности проводить сбор проб молока для измерения эталонным методом, сравнивались средний результат, измеренный устройством и измерение эталонным способом пробы молока, взятой из доильного ведра по окончании доения. Таким образом,

можно сравнить соответствуют ли дискретные измерения одному среднему анализу всего надоя. Результаты эксперимента приведены в Приложении Е. Акт натурных испытаний приведен в приложении Ж.

Среднее значение $\pm$ стандартное отклонение измерений по каждой из 4 групп животных составили $(4,13 \pm 1,04) \%$, $(4,15 \pm 1,02) \%$, $(4,31 \pm 0,94) \%$ и $(3,29 \pm 1,02) \%$. У здоровых животных устройство не выявило повышенных значений соматических клеток, для группы с маститом среднее значение индекса соматических клеток составило $(0,072 \pm 0,003)$ у.ед., что соответствует ~ 700 тыс. клеток/мл. Средние значения жирности измеренного в процессе доения молока по группам представлены на рисунке 4.5. На графике видно, что устройство позволяет выявлять момент перехода от цистернального к альвеолярному молоку.

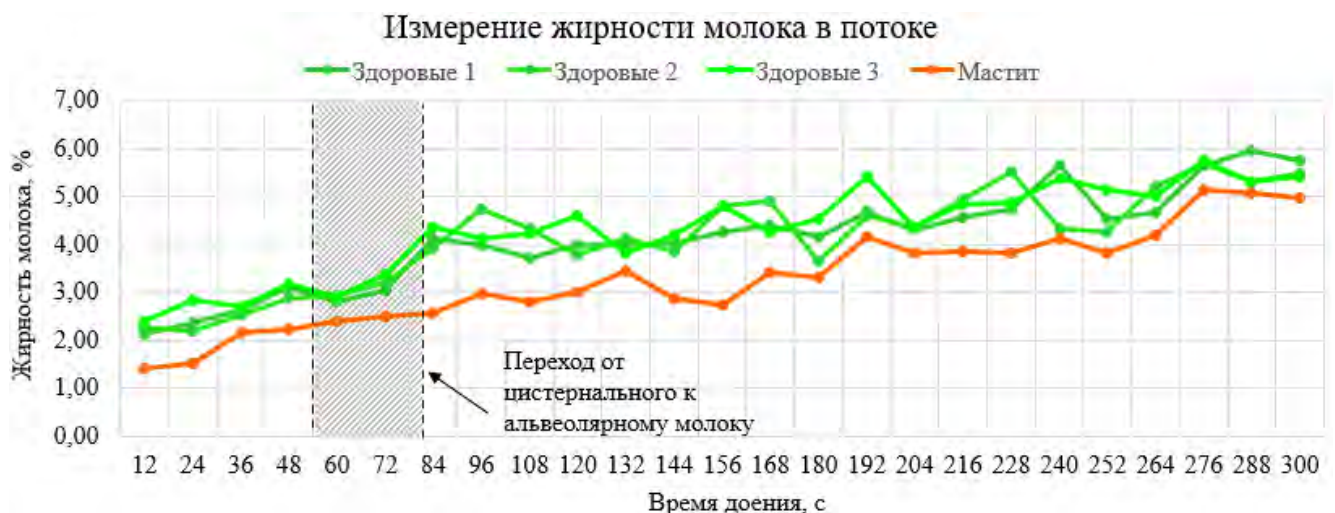


Рисунок 4.5 – Результаты испытаний точности устройства по проведению качественного анализа концентрации соматических клеток

Из графика также можно сделать вывод о значительном различии показателей жирности молока после 3-й минуты доения в разных группах животных.

Помимо прямых помех измерению жирности молока – наличию воздушных пузырьков в молоковоздушной смеси и недостаточному заполнению

измерительной камеры молоком было предположения о потенциальном влиянии патогенной микрофлоры в молочных шлангах доильной системы.

В результате более полного исследования, включавшего изучение гигиенических параметров внутренней поверхности молочного шланга на расстоянии 30–50 см от доильных стаканов, была определена концентрация *S. aureus* и *S. Epidermidis*. Исследование показало, что у здоровых животных общее микробное число в сыром молоке находится в пределах нормы ($1,2 \times 10^4$ КОЕ/мл), а количество стафилококков превышено до $1,4 \times 10^3$ КОЕ/мл.

У животных, заболевших маститом и находящихся на лечении с помощью антибиотиков общее микробное число выше, чем в сыром молоке и составляет $9,2 \times 10^4$ КОЕ/мл, но количество стафилококков в разы ниже — $5,0 \times 10^1$ КОЕ/мл [91]. Наличие патогенной микрофлоры даже в молоке здоровых животных подтверждает необходимость санитарной обработки доильного оборудования, включая устройство экспресс-анализа качества молока.

В результате натурного эксперимента удалось оценить работоспособность устройства для определения изменения жирности молока в процессе доения, проверить возможность проведения качественного анализа концентрации соматических клеток и доказать применимость бесконтактного поточного анализа качества молока в условиях действующей молочно-товарной фермы.

Выводы по главе 4

1. Проведен лабораторный эксперимент по исследованию работоспособности устройства. Определены оптимальные технические условия установки устройства, определена точность измерения процентной концентрации жира в потоке молоковоздушной смеси для коровьего молока жирностью 2,5%.

Результаты измерений составили $(2,54 \pm 0,06)$ % соответственно. Подтверждена работоспособность устройства.

2. Проведен лабораторный эксперимент по исследованию точности измерения процентной концентрации жира и точности качественного анализа концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси для коровьего молока жирностью 2,51% и 3,17%. Результаты измерений процентной концентрации жира составили $(2,62 \pm 0,16)$ % и $(3,32 \pm 0,20)$ % соответственно. Результаты качественного анализа концентрации соматических клеток составили $(0,097 \pm 0,006)$ у.ед. и $(0,094 \pm 0,005)$ у.ед., что также соответствует диапазону 900-1000 тыс. соматических клеток на миллилитр. Коэффициент вариации для измерений составил 6%. Из результатов эксперимента можно сделать вывод о погрешности средних значений измеряемой жирности молока в $\sim 0,1-0,2\%$ жирности измеряемого молока, а разовые измерения имеют максимальную погрешность менее 0,5% жирности.

3. Проведен натурный эксперимент по исследованию точности измерения процентной концентрации жира и точности качественного анализа концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси в процессе доения на ферме. Эксперимент проведен с 3 группами здоровых животных и 1 группой с диагнозом «субклинический мастит». Среднее значение $\pm$ стандартное отклонение измерений по каждой из 4 групп животных составили $(4,13 \pm 1,04)$ %, $(4,15 \pm 1,02)$ %, $(4,31 \pm 0,94)$ % и $(3,29 \pm 1,02)$ %. У здоровых животных устройство не выявило повышенных значений соматических клеток, для группы с маститом среднее значение индекса соматических клеток составило $(0,072 \pm 0,003)$ у.ед., что соответствует ~ 700 тыс. клеток/мл.

ГЛАВА 5. ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО УСТРОЙСТВА ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА КАЧЕСТВА МОЛОКА

5.1 Расчет себестоимости устройства экспресс-анализа качества молока

Прогнозируемый объем рынка для устройства анализа качества молока составляет 2000 шт. в год в период с 2025 по 2027 годы. Для расчётов себестоимости устройства установлено, что потенциальное производство составит 1000 шт. в год или 84 шт. в месяц. Расчет себестоимости в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Расчет себестоимости устройства экспресс-анализа качества молока

Наименование	Ед. изм	Кол-во	Цена	Сумма
Расчет переменных издержек				
Модуль измерений				
Источник излучения	шт.	1	2 780 Р	2 780 Р
Приемник излучения	шт.	8	250 Р	2 000 Р
Кварцевая молочная трубка	шт.	1	2 000 Р	2 000 Р
Штуцер	шт.	2	1 000 Р	2 000 Р
Корпус	шт.	1	3 000 Р	3 000 Р
Модуль расчета				
Контроллер	шт.	1	3 000 Р	3 000 Р
Корпус	шт.	1	2 000 Р	2 000 Р
Программное обеспечение				
ПО для работы устройства	лицензия	1	10 000 Р	10 000 Р
Затраты на сборку устройства				
Затраты человеко-часов на сборку и калибровку устройства	чел/час	2	887 Р	1 774 Р
Расчет постоянных издержек				
Рекламные расходы	мес	1	53 500 Р	53 500 Р
З/п 2-х работников-сборщиков устройства	мес	1	149 000 Р	149 000 Р
З/п административного работника	мес	1	80 000 Р	80 000 Р
Арендные расходы	мес	1	14 000 Р	14 000 Р
Прочие расходы	мес	1	55 000 Р	55 000 Р
Итого себестоимость				29 966 Р
Добавленная стоимость 30% при реализации				8 990 Р
Отпускная стоимость				38 956 Р

При расчетах используется описанное в предыдущих главах устройство, состоящее из двух модулей. Программное обеспечение представляет собой программный код, обеспечивающий работу устройства при контроле параметров качества молока в процессе доения. Лицензия ПО единоразово приобретается. Рекламные расходы посчитаны исходя из необходимости размещения рекламы на интернет-ресурсах. Прочие расходы включают канцелярию, оплату банковских услуг, командировок, амортизационным и ремонтным отчислениям и пр.

В результате расчета себестоимость устройства определена в 29 966 рублей. Отпускная стоимость составляет 38 956 рублей. Расчет актуален на май 2024 года.

5.2 Расчет окупаемости устройства экспресс-анализа качества молока

Окупаемость устройства складывается из двух факторов: экономии на проведение лабораторных анализов количественной концентрации соматических клеток в молоке, а также на раннем определении заболевания маститом (в субклинической форме). Возможность разработанного устройства оценивать процентную концентрацию жира в молоке также повышает осведомленность фермера о качестве производимой продукции, но, в соответствии с Приказом Министерства сельского хозяйства РФ от 28 июня 2021 г. N 421 "Об утверждении Ветеринарных правил назначения и проведения ветеринарно-санитарной экспертизы молока и молочных продуктов, предназначенных для переработки или для реализации на розничных рынках" не является заменой лабораторному анализу, поскольку фермеру также требуется одновременное подтверждение уровня белка, лактозы и т.д. Расчеты с использованием базовых сценариев основаны на разработанном Юрочкой С.С. методе оценки экономической эффективности внедрения разработок в молочном животноводстве [92].

Расчет затрат тестов на мастит основывается на распространенном ручном методе – из каждой четверти вымени сдаивают немного молока и помещают в емкость, где находится жидкость для определения мастита. Средний объем емкости с жидкостью для определения мастита 1 л, на измерение для одной

коровы используется по 2 мл жидкости на четверть, итого по 8 мл на корову. Для стада в 600 голов потребуется 4,8 л жидкости (при средней стоимости в 2024 году 900р за литр). В соответствии с Приказом Министерства сельского хозяйства РФ от 28 июня 2021 г. № 421, фермам, коммерчески реализующим молоко, необходимо проводить тест на мастит каждые 10 дней.

Проведем расчет стоимости тестов на мастит при проверке физиологического состояния каждого животного в стаде:

$$C_T = (Q_z * Z_c * \frac{T_L}{T_T} * P_L) + (Q_z * P_T) \quad (5.1)$$

где Q_z – общее количество животных, голов;

Z_c – общий расход препарата для анализа мастита, мл;

T_L – длительность лактации, когда полученное молоко реализуется, дн;

T_T – временные промежутки тестирования животных по нормативам, дн;

P_L – стоимость литра жидкости для анализа, руб;

P_T – стоимость работы по проведению тестов на мастит, из условия оплаты в 525 рублей в час и 10 минут на каждый тест, руб.

Итого, расчетная стоимость тестирования стада на мастит (по формуле 5.1) составит:

$$C_T = \left(600 * 0,008 * \frac{305}{10} * 900 \right) + (600 * 87,5) = 186\,420 \text{ руб/год.}$$

Расчет экономии на раннем определении заболевания маститом (в субклинической форме). Для расчетов ориентиром является стоимость молока от Dairy Index DIA. В расчете используем стоимость молока, равную 35,88 руб/кг, где жирность молока 3,6%, уровень белка 3,0%.

Сроком расчетов выберем 365 дней (календарный год). За среднюю длительность лечения примем 14 дней. В случае обнаружения мастита в стадии субклинического, срок лечения 7 дней. Заболеваемость маститом составляет около 10% животных ежегодно.

Например, если корова заболевает маститом 1 января, заболевание было выявлено в стадии субклинического, тогда через 7 дней здоровое животное

выйдет на плановый удой. В случае невиявления мастита на стадии субклинического, животное останется удоем, сниженным на 15% [24], [93]-[94]. Также в расчетах проводилось сравнение стоимости модернизации фермы устройствами, обладающими возможностью определять мастит по уровню соматических клеток и стоимость работы специалистов по определению мастита у коров.

Длительность проведения теста на мастит составляет 15 минут. Исходим из затрат на зарплату работника в 84,6 тыс. рублей в месяц.

Расчеты проводятся для среднегодовой продуктивности 25 кг/сутки:

$$D_3 = ((Q_3 - Q_m) * T_l * Y * P_{\text{мол}}) \quad (5.2)$$

где Q_3 – общее количество животных, голов;

Q_m – заболевших маститом животных, голов;

T_l – длительность лактации, дн;

Y – среднесуточный удой за лактацию, кг;

$P_{\text{мол}}$ – товарная стоимость продукции, руб;

Расчеты проводим по формуле 5.2:

$$D_3 = ((600 - 60) * 305 * 30 * 35,88 = 177\,283\,080 \text{ руб.}$$

Проведем расчеты двух сценариев – предотвращено хроническое снижение удоев (1 сценарий) и не предотвращено (2 сценарий):

$$D_{\text{мн}} = Q_m * (T_l - T_{\text{мс}}) * Y_{\text{н}} * P_{\text{мол}} - (P_{\text{мс}} * Q_m) \quad (5.3)$$

$$D_{\text{мб}} = Q_m * (T_l - T_{\text{мс}}) * Y_{\text{б}} * P_{\text{мол}} - (P_{\text{мк}} * Q_m) \quad (5.4)$$

где $D_{\text{мн}}$ – доход в 1-м сценарии, руб;

$D_{\text{мб}}$ – доход во 2-м сценарии, руб;

$T_{\text{мс}}/T_{\text{мк}}$ – длительность лечения мастита, дн;

$Y_{\text{н}}$ – среднесуточный удой за лактацию в 1-м сценарии, кг;

$Y_{\text{б}}$ – среднесуточный удой за лактацию во 2-м сценарии, кг;

$P_{\text{мс}}$ – стоимость лечения мастита субклинического, руб;

$P_{\text{мк}}$ – стоимость лечения мастита клинического, руб;

Проводим расчет по формулам 5.3 и 5.4:

$$D_{\text{мн}} = 60 * (305 - 7) * 30 * 35,88 - (3000 * 60) = 19\,066\,032 \text{ руб};$$

$$D_{\text{мб}} = 60 * (305 - 14) * 25,5 * 35,88 - (7000 * 60) = 15\,554\,852,4 \text{ руб}.$$

Совокупные доходы по стаду в 1-м и 2-м сценариях:

$$CД_{\text{н}} = D_{\text{з}} + D_{\text{мн}} \quad (5.5)$$

$$CД_{\text{б}} = D_{\text{з}} + D_{\text{мб}} \quad (5.6)$$

Рассчитаем по формулам 5.5 и 5.6:

$$CД_{\text{н}} = 196\,349\,112 \text{ руб};$$

$$CД_{\text{б}} = 192\,837\,932,4 \text{ руб}.$$

Разница в доходе от стада в 600 голов в случае предотвращенного клинического мастита составит 3 511 179,4 руб.

Рассчитаем издержки при оснащении фермы разработанным устройством экспресс-анализа качества молока, которое возьмет на себя раннюю диагностику заболевания маститом. Для расчета было выбрано типовое модельное хозяйство на 600 голов с доильным залом «Елочка».

Сначала проведем расчет необходимого количества устройств для полного охвата стада в 600 голов:

$$K_y = \frac{Q_o}{P_{\text{ч}} * T_{\text{д}}} \quad (5.7)$$

где $P_{\text{ч}}$ – производительность доильного места, доек/ч;

$T_{\text{д}}$ – время на проведение доения стада, ч;

Q_o – общее количество животных на дойке, шт;

K_y – необходимое количество доильных мест и, соответственно, устройств экспресс-анализа качества молока, шт.

Рассчитаем необходимое количество устройств по формуле 5.7:

$$K_y = \frac{600}{5 * 3} = 40 \text{ шт}.$$

Из расчета выходит, что для фермы в 600 голов используется 40 доильных мест и, соответственно, 2 доильных системы типа «Елочка» с параметрами 10х2.

Далее рассчитаем стоимость модернизации оборудования фермы:

$$M_{\text{ф}} = K_y * C_{\text{м}} + C_{\text{р}} + T_{\text{н}} \quad (5.8)$$

где M_{ϕ} – стоимость модернизации доильного оборудования на ферме, руб;

C_m – стоимость устройств экспресс-анализа качества молока, используемых для модернизации доильного оборудования, руб;

C_p – стоимость работ по модернизации доильного оборудования, руб;

T_n – стоимость работ программиста в год на поддержание работы ПО, руб.

По формуле 5.8 рассчитаем:

$$M_{\phi} = 40 * 38\,956 + 212\,700 + 35560 = 1\,806\,500 \text{ руб.}$$

Рассчитаем эффект (чистую годовую прибыль) от внедрения устройства:

$$\Pi_r = C_{D_n} - C_{D_6} - (M_{\phi} - C_T) \quad (5.9)$$

Рассчитаем по формуле 5.9:

$$\Pi_r = 196\,349\,112 - 192\,837\,932,4 - (1\,806\,500 - 186\,420) = 1\,891\,099,6 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости капиталовложений рассчитывается по выражению:

$$O = \frac{K_{\text{и}}}{\Pi_r}, \quad (5.10)$$

где $K_{\text{и}}$ – инвестиции для модернизации оборудования, руб;

Π_r – доходы от инвестиций, руб.

Проведем расчет по формуле 5.10:

$$O = \frac{1\,806\,500}{1\,891\,099,6} = 0,96 \text{ г.}$$

Модернизация молочной фермы устройством экспресс-анализа качества молока экономически оправдана.

Выводы по главе 5

1. Был проведен расчет себестоимости разработанного устройства, определивший себестоимость устройства в 29 966 рублей. При добавленной стоимости в 30%, отпускная стоимость для покупателя составляет 38 956 рублей.

2. Определена ежегодная экономия от внедрения устройства на молочной ферме, составившая 3 697 599,4 рублей, стоимость модернизации молочной фермы на 600 голов в 1 806 500 рублей и срок окупаемости разработанного устройства, составивший 0,96 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполненный литературный анализ технологий и технических средств анализа качества молока показал, что большинство существующих способов не позволяют проводить поточный анализ качества молока. Возможность поточного мониторинга качества молока неразрушающими спектральными методами дает спектроскопия рассеяния в диапазоне длин волн 280-1100 нм, позволяя в потоке измерять процентную концентрацию жира и проводить качественный анализ концентрации соматических клеток. Определены условия работы устройства экспресс-анализа качества молока с потоком молоковоздушной смеси в составе доильной системы, включая среднюю длительности доения в 280-390 секунд, средний удой в 2,5-8,9 кг и среднюю скорость молокоотдачи в 0,49-1,9 кг/мин для в зависимости от физиологического состояния животных, включая здоровых, а также больных маститом в субклинической и клинической формах животных.

2. Разработаны математическая и имитационная модели протекания потока молоковоздушной смеси в молочном шланге доильной системы и измерительной камере устройства в диапазоне расхода молока от 1 до 6 кг/мин. Описан основной параметр влияния устройства на протекание потока молоковоздушной смеси – падение давления Δp . Рассчитано, что при скоростях потока выше 0,3 м/с движение потока молоковоздушной смеси после точки интеграции устройства в среднем на 14% быстрее, чем до точки интеграции, однако при скорости молокоотдачи в 6 кг/мин не приводит к нарушению протекания потока. Длина устройства составляет всего 7,13% от минимальной длины молочного шланга. Эти значения показывают, что интеграция устройства в доильную систему не может привести к значительному влиянию на нормальную работу системы.

3. Обоснованы параметры конструкции устройства экспресс-анализа качества молока в процессе доения, включая разделение на два модуля: модуль измерений и модуль расчета. Внутренний диаметр измерительной камеры устройства должен находиться в диапазоне 10-15 мм для совместимости с

молочными шлангами доильной системы, а необходимая длина молочного шланга в 150 мм до и после точки интеграции устройства. Составлена методика расчета параметров качества молока с использованием матрицы рассеяния света. Выбрано использование углов бокового рассеяния (72° , 90° , 108°) для измерения процентной концентрации жира в молоке и углов прямого рассеяния (0° , 18° , 36°) для проведения качественного анализа концентрации соматических клеток. Разработан алгоритм работы устройства экспресс-анализа качества молока в составе модернизированной доильной системы. Обоснованы компоненты разработанного устройства, включая использование полупроводникового лазера с длиной волны в диапазоне 532 нм в качестве источника излучения и применение кремниевых фотодиодов с фоточувствительным элементом диаметром в 9 мм в качестве приемников излучения. Внутренний диаметр измерительной камеры устройства задан равным 13 мм, что очень близко к внутреннему диаметру молочных шлангов доильной системы (14 мм) в месте интеграции устройства. Создан образец устройства.

4. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд, а также составлены методики проведения исследования работы устройства по экспресс-анализу качества молока в потоке молоковоздушной смеси, включая анализ процентной концентрации жира и качественный анализ концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси в процессе доения на действующей молочно-товарной ферме.

5. Обоснованы оптимальные параметры интеграции устройства в молочный шланг доильной системы (вертикальное, под 90° относительно горизонта). Проведен лабораторный эксперимент по исследованию работоспособности устройства, а также точности в определении процентной концентрации жира и качественном анализе концентрации соматических клеток в потоке молоковоздушной смеси для сырого коровьего молока жирностью 2,51% и 3,17%. Результаты измерений процентной концентрации жира составили $(2,62 \pm 0,16) \%$ и $(3,32 \pm 0,20) \%$ соответственно. Результаты качественного анализа концентрации соматических клеток составили $(0,097 \pm 0,006)$ у.ед. и $(0,094 \pm$

0,005) у.ед., что также соответствует диапазону 900-1000 тыс. соматических клеток на миллилитр. Из результатов эксперимента сделан вывод о погрешности средних значений измеряемой жирности молока в $\sim 0,1-0,2\%$ жирности измеряемого молока, а разовых измерений менее $0,5\%$ жирности. Проведен натурный эксперимент с 3 группами здоровых животных и 1 группой с диагнозом «субклинический мастит». Среднее значение $\pm$ стандартное отклонение измерений по каждой из 4 групп животных составили $(4,13 \pm 1,04) \%$, $(4,15 \pm 1,02) \%$, $(4,31 \pm 0,94) \%$ и $(3,29 \pm 1,02) \%$. У здоровых животных устройство не выявило повышенных значений соматических клеток, для группы с маститом среднее значение индекса соматических клеток составило $(0,072 \pm 0,003)$ у.ед., что соответствует ~ 700 тыс. клеток/мл. Была доказана применимость бесконтактного поточного анализа качества молока в условиях действующей молочно-товарной фермы.

6. Выполнен расчет экономической эффективности, определивший стоимость разработанного устройства в 38 956 рублей. Определена ежегодная экономия от внедрения устройства на молочной ферме в 1 891 099,6 рублей, стоимость модернизации молочной фермы на 600 голов в 1 806 500 рублей и срок окупаемости разработанного устройства, составивший 0,96 года.

По результатам представленного исследования, с целью повышения эффективности производства молочных ферм, предлагается проводить модернизацию доильного оборудования устройством экспресс-анализа качества молока на фермах с поголовьем 250-1200 коров.

Для прогнозирования и совершенствования работы молочно-товарной фермы необходимо разработать ПО, которое будет собирать цифровые данные от нескольких устройств экспресс-анализа качества молока и, на основе использования ИНС, корректировать условия содержания животных, а также обеспечивать безопасность производимой продукции для потребителей. Для повышения точности измерений возможно использовать более производительные управляющие контроллеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 28 июня 2021 г. N 421 «Об утверждении Ветеринарных правил назначения и проведения ветеринарно-санитарной экспертизы молока и молочных продуктов, предназначенных для переработки или для реализации на розничных рынках».
2. Сельское хозяйство в России. 2023: Стат.сб./Росстат – С 29 М., 2023. – 103 с.
3. ТАСС: В России производство молока по итогам 2023 года достигло 33,5 млн тонн [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/19791331>. (дата обращения: 20.05.2024).
4. Рациональные нормы потребления пищевых продуктов. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://minzdrav.gov.ru/opendata/7707778246-normpotrebproduct/visual> (дата обращения: 22.05.2024).
5. Бережная Е.А. Рынок молока и молочной продукции. / Е. А. Бережная // Вестник науки. – 2021. – Т. 3, №. 1(34). – С. 64-68.
6. Черняков М.К. Молочная индустрия как стратегическое направление развития рынка продовольствия / М. К. Черняков, М. М. Чернякова, К. Ч. Акберов, И. А. Чернякова // Пищевая промышленность. – 2018. – №. 4. – С. 33-37.
7. Murray I. Sample preparation. / I. Murray, I. Cowe // Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture. – 2004. – N. 44. – P. 75-112.
8. Наумова Н.Л. Производство и переработка молока. Мировые тенденции / Н.Л. Наумова, А.А. Лукин // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2021. – Т. 6. – №. 71. – С. 116-121.
9. Jensen R.G. The composition of milk fat / R.G. Jensen, A.M. Ferris, C. J. Lammi-Keefe // Journal of Dairy Science. – 1991. – Vol. 74. – N. 9. – P. 3228-3243. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(91)78509-3.
10. Roy B. Evaluation of Milk Urea Concentration as Useful Indicator for Dairy Herd Management: A Review / B. Roy, B. Brahma, S. Ghosh, P.K. Pankaj, G.

Mandal // Asian Journal of Animal and Veterinary Advances. – 2011. – Vol. 6. – N. 1. P. 1-19. DOI: 10.3923/ajava.2011.1.19.

11. Abeni F. Milk Quality and Automatic Milking: Fat Globule Size, Natural Creaming, and Lipolysis / F. Abeni, L. Degano, F. Calza, R. Giangiacomo, G. Pirlo // Journal of Dairy Science. – 2005. – Vol. 88. – N 9. – P. 3519-3529. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(05)73037-X.

12. Brandt M. Invited review: Technical solutions for analysis of milk constituents and abnormal milk. / M.Brandt, A. Haeussermann, E. Hartung // Journal of Dairy Science. – 2010. – N. 93. – P. 427–436. DOI: 10.3168/jds.2009-2565.

13. Schcolnik T. Using milk fat-to-protein ratio to evaluate dairy cows energy balance status. / T. Schcolnik // Journal of Animal Science. – 2016. – N94. – P. 54-55. DOI: 10.2527/jam2016-0117.

14. Toni F. Early lactation ratio of fat and protein percentage in milk is associated with health, milk production, and survival. / F. Toni, L. Vincenti, L. Grigoletto, A. Ricci, Y.H. Schukken // Journal of Dairy Science. – 2011. – N. 94. – P. 1772–1783. DOI: 10.3168/jds.2010-3389.

15. Владимиров Ф.Е. Разработка методов и средств зоотехнического контроля в скотоводстве для управления физиологическим состоянием стада. / Ф.Е. Владимиров, С.О.Базаев, Д.Ю. Павкин., С.С. Юрочка // Главный зоотехник. – 2023. – №1(234). – С. 32-46. DOI: 10.33920/sel-03-2301-04.

16. Melfsen A. Accuracy of in-line milk composition analysis with diffuse reflectance near-infrared spectroscopy. / A. Melfsen, E. Hartung, A. Haeussermann // Journal of Dairy Science. – 2012. – Vol. 95. – N. 11. – P. 6465–6476. DOI: 10.3168/jds.2012-5388.

17. Leitner G. Effects of intra-mammary bacterial infection with coagulase negative staphylococci and stage of lactation on shedding of epithelial cells and infiltration of leukocytes into milk: comparison among cows, goats and sheep / G. Leitner, U. Merin, O. Krifucks, S. Blum, A.L. Rivas, N. Silanikove // Veterinary Immunology and Immunopathology. – 2012. – Vol. 147. – N 3-4. P. 202-210. DOI: 10.1016/j.vetimm.2012.04.019.

18. Rienesl L. Mastitis detection from milk mid-infrared (MIR) spectroscopy in dairy cows / L. Rienesl, N.Khayatzadeh, A. Köck, L. Dale, A. Werner, C. Grelet, N. Gengler, F.-J. Auer, C. Egger-Danner, X. Massart // *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. – 2019. – Vol. 67. – N 5. – P.1221-1226. DOI: 10.11118/actaun201967051221.
19. Coppa M. Authentication of cow feeding and geographic origin on milk using Visible and near-infrared spectroscopy / M. Coppa, B. Martin, C. Agabriel, C. Chassaing, C. Sibra, I. Constant, B.Graulet, D. Andueza // *Journal of dairy science*. – 2012. – Vol. 95. – N. 10. – P. 5544-5551. DOI: 10.3168/jds.2011-5272.
20. Mohamed H. Use of near and mid infra-red spectroscopy for analysis of protein, fat, lactose and total solids in raw cow and camel milk / H. Mohamed, P. Nagy, J. Agbaba, A. Kamal-Eldin // *Food Chemistry*. – 2021. – Vol. 334. 127436. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.12743.
21. Di Marzo L. Effect of homogenizer performance on accuracy and repeatability of mid-infrared predicted values for major milk components / L. Di Marzo, D.M. Barbano // *Journal of dairy science*. – 2016. – Vol. 99. – N. 12. P. 9471-9482. DOI:10.3168/jds.2016-11618.
22. De Roos A. Screening for subclinical ketosis in dairy cattle by Fourier transform infrared spectrometry / A. De Roos, H. Van Den Bijgaart, J. Hørlyk, G. De Jong // *Journal of dairy science*. – 2007. – Vol. 90. – N. 4. – P. 1761-1766. DOI: 10.3168/jds.2006-203.
23. Laporte M.-F. Near-infrared analysis of fat, protein, and casein in cow's milk / M.-F. Laporte, P. Paquin // *Journal of agricultural and Food Chemistry*. – 1999. – Vol. 47. – N 7. – P. 2600-2605. DOI: 10.1021/jf980929r.
24. Aernouts B. Visible and near infrared spectroscopic analysis of raw milk for cow health monitoring: Reflectance or transmittance? / B. Aernouts, E. Polshin, J. Lammertyn, W. Saeys // *Journal of Dairy Science*. – 2011. – Vol. 94. – N. 11. – P. 5315-5329. DOI: 10.3168/jds.2011-4354.
25. Tsenkova R. Near-Infrared Spectroscopy for Dairy Management: Measurement of Unhomogenized Milk Composition. / R. Tsenkova, S. Atanassova, K.

Toyoda, Y. Ozaki, K. Itoh, T. Fearn // *Journal of Dairy Science*. – 1999. – Vol. 82. – P. 2344–235191. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(99)75484-6.

26. Портной А.И. Содержание жира и белка в цистернальном и альвеолярном молоке, формирующем разовый удой коровы / А.И. Портной, М.С. Михайловская. // *Животноводство и ветеринарная медицина*. – 2021. – №. 1(40). – С. 10-14.

27. Любин Н.А. Физиология лактации. Физиологические основы машинного доения коров / Н.А. Любин. - Ульяновск: УНЦХА, 2004. – 25с.

28. Vanderghem C. Milk fat globule membrane and buttermilks: from composition to valorization / C. Vanderghem, P. Bodson, S. Danthine, M. Paquot, C. Deroanne, C. Blecker // *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*. – 2010. – Vol. 14. – N. 3. – P. 485-500.

29. Kirsanov V.V. Laser Fluorescence and Extinction Methods for Measuring the Flow and Composition of Milk in a Milking Machine / V.V. Kirsanov, A.V. Shkirin, D.Y. Pavkin, D.N. Ignatenko, G.L. Danielyan, A.R. Khakimov, N.F. Bunkin // *Photonics*. – 2021. – Vol. 8. – N. 9. – P. 390. DOI: 10.3390/photonics8090390.

30. Shkirin A.V. Analysis of Fat and Protein Content in Milk Using Laser Polarimetric Scatterometry / A.V. Shkirin, D.N. Ignatenko, S.N. Chirikov, N.F. Bunkin, M.E. Astashev, S.V. Gudkov // *Agriculture*. 2021. Vol. 11. P. 1028. DOI: 10.3390/agriculture11111028.

31. Karoui R. A review of the analytical methods coupled with chemometric tools for the determination of the quality and identity of dairy products. / R. Karoui, J. De Baerdemaeker // *Food Chemistry*. – 2007. – Vol. 102. – P. 621-640. DOI: 10.1016/j.foodchem.2006.05.042.

32. Givens D. The principles, practices and some future applications of near infrared spectroscopy for predicting the nutritive value of foods for animals and humans. / D. Givens, J. De Boever, E. Deaville // *Nutrition Research Reviews*. – 1997. – N. 10. – P. 83–114. DOI: 10.1079/NRR19970006.

33. Yakubu H.G. The recent advances of near-infrared spectroscopy in dairy production — A review. / H.G. Yakubu, Z. Kovacs, T. Toth, G. Bazar // *Critical*

Reviews in Food Science and Nutrition. – 2022. – N. 62(3). – P. 810-831. DOI: 10.1080/10408398.2020.1829540.

34. Evangelista C. An Overview on the Use of Near Infrared Spectroscopy (NIRS) on Farms for the Management of Dairy Cows / C. Evangelista, L. Basiricò, U. Bernabucci // Agriculture. – 2021. – Vol. 11. – N. 4. 296. DOI: 10.3390/agriculture11040296.

35. Türker-Kaya S. A Review of Mid-Infrared and NearInfrared Imaging: Principles, Concepts and Applications in Plant Tissue Analysis / S. Türker-Kaya, C.W. Huck // Molecules. – 2017. – Vol. 22. – N. 1. 168. DOI: 10.3390/molecules22010168.

36. Coates J. Interpretation of infrared spectra, a practical approach / J. Coates // Interpretation of infrared spectra, a practical approach. 2000. – P. 10815–10837. DOI: 10.1002/9780470027318.a5606.

37. Manley M. Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials / M. Manley // Chemical Society Reviews. – 2014. – Vol. 43. – N. 24. P. 8200-8214. DOI: 10.1039/C4CS00062E.

38. Beć K.B. Near-Infrared Spectroscopy in BioApplications / K.B. Beć, J. Grabska, C.W. Huck // Molecules. – 2020. – Vol. 25. – N. 12. 2948. DOI: 10.3390/molecules25122948.

39. Burns D.A. Handbook of Near-Infrared Analysis / D.A. Burns, E.W. Ciurczak. - CRC Press, 2007. 834p. DOI: 10.1201/9781420007374.

40. Legner N. Root Differentiation of Agricultural Plant Cultivars and Proveniences Using FTIR Spectroscopy / N. Legner, C. Meinen, R. Rauber // Frontiers in Plant Science. – 2018. – Vol. 9. – N. 748. DOI: 10.3389/fpls.2018.00748.

41. Cattaneo T.M. The use of near infrared spectroscopy for determination of adulteration and contamination in milk and milk powder: updating knowledge / T.M. Cattaneo, S.E. Holroyd // Journal of Near Infrared Spectroscopy. – 2013. – Vol. 21. – N. 5. – P. 341- 349. DOI: 10.1255/jnirs.1077.

42. Ageev A. Shear Flow of a Viscous Fluid over a Cavity with a Pulsating Gas Bubble / A. Ageev, A. Osipov // Doklady Physics. – 2020. – Vol. 65. – P. 242-245. DOI:10.1134/S1028335820050031

43. Teng Z.W. Effects of the circadian rhythm on milk composition in dairy cows: Does day milk differ from night milk? / Z.W. Teng, G.Q. Yang, L.F. Wang, T. Fu, H.X. Lian. // *Journal of Dairy Science*. – 2021. – N. 104(7). – P. 8301-8313. DOI: 10.3168/jds.2020-19679.
44. De la Roza-Delgado B. Matching portable NIRS instruments for in situ monitoring indicators of milk composition / B. de la Roza-Delgado, A. Garrido-Varo, A. Soldado, A. González Arrojo. // *Food Control*. – 2017. Vol. 76. – P. 74-81. DOI: 10.1016/j.foodcont.2017.01.004.
45. Muñiz R. Milk quality control requirement evaluation using a handheld near infrared reflectance spectrophotometer and a bespoke mobile application / R. Muñiz, M. Cuevas-Valdés, B. de la Roza-Delgado. // *Journal of Food Composition and Analysis*. – 2020. – Vol. 86. – 103388. DOI: 10.1016/j.jfca.2019.103388.
46. Melenteva A. Building global models for fat and total protein content in raw milk based on historical spectroscopic data in the visible and short-wave near infrared range / A. Melenteva, V. Galyanin, E. Savenkova, A. Bogomolov // *Food Chem*. – 2016. – Vol. 203 – P. 190-198. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.01.127.
47. Weller J.I. Genetic and phenotypic analysis of daily Israeli Holstein milk, fat, and protein production as determined by a real-time milk analyzer / J.I. Weller, Ezra E. // *Journal of Dairy Science*. – 2016. – Vol. 99. – N. 12. P. 9782-9795. DOI: 10.3168/jds.2016-11155.
48. Caria M. Evaluation of automated in-line precision dairy farming technology implementation in three dairy farms in Italy / M. Caria, G. Todde, A. Pazzona // *Frontiers in Agricultural Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 6. – N. 2. P. 181-187. DOI: 10.15302/J-FASE-2019252.
49. Павкин Д.Ю. Влияние субклинического и клинического мастита на процесс молокоотдачи коров ярославской породы / Д.Ю. Павкин, А.Р. Хакимов, Ф.Е. Владимиров, С.С. Юрочка // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2022. – Т. 16. – №. 3. – С. 62-66. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-62-66.
50. Khakimov A.R. Development of an Algorithm for Rapid Herd Evaluation and Predicting Milk Yield of Mastitis Cows Based on Infrared Thermography / A.R.

Khakimov, D.Y. Pavkin, S.S. Yurochka, M.E. Astashev, I.M. Dovlatov // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – N. 13. 6621. DOI: 10.3390/app12136621.

51. Wall S.K. Differential glucocorticoid-induced closure of the blood-milk barrier during lipopolysaccharide-and lipoteichoic acid-induced mastitis in dairy cows / S.K. Wall, E. Hernández-Castellano, A. Ahmadpour, R.M. Bruckmaier, O. Wellnitz // *Journal of Dairy Science*. – 2016. – N. 99. P. 7544-7553.

52. Ghosh N. Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook / N. Ghosh, A.I. Vitkin // *Journal of biomedical optics*. – 2011. – Vol. 16. – N. 11. 110801. DOI: 10.1117/1.3652896.

53. Li P. Temperature dependent red luminescence from a distorted Mn⁴⁺ site in CaAl₄O₇: Mn⁴⁺ / P. Li, M. Peng, X. Yin, Z. Ma, G. Dong, Q. Zhang, J. Qiu // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21. – N. 16. – P. 18943-18948. DOI: 10.1364/OE.21.018943.

54. Tuchin V.V. Polarized light interaction with tissues / V.V. Tuchin // *Journal of biomedical optics*. – 2016. – Vol. 21. – N. 7. 071114.

55. Liu T. Comparative study of the imaging contrasts of Mueller matrix derived parameters between transmission and backscattering polarimetry / T. Liu, T. Sun, H. He, S. Liu, Y. Dong, J. Wu, H. Ma // *Biomedical Optics Express*. – 2018. – N. 9. – P. 4413-4428.

56. Хакимов А.Р. Исследование основных технических условий подключения интегрируемых измерительных модулей к доильной системе / А.Р. Хакимов, Д.Ю. Павкин, А.В. Шкирин [и др.] // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. – 2023. – Т. 70. №2(51). – С. 68-73.

57. Рылов А.А. Экспериментально-теоретические исследования движения молока и воздуха в молоковыводящем тракте доильного аппарата / А.А. Рылов, П.А. Савиных, В.Н. Шулятьев // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. – 2020. – №. 21(5). – С. 614-624. DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.5.614-624.

58. Шулятьев В.Н. Машинное доение коров (Привязное содержание): монография / В. Н. Шулятьев, А. А. Рылов // Киров: ООО ЛОБАНЬ, 2017. 198 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009532413> (дата обращения: 20.05.2024).

59. Соловьев С.А. Исполнительные механизмы системы «человек-машина-животное» / С.А. Соловьев, Л.П. Карташов // Екатеринбург: УрОРАН, 2001. 179 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000739079> (дата обращения: 20.05.2024).
60. Мамаев А.А. Движение газожидкостных смесей в трубах / А.А. Мамаев, Г.Э. Одишария, О.В. Клапчук, А.А. Точилин, Н.И. Семенов // Недра, 1978. 270 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/9838> (дата обращения: 20.05.2024).
61. Цой Ю.А. Процессы и оборудование доильно-молочных отделений животноводческих ферм / Ю.А. Цой // М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. 424 с.
62. Карташов Л.П. Машинное доение коров / Л.П. Карташов // М.: Колос, 1982. 301 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001110834> (дата обращения: 20.05.2024).
63. Павкин Д.Ю. Моделирование влияния проточного устройства анализа качества молока на поток в доильной установке / Д.Ю. Павкин, А.Р. Хакимов, А.В. Шкирин, С.С. Юрочка, Д.Н. Игнатенко // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2023. – Т. 17. – №. 1. – С. 70-75. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-70-75.
64. Jiao S. Multiple-channel Mueller-matrix optical coherence tomography in biological tissue / S. Jiao, W. Yu, G. Stoica, L.V. Wang // IEEE. – 2002. – 11. N. 3.
65. Chue-Sang J. Use of combined polarization-sensitive optical coherence tomography and Mueller matrix imaging for the polarimetric characterization of excised biological tissue / J. Chue-Sang, Y. Bai, S. Stoff, D. Straton, S.D. Ramaswamy, J.C. Ramella-Roman // Journal of Biomedical Optics. – 2016. – Vol. 21. – N. 7. 071109. DOI: 10.1117/1.JBO.21.7.071109.
66. Бахчевников О.Н. Результаты исследований процесса транспортировки молоковоздушной смеси по молочному шлангу доильного аппарата / О.Н. Бахчевников // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производств: Материалы Международной научно-технической конференции. – 2012. – С. 156-161.

67. Xu R. Particle characterization: light scattering methods / R. Xu // Springer Science & Business Media, 2001. 397 p.
68. Mishchenko M.I. Scattering, absorption, and emission of light by small particles / M.I. Mishchenko, L.D. Travis, A.A. Lacis // Cambridge university press, 2002. 462 p.
69. Doicu A. Light scattering by systems of particles: null-field method with discrete sources: theory and programs / A. Doicu, T. Wriedt, Y.A. Eremin // Springer, 2006. 316 p. DOI: 10.1007/978-3-540-33697-6.
70. Azzam R.M. Stokes-vector and Mueller-matrix polarimetry / Azzam R. M. // Journal of the Optical Society of America A. – 2016. – Vol. 33. – N. 7. – P. 1396-1408. DOI: 10.1364/JOSAA.33.001396.
71. Ghosh N. Mueller matrix polarimetry for the characterization of complex random medium like biological tissues / N. Ghosh, J. Soni, M. Wood, M. Wallenberg, I. Vitkin // Pramana. – 2010. – Vol. 75 – N. 6. – P. 1071-1086.
72. Arwin H. Optical chirality determined from Mueller matrices / H. Arwin, S. Schoeche, J. Hilfiker, M. Hartveit, K. Järrendahl, O.R. JuárezRivera, A. Mendoza-Galván, R. Magnusson // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – N. 15. 6742. DOI: 10.3390/app11156742.
73. Liu J. An experimental study on light scattering matrices for Chinese loess dust with different particle size distributions / J. Liu, Q. Zhang, Y. Huo, J. Wang, Y. Zhang // Atmospheric Measurement Techniques. – 2020. – Vol. 13. – N. 8. – P. 4097-4109. DOI: 10.5194/amt-13-4097-2020.
74. Kolokolova L. Light-scattering properties of random-oriented aggregates: Do they represent the properties of an ensemble of aggregates? / L. Kolokolova, H. Kimura, K. Ziegler, I. Mann // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2006. – Vol. 100. – N. 1-3. – P. 199-206. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2005.11.038.
75. Crofcheck C. Effect of fat and casein particles in milk on the scattering of elliptically polarized light / C. Crofcheck, J. Wade, J.N. Swamy, M.M. Aslan, M.P. Mengüç // Transactions of the ASAE. – 2005. – Vol. 48. – N. 3. – P. 1147-1155. DOI:10.13031/2013.18488.

76. Veenstra C. Dependency of the optical scattering properties of human milk on casein content and common sample preparation methods / C. Veenstra, D. Every, W. Petersen, J.B. Van Goudoever, W. Steenbergen, N. Bosschaart // *Journal of biomedical optics*. – 2020. – Vol. 25. N. 4. 045001. DOI: 10.1117/1.JBO.25.4.045001.
77. Garcia-Caurel E. Spectroscopic Mueller polarimeter based on liquid crystal devices / E. Garcia-Caurel, A. De Martino, B. Drevillon // *Thin Solid Films*. – 2004. – Vol. 455. – P. 120-123. DOI: 10.1016/j.tsf.2003.12.056.
78. Dubreuil M. Snapshot Mueller matrix polarimeter by wavelength polarization coding / M. Dubreuil, S. Rivet, B. Le Jeune, J. Cariou // *Optics express*. – 2007. – Vol. 15. – N. 21. – P. 13660-13668. DOI: 10.1364/OE.15.013660.
79. Ding H. Angle-resolved Mueller matrix study of light scattering by B-cells at three wavelengths of 442, 633, and 850 nm / H. Ding, J.Q. Lu, R.S. Brock, T.J. McConnell, J.F. Ojeda, K. Jacobs, X.-H. Hu // *Journal of biomedical optics*. – 2007. – Vol. 12. – N. 3. 034032. DOI: 10.1117/1.2749730.
80. Suárez-Bermejo J.C. Mueller matrix polarimetry using full Poincaré beams / J.C. Suárez-Bermejo, J.C.G. de Sande, M. Santarsiero, G. Piquero // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2019. – Vol. 122. – P. 134-141. DOI: 10.3390/photonics9100702.
81. Kucheryavskiy S. Determination of fat and total protein content in milk using conventional digital imaging / S. Kucheryavskiy, A. Melenteva, A. Bogomolov // *Talanta*. – 2014. – Vol. 121. P. 144-152. DOI: 10.1016/j.talanta.2013.12.055.
82. Ohtani S. Milk fat analysis by fiberoptic spectroscopy / S. Ohtani, T. Wang, K. Nishimura, M. Irie // *Asian-australasian journal of animal sciences*. – 2005. – Vol. 18. – N. 4. – P. 580-583. DOI: 10.5713/ajas.2005.580.
83. Angrasari F. Fabrication of Milk Fat Sensor based on Plastic Optical Fiber / F. Angrasari, A. Arifin, B. Abdullah // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1341. 082038. DOI: 10.1088/1742-6596/1341/8/082038.
84. Liao R. Polarization measurements and evaluation based on multidimensional polarization indices applied in analyzing atmospheric particulates / R. Liao, W. Guo, N. Zeng, J. Guo, Y. He, H. Di, D. Hua, H. Ma // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11. – N. 13. – 5992. DOI: 10.3390/app11135992.

85. Hussain R. An ultra-compact particle size analyser using a CMOS image sensor and machine learning / R. Hussain, M. Alican Noyan, G. Woyessa, R.R. Retamal Marín, P. Antonio Martinez, F.M. Mahdi, V. Finazzi, T.A. Hazlehurst, T.N. Hunter, T. Coll // *Light: Science & Applications*. – 2020. – Vol. 9. – N. 1. – P. 1-11. DOI: 10.1038/s41377-020-0255-6.

86. Jakmunee J. A low-cost light-scattering detector for the flow-injection nephelometric determination of sulfate / J. Jakmunee, Y. Udnan, R. Morrison, R. Beckett, I. Mckinnon, K. Grudpan // *Analytical Sciences*. – 2003. – Vol. 19. – N. 11. – P. 1495-1498. DOI: 10.2116/analsci.19.1495.

87. Игнатенко Д.Н. Измерение содержания жира и крупномасштабных примесей в молоке с помощью лазерной скаттерометрии / Д.Н. Игнатенко, М.Е. Асташев, А.В. Шкирин // *Необратимые процессы в природе и технике: Труды Двенадцатой Всероссийской конференции*. – 2023. Т. 2. – С. 161-165.

88. Shkirin A.V. Laser Scatterometric Device for Inline Measurement of Fat Percentage and the Concentration Level of Large-Scale Impurities in Milk / A.V. Shkirin, M.E. Astashev, D.N. Ignatenko, N.V. Suyazov, M.V. Vedunova, S.V. Gudkov // *Applied Sciences*. – 2022. – N. 12. 12517. DOI: 10.3390/app122412517.

89. Шкирин А.В. Флуоресцентно-скаттерометрическая методика измерения процентного содержания дисперсных компонентов эмульсий в применении к оценке качества молока / А.В. Шкирин, М.Е. Асташев, Д.Н. Игнатенко, В.А. Козлов, С.В. Гудков // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. – 2023. – Т. 50. – № 5. – С. 14-24.

90. Хакимов А.Р. Анализ направлений модернизации поточного устройства анализа параметров качества молока / А.Р. Хакимов // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. – 2024. – Т. 71, № 2. – С. 77-82. – DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-2-77-82.

91. Khakimov A.R. Effects of Milking System Operating Conditions on the Milk-Fat-Percentage Measuring Accuracy of an Inline Light-Scattering Sensor / A.R. Khakimov, A.S. Dorokhov, D.Yu. Pavkin [et al.] // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2023. – Vol. 13, No. 21. DOI:10.3390/app132111836.

92. 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.

93. Hovinen M. Detection of Clinical Mastitis with the Help of a Thermal Camera. / M.Hovinen, J.Siivonen, S.Taponen, L.Hanninen, // Journal of Dairy Science. – 2008. – Vol. 91. – N. 12. – P. 4592-4598. DOI: 10.3168/jds.2008-1218.

94. Burmistrov D.E. Application of Optical Quality Control Technologies in the Dairy Industry An Overview / D.E.Burmistrov, D.Y.Pavkin, A.R.Khakimov, D.N.Ignatenko, E.A.Nikitin, V.N.Lednev, Y.P.Lobachevsky, S.V.Gudkov, A.V.Zvyagin, // Photonics. – 2021. – Vol. 8. 551. DOI: 10.3390/photonics8120551.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство ЭВМ на алгоритм управления устройством

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023687820

**Программа Milk8Scatter для обеспечения работы
микроконтроллера AVR Atmega328****Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Федеральный научный
агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) (RU)****Авторы: Асташев Максим Евгеньевич (RU), Гудков Сергей
Владимирович (RU), Шкирин Алексей Владимирович (RU),
Павкин Дмитрий Юрьевич (RU), Хакимов Артём
Рустамович (RU), Юрочка Сергей Сергеевич (RU)**

Заявка № 2023685203

Дата поступления 23 ноября 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 18 декабря 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2790807**Способ и проточное устройство для определения
процентных концентраций компонентов молока в
потоке**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение "Федеральный научный
агроинженерный центр ВИМ" (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) (RU)*

Авторы: *Гудков Сергей Владимирович (RU), Шкирин Алексей
Владимирович (RU), Игнатенко Дмитрий Николаевич (RU),
Асташев Максим Евгеньевич (RU), Дорохов Алексей
Семенович (RU), Павкин Дмитрий Юрьевич (RU), Хакимов
Артем Рустамович (RU)*

Заявка № 2022109279

Приоритет изобретения **07 апреля 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **28 февраля 2023 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **07 апреля 2042 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство ЭВМ на обработку результатов измерений

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022617777

Программа для обработки результатов измерений
интеллектуального экспресс-анализатора качества
молока.

Правообладатель: *Хакимов Артем Рустамович (RU)*Автор(ы): *Хакимов Артем Рустамович (RU)*

Заявка № 2022617167

Дата поступления 24 апреля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 апреля 2022 г.

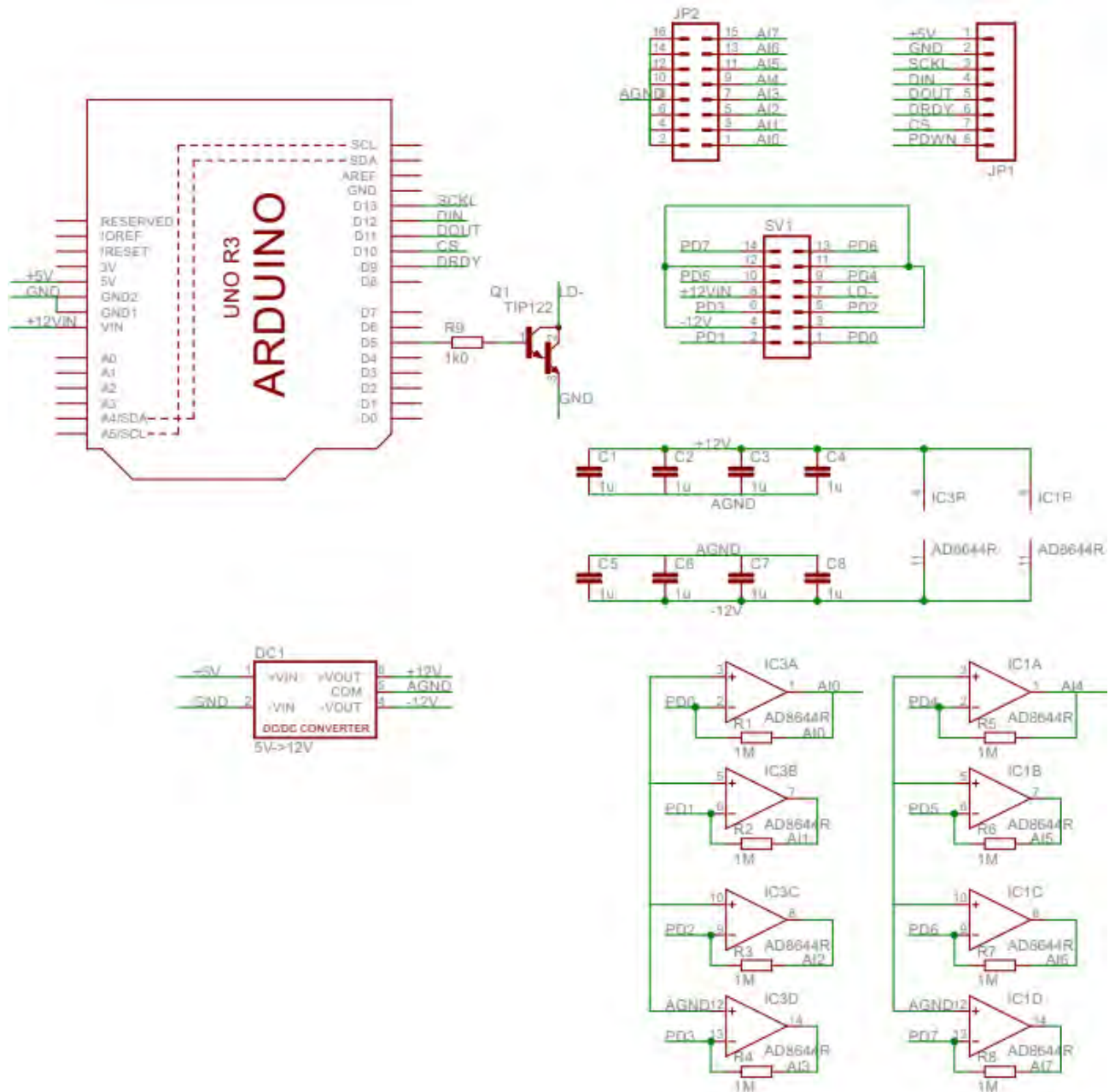
Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b90077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юний Сергеевич**
Действителен с 26.05.2022 по 26.05.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Электрическая схема устройства



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Результаты лабораторного исследования устройства

Таблица Д.1 – Измерения молока, жирностью 2,51%

Номер измерения	Значение жирности молока, %	Коэффициент соматических клеток, у. ед.
1	2.85	0.099
2	2.62	0.097
3	2.33	0.089
4	2.62	0.088
5	2.53	0.102
6	2.42	0.095
7	2.69	0.102
8	2.50	0.092
9	2.38	0.100
10	2.48	0.098
11	2.56	0.102
12	2.89	0.092
13	2.68	0.100
14	2.68	0.092
15	2.58	0.098
16	2.50	0.100
17	2.41	0.095
18	2.72	0.098
19	2.62	0.103
20	2.50	0.103
21	2.77	0.107
22	2.80	0.106

Продолжение таблицы Д.1

Номер измерения	Значение жирности молока, %	Коэффициент соматических клеток, у. ед.
23	2.71	0.093
24	2.48	0.100
25	2.40	0.096
26	2.94	0.095
27	2.79	0.096
28	2.81	0.107
29	2.61	0.089
30	2.40	0.087
31	2.79	0.088
32	2.71	0.104

Таблица Д.2 – Измерения молока жирностью 3,17%

Номер измерения	Значение жирности молока, %	Коэффициент соматических клеток, у. ед.
1	3.43	0.092
2	2.85	0.100
3	3.41	0.088
4	3.40	0.086
5	3.15	0.091
6	3.62	0.099
7	3.42	0.093
8	3.54	0.094
9	3.20	0.111
10	3.59	0.094
11	3.46	0.098
12	3.49	0.094

Продолжение таблицы Д.2

Номер измерения	Значение жирности молока, %	Коэффициент соматических клеток, у. ед.
13	3.21	0.093
14	3.47	0.094
15	3.04	0.091
16	2.95	0.087
17	3.06	0.094
18	3.26	0.094
19	3.47	0.088
20	3.06	0.087
21	3.41	0.091
22	3.35	0.093
23	3.18	0.097
24	3.30	0.098
25	3.37	0.087
26	3.33	0.094
27	3.55	0.101
28	3.12	0.093
29	3.30	0.093
30	3.66	0.098
31	3.31	0.101
32	3.41	0.099

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Результаты натурного исследования устройства

Таблица Е.1 – Измерения жирности молока, группа 1 (здоровые)

Время, с	Жирность молока по каждому животному, %				
	1	2	3	4	5
12	2.08	1.74	2.74	1.76	2.25
24	1.37	2.95	1.96	2.97	2.49
36	2.46	2.42	2.96	2.73	2.57
48	2.74	2.74	5.07	2.48	2.57
60	3.54	3.02	2.24	1.89	3.28
72	3.43	3.02	2.90	2.73	3.10
84	3.68	5.08	4.69	3.32	3.76
96	3.34	4.53	4.45	3.91	3.75
108	3.86	4.63	4.35	2.78	2.93
120	4.27	3.16	5.04	3.38	4.12
132	4.52	3.26	2.79	5.04	4.28
144	3.37	4.14	4.79	4.58	3.27
156	3.06	3.28	5.90	6.02	3.11
168	4.99	5.25	3.70	3.59	4.43
180	3.94	2.97	5.02	4.60	4.24
192	5.19	2.86	5.60	5.04	4.72
204	4.55	4.02	4.12	4.53	4.33
216	3.98	4.18	4.70	5.38	4.57
228	5.76	5.36	2.99	3.52	6.07
240	6.13	5.29	4.77	5.65	6.49
252	5.42	2.97	4.79	4.29	5.18
264	4.78	4.80	5.57	2.99	5.24
276	5.97	4.86	5.52	5.61	6.33
288	5.81	5.92	-	6.03	6.06
300	5.59	-	-	5.47	6.20

Таблица Е.2 – Измерения молока, группа 3 (здоровые)

Время, с	Жирность молока по каждому животному, %				
	1	2	3	4	5
12	2.23	1.97	2.37	2.16	2.55
24	3.06	0.95	2.99	1.42	2.59
36	2.66	2.38	2.85	2.50	2.25
48	2.87	2.96	2.43	2.99	3.18
60	2.70	2.93	2.50	3.72	2.88
72	3.02	3.11	3.41	3.87	2.70
84	3.64	3.79	3.64	3.74	4.77
96	5.86	5.19	5.53	3.62	3.50
108	4.62	4.84	5.08	2.94	4.15
120	3.23	3.53	2.87	4.81	4.47
132	3.68	3.50	3.45	4.57	5.44
144	4.12	4.18	4.59	3.45	2.89
156	5.46	5.03	5.47	2.70	5.33
168	5.33	5.20	5.77	4.99	3.22
180	2.93	3.33	2.90	3.94	5.18
192	3.84	3.94	4.43	4.93	5.82
204	3.87	3.97	4.22	4.92	4.79
216	4.16	4.10	6.00	4.59	5.81
228	6.07	6.72	5.94	5.97	2.83
240	4.93	3.24	4.95	5.46	3.04
252	4.10	4.42	3.82	5.19	3.70
264	5.50	6.21	5.34	4.43	4.54
276	5.74	6.56	6.42	5.89	3.88
288		5.36	5.56	5.41	4.96
300				5.47	

Таблица Е.3 – Измерения молока, группа 3 (здоровые)

Время, с	Жирность молока по каждому животному, %				
	1	2	3	4	5
12	2.18	2.76	2.87	2.09	2.10
24	2.36	3.17	2.77	3.28	2.64
36	2.46	2.83	2.82	2.81	2.63
48	3.49	3.33	3.23	2.92	2.95
60	3.43	2.20	2.18	3.56	3.15
72	3.73	3.21	2.82	3.70	3.46
84	4.01	5.20	4.95	3.62	3.96
96	3.57	4.82	4.82	3.13	4.19
108	3.19	4.22	4.61	4.52	4.66
120	4.34	5.07	5.47	4.42	3.63
132	4.49	2.81	2.82	4.94	4.04
144	2.98	4.89	4.96	3.54	4.52
156	3.21	6.29	6.44	4.89	3.24
168	4.68	3.52	3.54	4.99	4.64
180	3.90	5.43	5.08	3.61	4.60
192	4.82	6.06	5.61	5.52	4.98
204	4.46	4.10	4.26	4.61	4.44
216	4.63	4.59	6.17	4.17	4.57
228	5.40	3.18	3.27	6.22	6.23
240	6.29	5.04	4.50	5.45	5.53
252	4.79	5.29	4.86	5.11	5.65
264	4.39	5.21	6.16	4.68	4.58
276	5.83	5.92	5.24	5.59	6.09
288	5.18			5.27	5.46
300	5.27				5.52

Таблица Е.4 – Измерения молока, группа 4 (субклинический мастит)

Время, с	Жирность молока по каждому животному, %				
	1	2	3	4	5
12	0.71	1.94	0.96	1.97	1.48
24	1.28	1.22	1.17	1.14	2.71
36	2.03	2.08	2.10	2.38	2.23
48	3.38	2.26	0.60	2.29	2.64
60	2.92	3.03	3.30	0.20	2.49
72	1.25	2.86	2.97	2.80	2.65
84	3.11	1.51	3.46	3.31	1.43
96	3.09	3.07	2.75	3.11	2.88
108	2.46	2.47	2.75	2.33	4.04
120	4.10	3.57	3.85	0.58	2.86
132	1.93	4.08	4.23	3.98	3.02
144	2.73	2.77	3.26	2.93	2.68
156	2.79	2.61	2.95	2.70	2.70
168	3.16	4.55	4.44	1.06	3.89
180	3.60	3.55	3.53	3.38	2.53
192	4.77	4.40	4.83	4.33	2.44
204	3.81	3.72	3.95	4.21	3.39
216	3.83	3.78	3.85	3.80	3.98
228	5.13	4.70	3.28	4.87	1.13
240	5.07	4.94	1.09	4.48	5.04
252	4.90	3.74	3.24	4.46	2.73
264	4.52	3.93	4.35	4.22	3.95
276	5.13	5.41	5.62	5.34	4.24
288	5.03	4.87	4.96	5.18	5.39
300	5.26	5.10	4.54		

Таблица Е.5 – Качественный анализ концентрации соматических клеток, группа 4
(субклинический мастит)

Время, с	Индекс соматических клеток, у. ед.				
	1	2	3	4	5
12	0.069	0.084	0.074	0.082	0.072
24	0.075	0.071	0.074	0.066	0.076
36	0.068	0.073	0.068	0.070	0.074
48	0.065	0.071	0.072	0.071	0.072
60	0.068	0.070	0.067	0.070	0.078
72	0.072	0.068	0.076	0.073	0.082
84	0.068	0.070	0.076	0.067	0.068
96	0.061	0.064	0.079	0.065	0.072
108	0.072	0.071	0.091	0.066	0.074
120	0.071	0.070	0.070	0.078	0.062
132	0.065	0.067	0.085	0.086	0.066
144	0.071	0.063	0.076	0.067	0.067
156	0.070	0.069	0.082	0.070	0.070
168	0.070	0.069	0.076	0.073	0.082
180	0.070	0.074	0.072	0.067	0.064
192	0.064	0.075	0.066	0.075	0.068
204	0.071	0.067	0.080	0.074	0.083
216	0.071	0.072	0.079	0.084	0.071
228	0.065	0.076	0.072	0.073	0.068
240	0.063	0.069	0.067	0.074	0.068
252	0.067	0.070	0.074	0.088	0.072
264	0.071	0.071	0.070	0.081	0.076
276	0.064	0.074	0.083	0.077	0.080
288	0.062	0.075	0.082	0.080	0.071
300	0.065	0.070	0.074	0.081	0.069

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Акт натурных испытаний

УТВЕРЖДАЮ

Исполняющий обязанности директора

ГБС РАН

Паштецкий А.В./

26.03. 2024 г.



АКТ

натурных испытаний

устройства экспресс-анализа качества молока в процессе доения

1. Для определения работоспособности устройства экспресс-анализа качества молока в процессе доения, разработанного Хакимовым Артемом Рустамовичем в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ создана комиссия в составе:

От ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в лице:

- руководитель научного направления «Механизация животноводства», к.т.н. Павкин Дмитрий Юрьевич;
- заведующий лабораторией «Цифровые системы мониторинга для животноводства», к.т.н. Юрочка Сергей Сергеевич;
- младший научный сотрудник Хакимов Артем Рустамович.

От Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина Российской академии наук (ГБС РАН) в лице:

- зоотехник Анисимова Екатерина Сергеевна;
- ветврач Дыев Николай Васильевич.

составили настоящий акт о том, что на ферме по содержанию крупного рогатого скота молочного направления были проведены натурные испытания рабочего макета.

Объект испытаний:

Прототип устройства экспресс-анализа качества молока в процессе доения.

2. Место проведения испытаний:

Россия, Московская область, г.о. Истра, с Рождествено, ул. Центральная, д. 1, молочная ферма Опытная станция «СНЕГИРИ».

3. Условия проведения испытания:

Испытания проводились путем подключения прототипа устройства к молочному шлангу доильного аппарата, подключенному к молочной линии. Были отобраны 10 животных по признаку «здоровые, без маститов».

Используемые приборы и оборудование:

- ноутбук;
- блок питания KG-1220;
- доильный аппарат.

4. Характер проводимых испытаний:

- измерение процентной концентрации жира в турбулентном потоке молоковоздушной смеси, протекающей в молочном шланге каждые 15 секунд;

5. В результате проведенных испытаний комиссия отмечает:

- исследования проведены согласно запланированной методике в полном объеме;

- прототип устройства экспресс-анализа качества молока в процессе доения проводит измерения в соответствии с заданным интервалом (каждые 15 секунд);
- погрешность измерений процентной концентрации жира в турбулентном потоке молоковоздушной смеси, протекающей в молочном шланге, составила 7 %;

6. Предложения и рекомендации:

- При подключении прототипа устройства молочный шланг желательно зафиксировать в вертикальном положении для центровки потока внутри молочного шланга.

7. Выводы:

- разработанный прототип устройства экспресс-анализа качества молока в процессе доения апробирован на молочной ферме ФГБУ ОПЫТНАЯ СТАНЦИЯ «СНЕГИРИ» при машинном доении в молочную линию;
- прототип устройства экспресс-анализа качества молока в процессе доения работоспособен и отвечает заявленным требованиям, предъявляемым к прототипу.

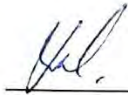
Руководитель научного
направления «Механизация
животноводства», к.т.н.

 П. В. Пonomarev

Заведующий лабораторией
«Цифровые системы мониторинга
для животноводства», к.т.н.

 А. С. Фролов

М.л.н.с. ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

 А. Р. Якимов

Зоотехник ФГБУ ОПЫТНАЯ
СТАНЦИЯ «СНЕГИРИ»

 Анисимова С. Е.

Ветврач ФГБУ ОПЫТНАЯ
СТАНЦИЯ «СНЕГИРИ»

 Зарев Н. В.