На правах рукописи



МАСЛОВ МАКСИМ МИХАЙЛОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ САНИТАРНОЙ ОБРАБОТКИ ДОИЛЬНЫХ УСТАНОВОК ЛИНЕЙНОГО ТИПА

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Княгинино – 2026

Работа выполнена в Государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (ГБОУ ВО НГИЭУ) на кафедре «Технические системы и технологии»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Матвеев Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты: **Кузина Жанна Ивановна**
доктор технических наук, научный консультант лаборатории санитарной обработки ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности»

Павкин Дмитрий Юрьевич
кандидат технических наук, руководитель научного направления «Механизация животноводства» ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Великолукская государственная сельскохозяйственная академия»

Защита состоится 24 декабря 2026 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 72.2.016.02 при ГБОУ ВО НГИЭУ по адресу: 606360, Россия, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а, аудитория 121.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГБОУ ВО НГИЭУ и на сайте https://ngieu.ru/state-scientific-attestation/dissovet-72201602/maslov-mm/.

Автореферат разослан _____2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Тареева Оксана Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Технологические характеристики молока-сырья, обусловливающие возможность его глубокой промышленной переработки, определяются комплексом физико-химических и санитарно-гигиенических параметров. Ключевыми среди них выступают концентрация соматических клеток, показатель кислотности и степень бактериальной обсеменённости. Данные показатели находятся в функциональной зависимости от санитарно-гигиенического состояния внутренних рабочих поверхностей элементов доильного и охладительного оборудования.

Анализ структуры отечественного парка доильного оборудования показывает, что при привязном содержании крупного рогатого скота наиболее распространены линейные доильные установки с молокопроводом (до 70–80 % от общего числа эксплуатируемого оборудования), характеризующиеся значительной протяженностью транспортных линий – от 100 до 200 м. Высокая удельная площадь контакта внутренней поверхности молокопровода с транспортируемым сырьём (молоком) существенно усложняет процесс обеспечения высоких санитарно-гигиенических показателей оборудования. Так, на примере хозяйств Нижегородской области установлено, что до 5 % объема производимого молока-сырья ежегодно реализуется по сниженной цене вследствие интенсификации микробиологических процессов и роста кислотности, вызванных ненадлежащей санитарной обработкой доильного оборудования.

Таким образом, формируется выраженное технологическое противоречие: повышение эффективности санитарной обработки традиционными гидродинамическими методами достигается за счёт увеличения удельного расхода тепловой и электрической энергии, а также объёмов моюще-дезинфицирующих средств, что ведёт к необоснованному росту энерго- и материалоемкости процесса.

Решением этой актуальной научной и практической проблемы является разработка альтернативных ресурсосберегающих способов и технических средств очистки молокопроводов доильных установок, обеспечивающих снижение ресурсоёмкости процесса при гарантированном соблюдении санитарно-гигиенических требований к качеству молока-сырья.

Степень разработанности темы. Теоретической и методологической основой диссертационной работы выступают научные концепции и исследования отечественных и зарубежных учёных в области санитарной обработки доильных установок. Среди них следует отметить работы Р.Г. Алагезяна, И.И. Архангельского, Ю.И. Беляевского, В.И. Березуцкого, А.Е. Брагиной, О.А. Герасимовой, Г.П. Дегтерева, Б.А. Доронина, А.М. Жмырко, Ю.П. Золотина, А.И. Зеленцова, Ю.Г. Иванова, Л.П. Карташова, В.В. Кирсанова, Ж.И. Кузиной, П.А. Курунина, Р.А. Мамедовой, В.В. Молочникова, В. Моора, Ф.В. Неволина, Д.Ю. Павкина, С.В. Соловьева, С.В. Харькова, Ю.А. Цоя, R.S. Gates, D.J. Reinemann и др.

В результате анализа научных работ выявлено, что, несмотря на высокую эффективность предложенных разработок, недостаточное внимание уделено

аспектам комплексной технологии применения технических решений для санитарной обработки доильных установок.

Целью диссертационной работы является совершенствование технологии и технических средств гидромеханической очистки внутренней поверхности молокопроводов доильных установок линейного типа, позволяющих повысить эффективность санитарной обработки.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи:**

– проанализировать существующие способы и системы санитарной обработки доильных установок;

– теоретически обосновать технологию санитарной обработки молокопровода доильной установки и технических средств для гидромеханической очистки при её реализации;

– провести экспериментальные исследования рабочего процесса модернизированной системы санитарной обработки и оценить влияние конструкционных и режимных параметров предложенных технических решений на качество санитарной обработки молокопроводов доильных установок;

– провести производственные испытания усовершенствованной технологии санитарной обработки и технических средств для ее реализации с оценкой экономической эффективности предложенных технико-технологических решений.

Объект исследования – процесс санитарной обработки молокопроводов доильных установок линейного типа.

Предмет исследования – конструкционные и технологические параметры технических средств и показатели качества санитарной обработки внутренней поверхности молокопроводов доильных установок.

Научная новизна работы:

- разработана технология санитарной обработки молокопроводов доильных установок, предусматривающая применение механических очистителей с активными рабочими органами и устройства их подачи (патент на изобретение РФ №2737968 «Способ санитарной обработки молокопроводов доильных установок»);

- установлена теоретическая зависимость максимальной длины механического очистителя с активными рабочими органами, обеспечивающая его поступательно-вращательное движение;

- выявлена теоретическая зависимость объема моюще-дезинфицирующего раствора для промывки доильной установки с учетом применения механических очистителей;

- определены рациональные режимы санитарной обработки молокопроводов с использованием механических очистителей с активными рабочими органами;

- получены модели регрессии рабочего процесса механического очистителя с активными рабочими органами, позволяющие определить его рациональные конструктивно-технологические параметры.

Техническая новизна механического очистителя с активными рабочими органами и устройства их подачи подтверждена патентами на изобретение РФ № 2688830 и № 2728661.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в развитии научно-методических основ санитарной обработки доильного оборудования в молочном животноводстве. Предложенные функционально-морфологическая модель и структурно-логическая схема системы санитарной обработки (с учётом молокопровода и автомата промывки) расширяют теоретические представления о функционировании подобных систем. Полученные закономерности взаимодействия механических очистителей с поверхностями молокопроводов углубляют понимание физико-химических и механических процессов очистки, дополняя существующую научную базу отрасли.

Разработанные способ санитарной обработки и технические средства могут быть использованы на молочно-товарных фермах сельскохозяйственных организаций, оборудованных доильными установками линейного типа.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы наблюдения, функциональной классификации, корреляционного и регрессионного анализа, законы и положения механики, жидкостного трения и пластического деформирования.

Достоверность основных положений и выводов подтверждена сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, результатами производственной проверки и внедрением усовершенствованной технологии санитарной обработки и технических решений.

Основные положения, выносимые на защиту:

- технология санитарной обработки молокопроводов доильных установок;
- теоретическая зависимость максимальной длины механического очистителя с активными рабочими органами;
- теоретическая зависимость объема моюще-дезинфицирующего раствора для промывки доильной установки с учетом применения механических очистителей;
- рациональные режимы санитарной обработки молокопроводов с использованием механических очистителей с активными рабочими органами;
- модели регрессии рабочего процесса механического очистителя с активными рабочими органами.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования были представлены в виде докладов на научно-практических конференциях и семинарах, а именно: Международная научно-практическая конференция «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы» (г. Екатеринбург, 2017 г.), Международная научно-практическая конференция «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы» (г. Пермь, 2018 г.), Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные направления развития техники и технологии в России и за рубежом – реалии, возможности, перспективы» (г. Княгинино, 2019 г.), Международная научно-практическая конференция «Современная наука: активные проблемы и перспективы развития» (г. Княгинино, 2019 г.), XXIV Нижегородская сессия молодых ученых (г.Н.Новгород, 2019 г.), конкурс инновационных проектов «УМНИК-2019» (г. Н.Новгород, 2019 г.), III Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и технологии в современном мире» (г. Княгинино, 2024 г.),

IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и технологии в современном мире» (г. Княгинино, 2024 г.), V Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и технологии в современном мире» (г. Княгинино, 2025 г.).

Результаты диссертационной работы апробированы и внедрены на молочно-товарной ферме в СПК «Заря» Пильнинского муниципального округа Нижегородской области и в учебный процесс ГБОУ ВО Нижегородского государственного инженерно-экономического университета.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 23 печатных работах, в том числе: 9 работ, в изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты на соискание учёной степени кандидата наук, 3 патента на изобретение и 2 публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных и системах цитирования Web of Science.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Содержит 150 страниц машинописного текста, 56 рисунков и 26 таблиц. Библиография включает 130 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, дана общая характеристика работы, изложены основные научные положения и результаты исследования, выносимые на защиту.

Первая глава «Состояние вопроса и задачи исследования» посвящена анализу показателей эффективности санитарной обработки доильного оборудования, на основании которого выявлено, что из-за повышения санитарных требований к производимому молоку возрастает значимость качества её выполнения. Для повышения эффективности санитарной обработки доильных установок на молочно-товарных фермах сельскохозяйственных организаций возможно применить следующие технические решения: повторное использование моюще-дезинфицирующего раствора, повышение температуры моюще-дезинфицирующего раствора, изменение режимов движения моюще-дезинфицирующего раствора; применение механических очистителей; применение более агрессивных моющих средств.

Анализ научных исследований и патентных решений в области совершенствования систем промывки доильного оборудования позволяет сделать вывод, что наиболее перспективными являются системы с использованием механических очистителей, так как они практически не требуют дополнительных вложений.

Во второй главе «Теоретические исследования процесса промывки доильных установок» на основание функционально-морфологической модели системы санитарной обработки доильной установки и её структурно-логической схемы усовершенствован способ санитарной обработки за счёт подачи поролонового пыжа во время предварительного ополаскивания и механических очистителей на стадии циркуляции моюще-дезинфицирующего устройства во время циркуляционной промывки.

В результате изменения способа промывки усиливается механическое воздействие на внутреннюю поверхность молокопровода, а, следовательно, и на загрязнение.

Из-за того, что молочное загрязнение в зависимости от степени минерализации имеет разлиную консистенцию (мягкая пластичная жировая пленка и твердое минеральное отложение в виде «молочного камня») было разработано два варианта чистящей основы механического очистителя – поролоновая и щетинистая.

Техническая реализация предложенного способа санитарной обработки отражена в конструктивно-технологической схеме доильной установки в режиме промывки, представленной на рисунке 1.

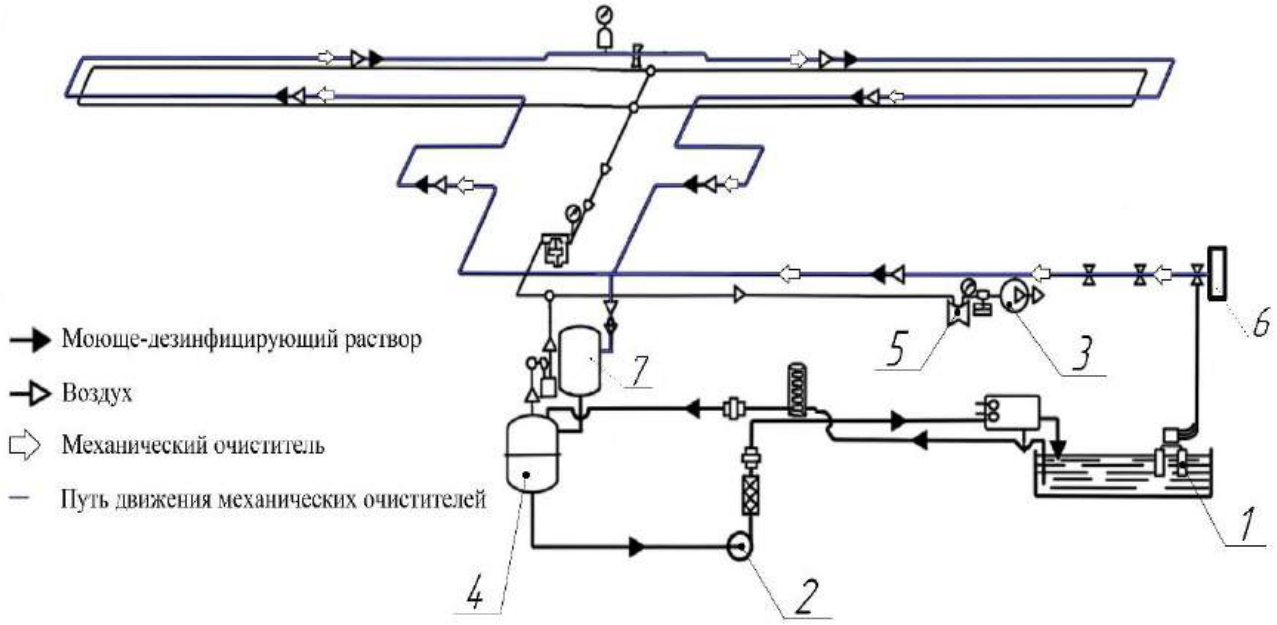
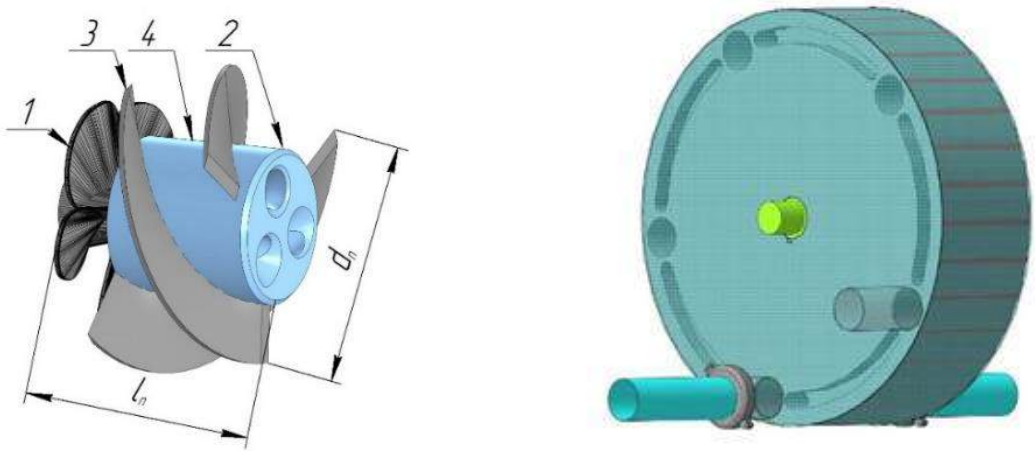


Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема доильной установки в режиме промывки: 1 – доильные аппарат; 2 – насос; 3 – вакуумный насос; 4 – бак моюще-дезинфицирующего раствора; 5 – вакуум-регулятор; 6 – устройство подачи механических очистителей; 7 – молокоприемник

Реализация способа потребовала модернизации механического очистителя (рисунок 2, а) и разработки устройства их подачи (рисунок 2, б), позволяющего изменить количество и время подачи механических очистителей.

Усовершенствованный механический очиститель имеет приводной элемент 1, винтовые каналы 2 и винтовую форму чистящего элемента 3, которые приводят во вращательное движение устройство под действием вакуума. Винтовые каналы придают вращательный момент и снижают линейную скорость устройства.

Усовершенствованный механический очиститель работает следующим образом: поток воздуха и моющего раствора воздействует на жестко соединенный с корпусом чистящего устройства 4 приводной элемент 1, придавая ему вращательный момент и продолжает движение через винтовые каналы 2. При движении через каналы 2 поток оказывает давление на их стенки, придавая дополнительный вращательный момент устройству.



а б

Рисунок 2 – Общий вид разработанных устройств: а – механический очиститель с активными рабочими органами; б – устройство подачи

Направление винтовых каналов 2 соответствует направлению лопастей приводного элемента 1. На корпусе чистящего устройства 4 жестко закреплены минимум 3 ряда чистящих элементов 3, изогнутых по винтовой линии относительно продольной оси корпуса чистящего устройства 4. При вращении корпуса чистящего устройства 4 чистящий элемент 3 оказывает механическое воздействие на загрязнение, в результате которого оно разрушается и попадает в пространство между рядами и удаляется потоком моющего раствора.

Общая длина устройства $l_п$ ограничена внутренним диаметром молокопровода $d_м$, так как при ее уменьшении снижается эффективность устройства, а при значительном увеличении сила трения превышает крутящий момент.

Диаметр рассматриваемого механического очистителя определяется:

$$d_м = d_к + 2l_щ, \quad (1)$$

где $d_м$ – диаметр механического очистителя, мм; $d_к$ – диаметр корпуса механического очистителя, мм; $l_щ$ – длина щетины, мм.

Исходя из условия непрерывности вращательно-поступательного движения механического очистителя при прохождении поворота, максимальная длина механического очистителя равна:

$$l_п = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{d_м}{2} - \frac{d_к}{2} - \delta \right) \cdot \left(R_м + \frac{d_м}{2} \right)} \cdot \cos\alpha, \quad (2)$$

где δ – толщина слоя максимально сжатой щетины, мм; $R_м$– радиус изгиба молокопровода, мм.

Из анализа полученной зависимости следует, что максимальная длина механического очистителя ограничивается параметрами обрабатываемого молокопровода ($d_м$, $R_м$, $cos\alpha$), диаметром корпуса механического очистителя $d_к$ и толщиной несжимаемого слоя чистящего элемента δ. Это позволяет научно обосновать габариты модернизированного очистителя из условия обеспечения проходимости и сохранения возможности вращения.

Анализ полученных данных позволяет научно обосновать габариты модернизированного очистителя из условия обеспечения проходимости и

сохранения возможности вращения. Рационально выбирать диаметр корпуса в пределах 25 – 30 мм, что позволит увеличить его длину (и, как следствие, площадь контакта) до 40 – 48 мм в зависимости от типа щетины.

Эффективность очистки стенок молокопровода зависит от силы воздействия потока на пристеночный слой, которая выражена в форме касательных напряжений τ, создаваемых потоком на пристеночный слой. Её можно выразить через критическую энергию деформации $U_{кр}$:

$$U_{кр} = \int_S E \cdot dS \,, \tag{3}$$

где E – энергия сдвига, затрачиваемая на деформацию материала, Нм, S площадь воздействия, м^2.

Согласно Л. Прандтлю существует связь между законом Блазиуса и распределением скоростей внутри потока, определяемая по формуле:

$$\tau_i = 0{,}0225 \cdot \rho \cdot u^{\frac{7}{4}} \cdot \left(\frac{\upsilon}{R}\right)^{\frac{1}{4}} = 0{,}03955 \cdot \rho \cdot \left(\frac{V_i}{\pi R^2 t_i}\right)^{\frac{7}{4}} \cdot \left(\frac{\upsilon}{R}\right)^{\frac{1}{4}}, \tag{4}$$

где ρ – плотность моюще-дезинфицирующего раствора, кг/м^3; u– средняя скорость движения пробки, м/с; υ – кинематическая вязкость моюще-дезинфицирующего раствора, м^2/с; R – радиус молокопровода, м.

При усовершенствованной технологии что к касательным силам добавляется механическое воздействие за счёт подачи нескольких чистящих пыжей. Тогда справедливо равенство:

$$\tau_0 \cdot S = \tau_1 \cdot (S + \Delta S) + \frac{n \cdot F_{mp}}{S_n}, \tag{5}$$

где n – количество механических очистителей; F_{mp}– сила трения, создаваемое механическим очистителем, Н; τ_0 – касательные напряжения гидравлического потока без использование механических очистителей, МПа; τ_1 – касательные напряжения гидравлического потока при использование механических очистителей, МПа, S – площадь обрабатываемой поверхности, м^2; ΔS – увеличение площади за счет деформации загрязнения, м^2; S_n – площадь чистящей поверхности механического очистителя, м^2.

После выполнения преобразования выражение примет вид:

$$V_1 = \left(\frac{V_0^{\frac{7}{4}} \cdot t_0^{\frac{1}{4}} \cdot S}{t_1^{\frac{1}{4}} \cdot (S + \Delta S)} - \frac{n \cdot F_{mp} \cdot t_1^{\frac{7}{4}} \cdot \pi^{\frac{7}{4}} \cdot R^2}{0{,}0225 \cdot \rho \cdot \upsilon^{\frac{1}{4}} \cdot S_n} \right), \tag{6}$$

где t_0 – время циркуляции моюще-дезинфицирующего раствора без использования механических очистителей, с; t_1 – время циркуляции моюще-дезинфицирующего раствора при использовании механических очистителей, с; V_0 – объём моюще-дезинфицирующего раствора при промывке без механических очистителей, м^3; V_1 – объём моюще-дезинфицирующего раствора при промывке при использовании механических очистителей, м^3.

Из этого следует, что максимальное сокращение объёма моюще-дезинфицирующего раствора возможно при максимальной длительности циркуляции и максимальном количестве механических очистителей.

Расчет F-критерий Фишера с помощью программы Excel (F-test = 0,92) подтверждает сходимость результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

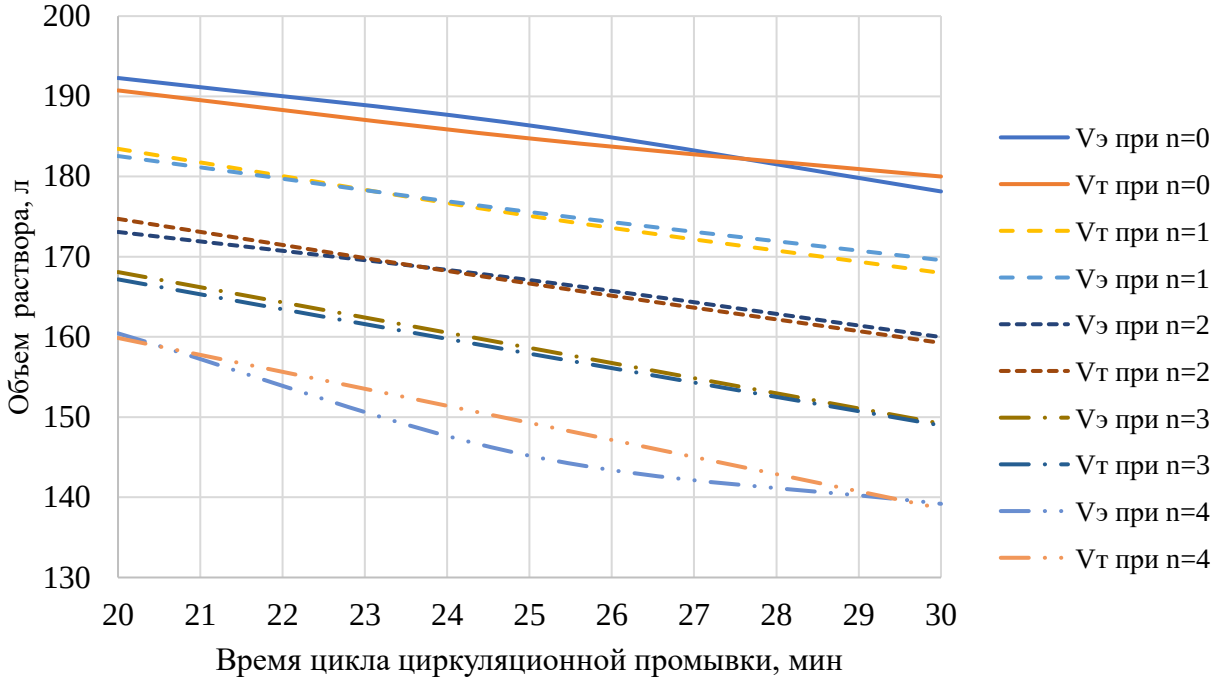


Рисунок 3 – Необходимый объем моюще-дезинфицирующего раствора в зависимости от времени его циркуляции и количества применяемых механических очистителей

Согласно полученной теоретической зависимости при использовании четырёх механических очистителей с чистящей поверхностью из щетины допустимо снижение объема моюще-дезинфицирующего раствора до 138 л без снижения продолжительности циркуляции и снижение объема до 161 л при сокращении его циркуляции до 20 мин (рисунок 3).

В третьей главе «Методика проведения экспериментальных исследований» представлены общие сведения о программе исследований, лабораторные установки и оборудование, методика определения силы трения чистящего элемента о внутреннюю поверхность молокопровода, методика определения бактериального обсеменения поверхности доильного оборудования и методика определение скорости движения и частоты вращения механического очистителя. Для реализации программы экспериментальных исследований были спроектированы и реализованы два варианта механических очистителей с активными рабочими органами и чистящей поверхностью из щетины и поролона, а также устройство их подачи в молокопровод (рисунок 4).



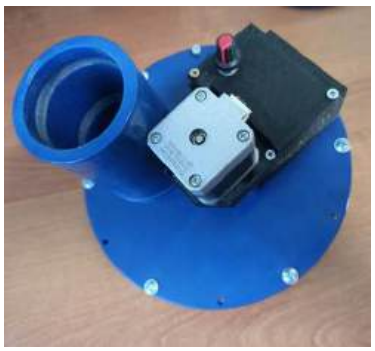


Рисунок 4 – Общий вид изготовленных технических средств

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований, усовершенствованных технологии и технических средств» определены рациональные конструктивно-технологические параметры корпуса и чистящего элемента, а также режимов работы технологии санитарной обработки.

На первом этапе исследовались конструкционные параметры корпуса механических очистителей, к которым относятся параметры центрального барабана (диаметр перепускного канала $d_{пк}$, количество перепускных каналов $n_{пк}$ и наружный диаметр корпуса $d_{в}$), чистящего элемента (длина щетины $l_{щ}$, её плотность $n_{щ}$ и диаметр $d_{щ}$) и винта (количество лопастей, угол атаки лопасти, профиль лопасти).

В качестве критерия оптимизации выбраны частота вращения механического очистителя ω и его линейная скорость V. При этом следует отметить, что наибольшая эффективность очистки внутренней поверхности молокопровода при использовании механических очистителей достигается при его минимальной линейной скорости и максимальной частоте вращения.

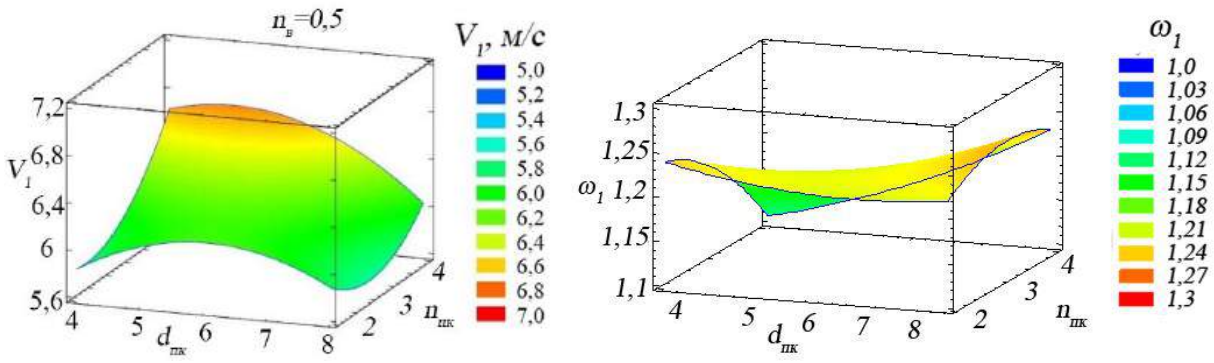
С целью определения оптимальных значений показателей и установления их взаимосвязи был реализован план эксперимента и получены регрессионные модели выбранных критериев:

$$V_1 = 2,2 + d_{пк} - 0,4n_{пк} + 3,9n_{в} - 0,1d_{пк}^2 - 0,1d_{пк}n_{пк} + 0,1d_{пк}n_{в} + 0,3n_{пк}^2 - 0,7n_{пк}n_{в} - 1,1n_{в}^2; \quad (7)$$

$$\omega_1 = 1,74 - 0,1d_{пк} - 0,001n_{пк} - 0,69n_{в} + 0,003d_{пк}^2 + 0,02d_{пк}n_{пк} + 0,02d_{пк}n_{в} - 0,02n_{пк}^2 + 0,25n_{в}^2. \quad (8)$$

Оценка адекватности регрессионных моделей (7) и (8) проводилась по коэффициентам детерминации R^2, которые составили 99,16 и 99,32 % соответственно.

По результатам полученных регрессионных моделей построены поверхности отклика (рисунок 5). Согласно полученным моделям, оптимальный результат достигается при следующих значениях факторов: $d_{пк} = 8$ мм, $n_{пк} = 3$ шт. и $n_{в} = 0,5$ витка, а критерии оптимизации равны $V_1 = 5,69$ м/с и $\omega_1 = 1,24$ с$^{-1}$.



а б

Рисунок 5 – Поверхности отклика: а – линейная скорость V_1 механического очистителя, м/с; б – частота вращения ω_1 механического очистителя, $с^{-1}$; $d_{пк}$ – диаметр перепускного канала, мм; $n_{пк}$ – количество перепускных каналов, ед; $n_в$ – количество витков спирали, ед.

На следующем этапе исследовалось влияние конструктивно-технологических параметров чистящего элемента механического очистителя на его линейную скорость V_2 и частоту вращения ω_2.

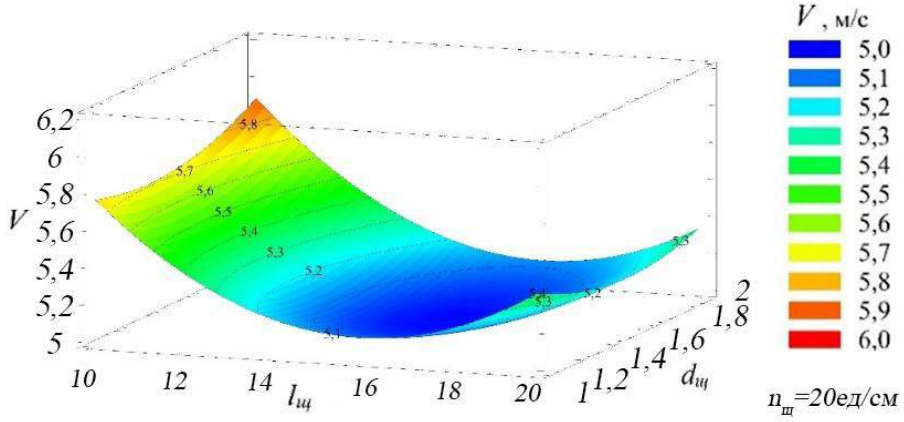
Плотность щетин $n_щ$ в пазах корпуса механического очистителя варьировалась от 10 до 30 шт. на сантиметр. При этом для обеспечения перекрытия щетина должна располагаться минимум в два ряда. Диаметр щетины изменялся в пределах от 1,5 мм до 2,5 мм. Для расчета оптимальных значений факторов и оценки их влияния на отклик был разработан план эксперимента для 3-ех факторов на 3-ех уровнях.

В результате обработки экспериментальных данных получены регрессионные модели выбранных критериев:

$$V_2 = 9{,}87 - 0{,}57 \cdot l_щ + 0{,}04 \cdot n_щ - 1{,}09 \cdot d_щ + 0{,}018 \cdot l_щ^2 - 0{,}02 \cdot l_щ d_щ - 0{,}0007 \cdot n_щ^2 + 0{,}005 \cdot n_щ d_щ + 0{,}44 \cdot d_щ^2; \quad (9)$$

$$\omega_2 = -1{,}73 + 0{,}25 \cdot l_щ + 0{,}01 \cdot n_щ + 1{,}63 \cdot d_щ - 0{,}01 \cdot l_щ^2 - 0{,}002 \cdot l_щ n_щ - 0{,}03 \cdot l_щ d_щ + 0{,}01 \cdot n_щ d_щ - 0{,}48 \cdot d_щ^2; \quad (10)$$

Оценка адекватности регрессионной модели проводилась по коэффициенту детерминации R^2, который равнялся 98,7 и 94,1 % соответственно. Полученные регрессионные модели позволяют построить поверхности отклика.



V_2 – линейная скорость механического очистителя, м/с;
$l_щ$ – длина щетинок, мм;
$n_щ$ – плотность щетинок, ед./см;
$d_щ$ – диаметр щетинок, мм^2

Рисунок 6 – Зависимости линейной скорости V_2 механического очистителя от длины $l_щ$ и диаметра $d_щ$ щетинок при их плотности $n_щ$ = 20 ед./см

Согласно полученным моделям регрессии оптимальный результат достигается при следующих значениях факторов: $l_{щ} = 17$ мм, $n_{щ} = 20$ ед./см и $d_{щ} = 1{,}5$ мм^2. При оптимальных значениях факторов критерии оптимизации равны $V_2 = 5$ м/с и $\omega_2 = 1{,}42$ с$^{-1}$.

С целью определения оптимального количества подаваемых очистителей, был проведен эксперимент, где в качестве критерия оптимизации выбрано количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов. В качестве факторов были выбраны: количество подаваемых механических очистителей и их тип. Количество подаваемых очистителей принято по результатам анализа предыдущих исследований и имело значение 1 – 6 с интервалом варьирования, равным 1.

Определение КМАФАнМ проводилось путём забора проб смывов с внутренней поверхности молокопровода доильной установки непосредственно перед рабочим циклом доения при трехразовом доении (рисунок 7).



Рисунок 7 – Образцы проб микробиологического экспресс-теста «Биоконтроль»

Регрессионная модель в раскодированном виде при 95 % доверительной вероятности имеет вид:

$$\eta = 2{,}38378 - 0{,}38231 \cdot N + 1{,}74417 \cdot k + 0{,}0265476 \cdot N^2 - 0{,}559167 \cdot k^2. \quad (11)$$

Коэффициент детерминации R^2 регрессионной модели составил 93,12 %, что свидетельствует об адекватности модели, следовательно она может быть применима для описания изучаемого процесса.

На основании полученной модели регрессии построены поверхности отклика (рисунок 8).

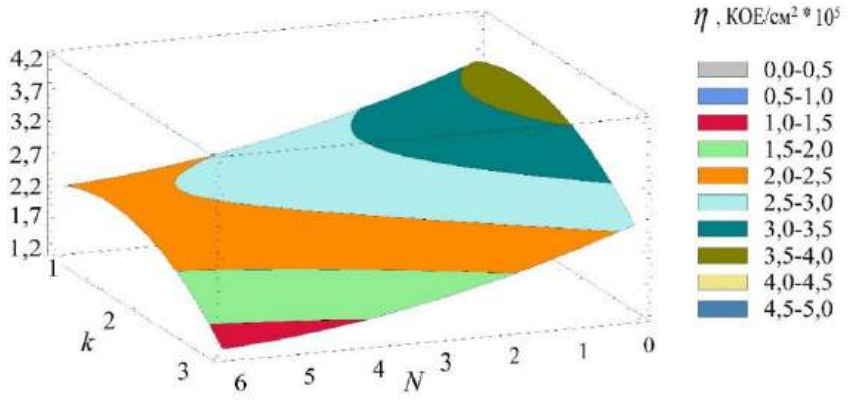


Рисунок 8 – Поверхность отклика: η – уровень КМАФАнМ, КОЕ/см^2 10^5; N – количество подаваемых механических очистителей, шт.; k – тип механических очистителей

В результате анализа полученной регрессионной модели выявлено, что максимальный чистящий эффект достигается при подаче 6 механических очистителей. Однако, из-за незначительного увеличения эффективности при подаче 5-6-ого очистителя, принято, что оптимальным числом является 4 шт. Оптимальный чистящий эффект достигнут механическими очистителями из щетины, который на 48% эффективнее очистителей из поролона.

Экспериментально обоснованы параметры подачи очистителей, где в качестве факторов выбраны время подачи первого механического очистителя t_1 и интервал времени между смежными механическими очистителями Δt. Значения фактора t_1 соответствовали времени подачи первого механического очистителя и варьировались в интервале от 1 до 21 мин с шагом в 5 мин. Значения фактора Δt принимались, исходя из определения влияния оптимального временного интервала между запуском механических очистителей. Фактор Δt принимал значения 0–2 мин с интервалом варьирования 0,5 мин. Данное время необходимо для обеспечения взаимодействия моюще-дезинфицирующего раствора с загрязнением.

По результатам обработки экспериментальных данных получена регрессионная модель при 95 % доверительной вероятности:

$$\eta = 131{,}314 - 1{,}17771 t_1 - 24{,}9143 \Delta t + 0{,}217714 t_1 + 12{,}4571 \Delta t^2 . \qquad (12)$$

Оценка адекватности регрессионной модели проводилась по коэффициенту детерминации R^2 = 98,96 %.

На рисунке 9 приведены поверхности отклика, характеризующие влияние исследуемых факторов на эффективность санитарной обработки.

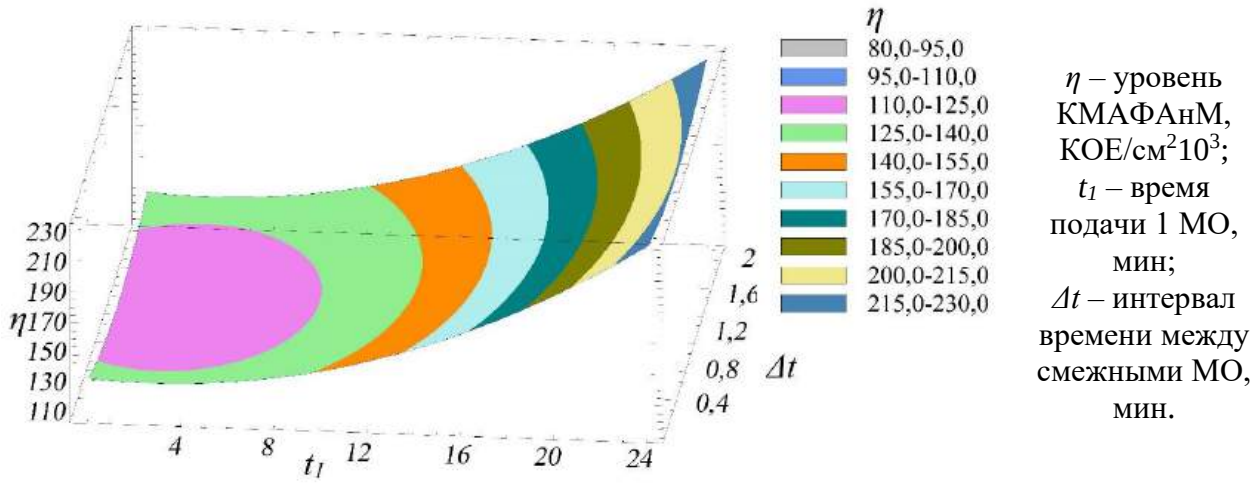


Рисунок 9 – Поверхности отклика, характеризующая влияние времени подачи механических очистителей t_1 и интервалов времени между смежными очистителями Δt на эффективность η санитарной обработки (КМАФАнМ)

Оптимальное значение критерия оптимизации достигается при подаче 4 механических очистителей спустя 2,7 мин от начала цикла циркуляционной промывки с интервалом времени в 1 мин.

С целью определения влияния количества подаваемых механических очистителей с активными рабочими органами на объем моюще-дезинфицирующего раствора и время его циркуляции было проведено

планирование многофакторного эксперимента, где в качестве критерия оптимизации был выбран минимальный уровень КМАФАнМ.

Значения фактора *V* соответствовали объему моюще-дезинфицирующего раствора, используемого при циркуляционной промывке, с варьированием в интервале от 130 до 180 л с шагом в 25. Дальнейшее уменьшение объема недопустимо из-за условия реализации пробкового турбулентного движения жидкости. Фактор *t* принимал значения 20–30 мин с интервалом варьирования 5 мин. Дальнейшее уменьшение фактора недопустимо, так как достигнуто минимальное рекомендованное производителем моющих средств. Значение фактора *n* было выбрано на основе предыдущих исследований и варьировалось в диапазоне от 0 до 4 ед.

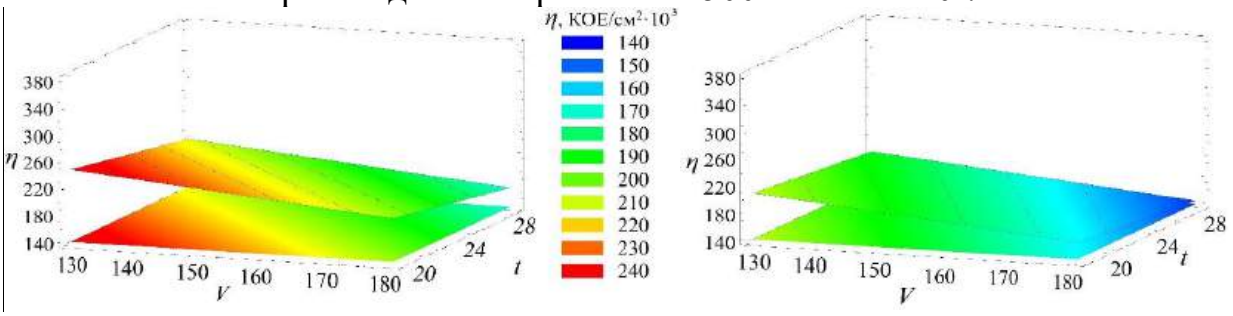
В результате обработки экспериментальных данных получена регрессионная модель при 95 % доверительной вероятности:

$$\eta = 625{,}591 - 0{,}862667 \cdot V - 8{,}42 \cdot t - 65{,}05 \cdot n_м + 1{,}59667 \cdot tn_м . \quad (13)$$

Оценка адекватности регрессионной модели проводилась по коэффициенту детерминации R^2, который равнялся 98,91 %.

На основании полученной модели регрессии построены поверхности отклика, характеризующие влияние исследуемых факторов на эффективность санитарной обработки доильной установки (рисунок 10).

По данным исследований, проводимых Ушаковым Ю.А., уровень бактериального загрязнения доильной установки после промывки для получения молока высшего сорта не должен превышать 500 КОЕ/см$^2 \cdot 10^3$.



а б

Рисунок 10 – Зависимости уровня η эффективности санитарной обработки КМАФАнМ (КОЕ/см$^2 \cdot 10^3$) от объёма раствора *V* (л/мин), времени циркуляции раствора *t*, (мин) и количества механических очистителей *N*: а – *N* = 4; б – *N* = 3

Согласно результатам эксперимента, допустимым уровнем КМАФАнМ является 220–240 КОЕ/см$^2 \cdot 10^3$, который достигается при подаче 4 механических очистителей с активными рабочими органами и циркуляции 151,18 л моюще-дезинфицирующего раствора в течение 20,38 мин.

В пятой главе «Производственная апробация и оценка их экономической эффективности» приведены результаты производственных испытаний и результаты расчёта экономических показателей. В результате производственных испытаний в СПК «Заря» Нижегородской области подтверждено, что при применении четырех механических очистителей, 160 л моюще-дезинфицирующего раствора температурой 60 °С и продолжительности циркуляционной промывки 20 минут выдоенное молоко соответствует

нормативным требованиям высшего сорта.

В результате расчетов годового экономического эффекта сокращение удельных производственно-эксплуатационных затрат на электроэнергию, воду и моющие средства при использовании усовершенствованного способа санитарной обработки составило 24,3 %, а также 5%-е увеличение количества молока. Годовой экономический эффект составил 646926 рублей, а срок окупаемости дополнительных капитальных вложений 0,15 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенного анализа существующих систем санитарной обработки доильных установок линейного типа, основанных на циркуляционной промывке молокопроводов, выявлено, что качественное выполнение операции затруднено значительными тепловыми потерями и нарушением режимов движения моюще-дезинфицирующего раствора, значительным количеством угловых и стыковых соединений и большой площадью обрабатываемой поверхности.

2. Для снижения энергетических затрат и уменьшения продолжительности операции разработан способ, предусматривающий подачу поролонового пыжа на стадии циркуляции во время предварительного ополаскивания, механических очистителей – на стадии циркуляции моюще-дезинфицирующего устройства во время циркуляционной промывки и диагностического устройства в начале осушения. Для реализации усовершенствованного способа санитарной обработки спроектировано устройство автоматической подачи механических очистителей, представляющее из себя барабан с отверстиями, позволяющее минимизировать вероятность несвоевременной подачи механических очистителей.

С целью повышения эффективности санитарной обработки усовершенствована конструкция механического очистителя с активными рабочими органами, состоящего из корпуса с 3 сквозными отверстиями, изогнутыми по винтовой линии, и с 3 изогнутыми чистящими элементами.

Получена теоретическая зависимость расчета максимальной длины механического очистителя с активными рабочими органами, учитывающая геометрические параметры молокопровода и чистящего элемента. Установлено, что для молокопровода диаметром 50 мм рационально выбирать диаметр корпуса механического очистителя в пределах 25 – 30 мм, что обеспечит возможность применения очистителя длиной до 40 – 48 мм (в зависимости от типа щетины).

Получена теоретическая зависимость изменения объема моюще-дезинфицирующего раствора от времени его циркуляции, типа и количества применяемых механических очистителей. На основании полученной зависимости обосновано минимальное количество чистящих устройств с активными рабочими органами, обеспечивающее высший сорт молока. Согласно полученной зависимости при использовании 4 механических очистителей с чистящей поверхностью из щетины допустимо снижение объема моюще-дезинфицирующего раствора до 138 л без снижения продолжительности циркуляции и снижение объема до 161 л при его циркуляции в течение 20 мин.

3. В результате проведенных экспериментальных исследований выявлены рациональные параметры механического очистителя с активными рабочими органами, обеспечивающие линейную скорость 4,7 м/с (-17,5 % по сравнению с

прототипом) и частоту вращения 1,62 с-1 (+58,6 % по сравнению с прототипом) при вакууме 48 кПа: количество перепускных каналов в корпусе – 3; диаметр перепускных каналов – 8 мм; угол поворота канала – 0,5 витка; длина щетины – 17 мм, плотность – 20 ед./см; диаметр щетины – 1,5 мм.

Определены рациональные режимы технологии санитарной обработки: 4 механических очистителя с активным рабочим органами из щетины; подача 1 механического очистителя спустя 2,7 мин от начала циркуляционной промывки; подача последующих через 1 мин после предыдущего. При этом достигается снижение объема моюще-дезинфицирующего раствора на 29 л и времени циркуляции – на 10 мин, а произведённое молоко соответствует требованиям ТР ТС 021/2011 и ТР ТС 033/2013.

4. В результате производственных испытаний в СПК «Заря» Нижегородской области подтверждено, что выдоенное молоко соответствует нормативным требованиям при 20 минутной продолжительности циркуляционной промывки с использованием 4 механических очистителей и 160 л моюще-дезинфицирующего раствора. Расчетный годовой экономический эффект при применении усовершенствованного способа санитарной обработки составил 646,9 тыс. рублей, а срок окупаемости дополнительных капитальных вложений – 0,15 г.

Рекомендации производству. Применение усовершенствованных технологии санитарной обработки и технические средства (4 механических очистителя), способствующие улучшению качества и безопасности получаемого молока при одновременном снижении удельных затрат энергии, труда и моющих средств, позволяют сократить время циркуляционной мойки доильной установки до 20 мин сократить объем моюще-дезинфицирующего раствора на 20 л.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Технические решения могут интегрироваться в состав автомата промывки.

Основные публикации по теме диссертации:

Статьи в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science

1. Maslov, M. M. Influence of devices for cleaning the milk pipes of the milking units on the ecology of milk production / V. V. Kirsanov, V. Y. Matveev, M. M. Maslov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming, Voronezh, 17–18 октября 2019 года. Vol. 422. – Voronezh: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012075.

2. Maslov, M. M. Substantiation and optimization of quantity and type of mechanical cleaners supplied to milk pipe when rinsing milking units / V. V. Kirsanov, V. Yu. Matveev, M. M. Maslov [et al.] // Bio web of conferences : International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2020), Kazan, 28–30 мая 2020 года. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2020. – P. 00121.

Публикации в рецензируемых изданиях

3. Маслов, М. М. Исследование влияния параметров чистящего элемента из щетины на движение механического очистителя молокопроводов с активными рабочими органами // Вестник НГИЭИ. – 2025. – № 8(171). – С. 38–47.

4. Маслов, М. М. Обоснование геометрических параметров корпуса механического очистителя с активными рабочими органами / М. М. Маслов,

В. Ю. Матвеев, Е. Б. Миронов, В. П. Заикин // Вестник НГИЭИ. – 2024. – № 1(152). – С. 7–17.

5. Маслов, М. М. Оценка надежности доильных установок на основании анализа их отказов / М. М. Маслов, А. Е. Крупин, В. Ю. Матвеев, Е. Б. Миронов // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 23–27.

6. Маслов, М. М. Корреляционный анализ факторов, влияющих на уровень бактериальной обсемененности молока / М. М. Маслов, Т. А. Казанина, А. Е. Крупин, В. Ю. Матвеев // Агроинженерия. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 41–45.

7. Маслов, М. М. Функционально-стоимостной анализ системы санитарной обработки доильной установки / М. М. Маслов, В. Ю. Матвеев, А. Е. Крупин, Е. Б. Миронов // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 10. – С. 113–116.

8. Маслов, М. М. Разработка функционально-морфологической модели системы санитарной обработки доильной установки / В. Ю. Матвеев, В. П. Заикин, М. М. Маслов // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 3. – С. 85–90.

9. Маслов, М. М. Структурно-логическая схема функционирования системы санитарной обработки доильных установок с молокопроводом и автоматом промывки / В. Ю. Матвеев, М. М. Маслов, В. П. Заикин, Д. В. Филиппов // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 6. – С. 111–115.

10. Маслов, М. М. Перспективный механический очиститель молокопроводов / В. В. Кирсанов, В. Ю. Матвеев, М. М. Маслов, А. Е. Ческов // Сельский механизатор. – 2018. – № 9. – С. 26–27.

11. Маслов, М. М. Анализ путей совершенствования качества очистки молочных линий доильных установок на основании априорного ранжирования факторов / М. М. Маслов // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 9. – С. 64–67.

Статьи в сборниках и других научных изданиях

12. Маслов М. М. Теоретическое обоснование конструкции технических средств интенсификации санитарной обработки доильных установок // Тенденции развития научного сообщества в эпоху глобальных перемен: сборник статей Международной научно–практической конференции (г. Воронеж, 7 июля 2026 г.). Уфа: Omega science, 2026. С. 38–40.

13. Маслов, М. М. Математическая зависимость необходимого количества моюще-дезинфицирующего раствора при использовании механических очистителей / М. М. Маслов, Е. Б. Миронов, В. Ю. Матвеев // Эффективное обеспечение научно-технического прогресса: анализ задачи и поиск решений : Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Киров, 14 апреля 2026 года. – Стерлитамак: ООО «Агентство международных исследований», 2026. – С. 94-97.

14. Маслов, М. М. Результаты оптимизация геометрических параметров механических очистителей внутренней поверхности молокопроводов / М. М. Маслов // Актуальные проблемы науки и технологий в современном мире : Материалы и доклады V Международной научно-практической конференции, Княгинино, 21 ноября 2025 года. – Княгинино: Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, 2025. – С. 125-126.

15. Маслов, М. М. Технический сервис доильных установок / М. М. Маслов, А. В. Горшенин, В. Ю. Матвеев // Проблемы современной науки и общества: сохранение и развитие наследия Великой Победы, Княгинино, 08–13 мая 2021 года. – Княгинино: Нижегородский государственный инженерно-экономический

институт, 2021. – С. 159–162.

16. Маслов, М. М. О техническом сервисе в животноводстве / А. В. Горшенин, М. М. Маслов, В. Ю. Матвеев // Актуальные направления развития техники и технологий в России и за рубежом – реалии, возможности, перспективы: Материалы и доклады, Княгинино, 25 марта 2021 года. – Княгинино: Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, 2021. – С. 35–36.

17. Маслов, М. М. Априорное ранжирование факторов, влияющих на качество очистки молокопроводов доильных установок / Д. О. Кандеева, М. М. Маслов, В. Ю. Матвеев // Современная наука: актуальные проблемы и перспективы развития : Материалы и доклады Международной научно-практической конференции, Княгинино, 22–27 мая 2018 года. – Княгинино: Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, 2018. – С. 214–219.

18. Маслов, М. М. Способы контроля качества промывки внутренней поверхности доильного оборудования / М. М. Маслов, В. Ю. Матвеев // Актуальные направления развития техники и технологий в России и за рубежом – реалии, возможности, перспективы, Княгинино, 21 марта 2019 года. Том 2. – Княгинино: Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, 2019. – С. 165–168.

19. Маслов, М. М. Повышение качества очистки молочных линий при использовании различных механических очистителей с активными рабочими органами / В. В. Кирсанов, В. Ю. Матвеев, М. М. Маслов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2018. – № 3(31). – С. 77–81.

20. Maslov, M. M. The increase in quality of pipeline milking plant cleaning when using various mechanical purifiers with dynamic tools / V. Yu. Matveev, M. M. Maslov, A. E. Cheskov // Modern Science. – 2018. – No. 2. – P. 157–161.

Патенты и свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

21. Патент № 2728661 C1 Российская Федерация, МПК A01J 7/02. Устройство для очистки молокопроводов доильных установок : № 2020105316 : заявл. 04.02.2020 : опубл. 30.07.2020 / В. В. Кирсанов, В. Ю. Матвеев, М. М. Маслов, К. Е. Миронов ; заявитель Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Нижегородский государственный инженерно-экономический университет (НГИЭУ).

22. Патент № 2737968 C1 Российская Федерация, МПК A01J 7/02. Способ санитарной обработки молокопроводов доильных установок : № 2020116199 : заявл. 18.05.2020 : опубл. 07.12.2020 / В. В. Кирсанов, В. Ю. Матвеев, М. М. Маслов, К. Е. Миронов ; заявитель Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Нижегородский государственный инженерно-экономический университет (НГИЭУ).

23. Патент № 2688830 C1 Российская Федерация, МПК A01J 7/00, B08B 9/057. Устройство для подачи механических очистителей в молокопровод : заявл. 28.04.2018 : опубл. 22.05.2019 / В. В. Кирсанов, В. Ю. Матвеев, М. М. Маслов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ).

Подписано в печать _____ г.
Формат 60х90, 1/16. Бумага писчая. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,00. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № ___.

Отпечатано в ИПЦ НГИЭУ с оригинал-макета
606340, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, 22а.