

На правах рукописи



Рытов Кирилл Петрович

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ СМЕСИТЕЛЯ
КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ КОРМОВ С РАБОЧИМ
ОРГАНОМ В ВИДЕ ШНЕКА, ОСНАЩЕННОГО НАВИВКОЙ
С ПЕРЕСЫПНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ**

Специальность 4.3.1 Технологии, машины и оборудование.
для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

2025 Краснодар

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»

Научный
руководитель

Фролов Владимир Юрьевич,
доктор технических наук, профессор

Официальные
оппоненты:

Сабиев Уахит Калижанович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Омский государственный
аграрный университет имени
П. А. Столыпина», профессор кафедры
«агроинженерии»,

Глобин Андрей Николаевич,
доктор технических наук, доцент,
Азово-Черноморского инженерного
института – филиал ФГБОУ ВО «Донской
государственный аграрный университет»,
профессор кафедры «технологии и средства
механизации агропромышленного
комплекса»,

Ведущая
организация:

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Донской государственный
технический университет»
(г. Ростов-на-Дону)**

Защита состоится «18» июня 2025 г. в 10:00 ч на заседании диссертационного совета 35.2.019.03 при ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, корпус факультета энергетике, ауд. 110.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте: ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина: – <http://kubsau.ru>

. Автореферат разослан «__» апреля 2025 г., размещен на официальном сайте ВАК – <http://vak3.minobrnauki.gov.ru>.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент
Самурганов Евгений Ерманекосович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Одной из основных задач сельскохозяйственного производства в нашей стране является обеспечение населения качественными продуктами питания. Огромную роль в сельском хозяйстве играет скотоводство, а именно – производство продукции КРС. Мясо и молоко – это неотъемлемая часть рациона каждого человека. Высокое качество этих продуктов напрямую влияет на иммунитет и здоровье наших граждан.

Концентрированные корма занимают особое место в рационе КРС. Неправильно приготовленные кормовые смеси могут существенно влиять на продуктивность животных (привес, надой). На сегодняшний день фермеры выдвигают повышенные требования не только к компонентам для приготовления кормов, но и к оборудованию. Руководителям средних и крупных фермерских хозяйств очевидны преимущества смесителей кормов, многие из которых позволяют смешивать большие порции корма с достаточно высокой однородностью. Следует отметить, что многие модели смесителей металлоемкие, энергоемкие и требуют значительных затрат труда.

В связи с вышеизложенным, совершенствование конструкции смесителя концентрированных кормов, позволяющего повысить качественные и количественные показатели, является актуальной научной задачей.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР Кубанского ГАУ ЕГИСУ НИОКР, номер государственной регистрации №121032300060-2 (2021-2025 гг.).

Степень разработанности темы. Вопросам, связанным с разработкой смесителей посвящены исследования С. В. Баргинеца, С. Н. Воякина, С. И. Воронцова, А. Н. Глобина, В. И. Гусейнова, М. Ю. Двинина, С. М. Доценко, Л. Г. Крючковой, Ю. Б. Куркова, С. С. Петрова, Д. П. Сысоева, В. Ю. Фролова.

Таже исследованиями в этой области занимались такие предприятия, как: Башкирский государственный аграрный университет, Донской государственный аграрный университет, Кубанский государственный аграрный университет, Ставропольский государственный аграрный университет.

При этом, достигнуты существенные успехи в области создания машин для кормопроизводства в рамках их высокой производительности и конкретных условий применения.

На сегодняшний день существует потребность в компактных смесителях концентрированных кормов непрерывного действия, которые могут

обеспечить высокую однородность смешивания в сочетании с достаточной производительностью.

Это свидетельствует об актуальности темы диссертации по определению параметров и режимов работы смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями.

В качестве **рабочей гипотезы** для решения частной технической задачи принято предположение о том, что совершенствование смесителя концентрированных кормов, используемого на животноводческих предприятиях, путем установки рабочего органа в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями, позволит получить высокие качественные и количественные показатели при приготовлении корма с наименьшей энергоемкостью.

Цель исследований: обосновать параметры и режимы работы смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями, для повышения однородности смешивания при минимальной возможной энергоемкости.

Объект исследования – технологический процесс смешивания компонентов концентрированного корма смесителем концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями.

Предмет исследования – зависимости, связывающие геометрические параметры и режимы работы смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями, с показателями однородности смешивания, производительности и энергоемкости процесса получения концентрированных кормов.

Задачи исследования:

– разработать конструктивно-технологическую схему смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями;

– теоретическим путем получить аналитические зависимости, характеризующие взаимосвязь между технологическими и конструктивно-режимными параметрами с обоснованием однородности, производительности и мощности, потребляемой электродвигателем в процессе смешивания концентрированных кормов;

– изготовить экспериментальный образец смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями и получить зависимости, характеризующие технологический процесс смесителя концентрированных кормов, и на их

основе оптимизировать параметры и режимы работы смесителя;

- сопоставить теоретические и экспериментальные данные исследования смесителя;

- дать экономическую оценку эффективности внедрения предложенного смесителя.

Методы исследования.

Теоретические исследования выполнялись на основании основных положений высшей математики и теоретической механики. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях и фермерских хозяйствах в соответствии с апробированными методиками и базировались на теории планирования многофакторного эксперимента. Обработка полученных результатов выполнялась методом математической статистики с использованием такого ПО, как Mathcad, Microsoft Excel.

Научная новизна:

- конструктивно-технологическая схема смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями;

- параметры смесителя и режимы его работы, которые позволят получить высокую однородность приготовленного корма при минимально возможной энергоемкости;

- зависимость энергоемкости, производительности и однородности приготавливаемого корма от физико-механических характеристик компонентов корма;

- уравнения регрессии по установлению оптимальных технологических показателей и параметров работы смесителя концентрированных кормов.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическую значимость представляют:

- обоснованная конструктивно-технологическая схема смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями, что дает возможность исследовать параметры и режимы его работы;

- параметры смесителя концентрированных кормов и режимы его работы, которые позволят получить высокую однородность приготовленного корма при минимально возможной энергоемкости;

- уравнения регрессии для получения оптимальных технологических показателей и параметров работы смесителя концентрированных кормов.

Практическую значимость представляют:

- усовершенствованная классификация технических средств для

приготовления концентрированных кормов, которая позволяет выявить перспективные направления;

- изготовленный экспериментальный образец смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями, который позволяет осуществлять смешивание кормов с однородностью свыше 90% при минимально возможной энергоемкости;

- обоснованные основные параметры и режимы работы, которые позволили разработать смеситель концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями, который может быть применен на фермах по содержанию КРС.

Новизна технических решений подтверждается патентами на изобретение №2813791 «Смеситель кормов», №2805955 «Смеситель кормов».

Основные научные положения, вынесенные на защиту:

- конструктивно-технологическая схема смесителя концентрированных кормов;

- аналитические и эмпирические зависимости, для смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями;

- параметры и режимы работы смесителя концентрированных кормов;

- уравнения для расчета производительности и энергоемкости работы смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного пересыпными отверстиями в зависимости от его конструктивных и режимных параметров;

- уравнения регрессии по установлению оптимальных показателей и параметров работы смесителя концентрированных кормов.

- результаты сопоставления теоретических и практических данных исследований.

Степень достоверности полученных результатов и апробация работы. Результаты получены с применением известных методик проведения исследований и современной измерительной техники. Достоверность результатов подтверждена сходимостью теоретических и экспериментальных данных, а также широкой апробацией результатов исследований в хозяйствах Краснодарского края.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на конференциях Кубанского ГАУ (г. Краснодар, 2022-2024 гг.), Всероссийском конкурсе на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых аграрных образовательных и научных организаций России (г. Владикавказ, 2023 г., г. Волгоград, 2024 г. г. Уфа, 2024г.),

участие в XXIII Агропромышленной выставке-ярмарке «Золотая Нива» (Краснодарский край, г. Усть-Лабинск, 2023 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 16 работ, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 патента РФ на изобретения, 1 публикация в наукометрической базе Scopus. Общий объем публикаций составляет 3,37 печ. л., из них личный вклад автора 2,2 печ. л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 103 источника. Работа изложена на 133 страницах, содержит 8 таблиц, 41 рисунок, 8 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ

Во введении представлены актуальность исследований, научная новизна, обоснование и практическая их значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса повышения эффективности процесса смешивания концентрированных кормов» определены факторы, влияющие на процесс смешивания и проведен их анализ. Представлены технические средства, необходимые для смешивания кормов, на основе исследования производственной деятельности животноводческих предприятий Краснодарского края усовершенствована классификация смесителей кормов и выявлены перспективные направления в разработке новых моделей, проанализированы технологии подготовки кормов к скармливанию путем их смешивания.

На основе анализа результатов исследований, проведенных С. В. Баргинецом, С. Н. Воякиным, С. И. Воронцовым, А. Н. Глобиным, В. И. Гусейновым, М. Ю. Двининой, С. М. Доценко, Л. Г. Крючковой, Ю. Б. Курковой, С. С. Петровой, Д. П. Сысоевым, В. Ю. Фроловым и другими учеными установлено, что в настоящее время является актуальным проведение исследований по вопросам реализации технологического процесса смешивания концентрированных кормов. Они являются основой для повышения эффективности существующих и разработки новых конструкций машин. В соответствии с вышеизложенным, сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе «Теоретические исследования процесса смешивания компонентов концентрированных кормов смесителем с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями», приведены разработанные технологические под-

ходы к созданию технического средства для смешивания концентрированных кормов с обоснованием производительности и мощности, потребляемой устройством.

На основе проведенного анализа установлены исходные требования к разрабатываемым технологическому процессу смешивания и техническому средству для его реализации с относительно меньшими затратами труда и средств, а также запланированными показателями качества.

Изложены результаты теоретических исследований процесса смешивания концентрированных кормов смесителем с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями. Получены аналитические зависимости производительности и мощности, потребляемой электродвигателем в процессе смешивания. Обоснованы конструктивно-технологической схемы смесителя с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями, проведено исследование мощности, потребляемой электродвигателем в процессе смешивания и определена скорость перемещения материала в рабочей камере.

Анализ существующих технических средств по смешиванию концентрированных кормов, предусматривающих применение серийно выпускаемой техники, позволил разработать смеситель с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями (патенты РФ на изобретение №2813791, №2805955), представленный на рисунке 1.

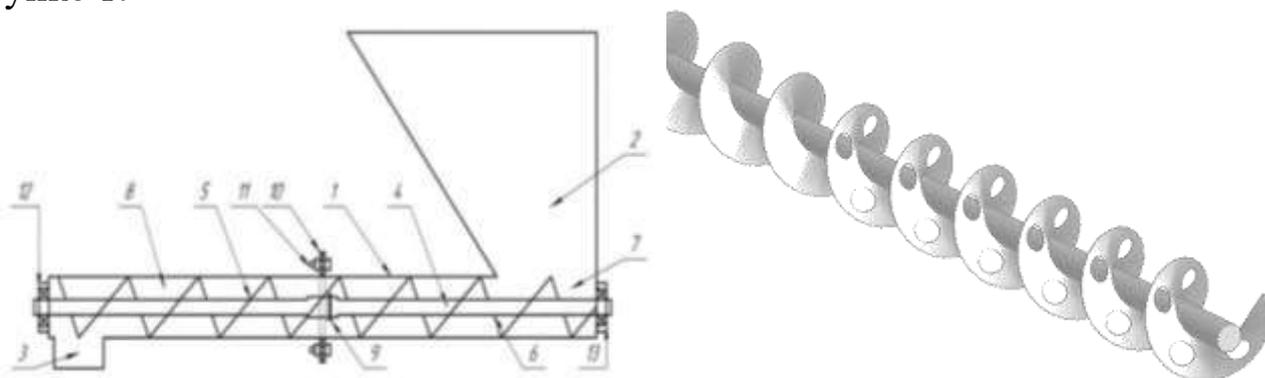


Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с циркуляционными отверстиями (патенты РФ на изобретение №2813791, №2805955).

- 1 – корпус, 2 – загрузочный бункер, 3 – выгрузное окно, 4 – вал, 5 – мешалка, 6 – шнек с винтовой навивкой, 7 – приемная камера, 8 – рабочая камера, 9 – шплицевое соединения, 10 – фланцы, 11 – болтовое соединение, 12 – радиальный подшипник, 13 – конический подшипник

Ключевые особенности конструкции предлагаемого смесителя является выполнение мешалки и шнека отдельно и соединение их между собой посредством винтового соединения и разделение корпуса на приемную и рабочую камеры обеспечивает возможность смены мешалки для смешивания кормов разной фракции. Перфорация витков приводит к интенсификации процесса смешивания, что позволяет снизить неоднородность приготавливаемого корма.

На основе проведенного анализа процесса смешивания концентрированных кормов получены аналитические зависимости для теоретического обоснования конструктивных и технологических параметров смесителя. Основные факторы, влияющие на качество смешивания: размеры, влажность, коэффициент внешнего и внутреннего трения, соотношение долей ингредиентов, их плотность, частота вращения шнека, радиус канала; радиус вала; радиус отверстий; радиус окружности центра отверстий; шаг витка шнека; коэффициент заполнения канала.

Для определения массовой производительности одного витка необходимо учитывать плотность перемещаемого корма ρ :

$$Q_m = \rho \cdot V \cdot \frac{30 \cdot \omega}{\pi} \cdot 60, \quad (1)$$

где, Q_m – базовая массовая производительность смесителя, кг/ч;
 V – объем корма между двумя соседними витками шнека, м³;
 ω – частота вращения, с⁻¹; ρ – плотность кормосмеси, кг/м³.

Зависимость в полной мере не отражает производительность, так как в переменном значении V не учитывает объем кормосмеси, вытесняемый валом шнека.

С учетом вышеизложенного выражение (1) примет вид:

$$Q_m = S_{\text{раб}} \cdot l \cdot \frac{\omega}{\pi} \cdot \rho \cdot 1800, \quad (2)$$

где, $S_{\text{раб}}$ – действительная рабочая площадь шнека, м²;
 l – расстояние между витками шнека, м.

Для расчета действительной рабочей площади навивки шнека необходимо учитывать площадь, занимаемую валом.

После преобразования получим следующие выражения:

$$Q_{1m} = (S_{\text{шнек}} - S_{\text{вал}}) l \cdot \frac{\omega}{\pi} \cdot \rho \cdot 1800, \quad (3)$$

$$Q_{2m} = (S_{\text{шнек}} - S_{\text{вал}} - S_{\text{отв}}) l \cdot \omega \frac{\omega}{\pi} \cdot \rho \cdot 1800, \quad (4)$$

где, Q_{1m} – массовая производительность шнека, кг/ч;
 Q_{2m} – массовая производительность мешалки, кг/ч;
 $S_{\text{вал}}$ – площадь поперечного сечения вала, м²;
 $S_{\text{шнек}}$ – площадь поперечного сечения навивки, м²;
 $S_{\text{отв}}$ – площадь поперечного сечения пересыпных отверстий, м².

С учетом коэффициента заполнения шнека смесителя U :

$$Q_{\Delta m} = S_{\text{отв}} \cdot U \cdot l \cdot \frac{\omega}{\pi} \cdot \rho \cdot 1800, \quad (5)$$

где, $Q_{\Delta m}$ – разница в массовой производительности шнека и мешалки, т/ч;
 U – оптимальный коэффициент заполнения камеры смешивания (0,3–0,7).

Для расчета снижения производительности, что является прямым следствием снижение коэффициента заполнения смесителя U , необходимо ввести коэффициент пересыпания, который будет зависеть от разницы производительности шнека и мешалки.

$$k = \frac{Q_{\Delta m}}{Q_{1 m}} = \frac{S_{\text{отв}}}{S_{\text{шнек}} - S_{\text{вал}}}, \quad (6)$$

где, k – коэффициент пересыпания кормосмеси.

Определить количество оборотов шнека для увеличения коэффициента заполнения первой камеры до $U = 1$, можно по следующей формуле:

$$n_{U=1} = \frac{V_{\text{рк 1}} \cdot (1-k)}{V_{\text{пер}}}, \quad (7)$$

где, $n_{U=1}$ – количество оборотов шнека для увеличения коэффициента заполнения первой камеры до $U=1$, ед.

После ряда преобразований производительность смесителя при установившемся режиме работы будет определяться объемом корма, находящимся в пространстве, образованном последним и предпоследним витками.

$$Q_{\text{пик}} = S_{1 \text{ раб}} \cdot l \cdot ((1-k)^{y+1}) \cdot \frac{\omega}{\pi} \cdot \rho \cdot 1800, \quad (8)$$

где, $Q_{\text{пик}}$ – пиковая производительность при установившемся режиме работы смесителя кг/ч;

y – число витков, шт.

Зависимость, учитывающая холостую работу смесителя и промежуточный режим между холостым ходом и режимом пиковой производительности будет иметь вид:

$$Q_T = t_{\text{переход}} \cdot M S_{1 \text{ раб}} \cdot l \cdot ((1-k)^{y+1}) \cdot \frac{\omega}{\pi} \cdot \rho \cdot 1800 + (T - t_{\text{переход}}) \cdot S_{1 \text{ раб}} \cdot l \cdot ((1-k)^{y+1}) \cdot \frac{\omega}{\pi} \cdot \rho \cdot 1800, \quad (9)$$

где, Q_T – производительность смесителя за период времени, кг/ч;

M – коэффициент, применяемый к производительности в переходном режиме (от хол.хода до режима пиковой производительности), принимаем $M = 0,5$;

$t_{\text{переход}}$ – время, затрачиваемое на переход от ХХ до режима пиковой производительности, ч.

Окончательно, зависимость производительности смесителя определится:

$$Q_T = 1800S_{1 \text{ раб}} l \rho \frac{\omega}{\pi} \left(\left(1 - \frac{N \cdot S_o}{S_{\text{шнек}} - S_{\text{вал}}} \right)^{y+1} \right) \left(1 - \frac{n}{\frac{S_{\text{шнек}} \cdot L_{\text{ш}} \cdot \left(1 - \frac{N \cdot S_o}{S_{\text{шнек}} - S_{\text{вал}}} \right)}{N \cdot S_o \cdot l} \cdot 60} + M \frac{n}{\frac{S_{\text{шнек}} \cdot L_{\text{ш}} \cdot \left(1 - \frac{N \cdot S_o}{S_{\text{шнек}} - S_{\text{вал}}} \right)}{N \cdot S_o \cdot l} \cdot 60} \right), \quad (10)$$

где, n_0 – количество пересыпных отверстий на одном витке,
 n – частота вращения вала шнека, об/мин.

Мощность, потребляемая смесителем концентрированных кормов будет состоять из нескольких слагаемых, которые и будут оказывать ключевое влияние на величину потребляемой смесителем мощности:

$$N = N_1 + N_2 + N_3, \quad (11)$$

где, N – мощность, потребляемая смесителем, кВт;

N_1 – мощность, затрачиваемая при перемещении кормосмеси вдоль оси смесителя от загрузочного окна к выгрузному, кВт;

N_2 – мощность, затрачиваемая на преодоление силы трения корма о навивку шнека, кВт;

N_3 – мощность, необходимую для перемешивание корма мешалкой, кВт.

При установившемся режиме работы смесителя массу m можно определить как:

$$m = Q \cdot t, \\ m = S_{1 \text{ раб}} \cdot l t \cdot \left((1 - k)^{y+1} \right) \cdot \frac{\omega}{\pi} \cdot \rho \cdot 1800, \quad (12)$$

где, t – время.

Тогда работу, необходимую для перемещения кормосмеси вдоль оси смесителя от загрузочного окна к выгрузному определяют:

$$A_1 = \mu_{\text{к-к}} S_{1 \text{ раб}} \cdot l g L t \cdot \left((1 - k)^{y+1} \right) \cdot \frac{\omega}{\pi} \cdot \rho \cdot 1800, \quad (13)$$

где $\mu_{\text{к-к}}$ – коэффициент трения скольжения частиц кормосмеси между собой;
 $S_{1 \text{ раб}}$ – рабочая поверхность витка шнека, м².

Установим мощность N_1 , затрачиваемая на перемещение кормосмеси вдоль оси смесителя от загрузочного окна к выгрузному:

$$N_1 = 1800 \mu_{\text{к-к}} S_{1 \text{ раб}} \rho l g L \frac{\omega}{\pi} \left((1 - k)^{y+1} \right). \quad (14)$$

Для расчета мощности, затрачиваемой на преодоление силы трения корма о навивку шнека N_2 , рассмотрим воздействие корма на поверхность шнека, выразив через крутящий момент, необходимый для того, чтобы провернуть шнек, преодолевая силу трения корма о навивку шнека.

Сила трения корма о навивку шнека:

$$\begin{aligned} N_2 &= M_2 \cdot \omega, \\ M_2 &= F_{\text{тр}} \cdot R_0, \\ F_{\text{тр}} &= \mu_{\text{к-ст}} \cdot N_{\text{норм}}, \end{aligned} \quad (15)$$

где, M_2 – крутящий момент на валу шнека, Нм;

$F_{\text{тр}}$ – сила трения корма о навивку шнека, Н;

R_0 – радиус окружности расположения центров перфорированных отверстий, расстояние от середины навивки до оси вращения вала шнека, м;

$\mu_{\text{к-ст}}$ – коэффициент трения корма о стальную поверхность;

$N_{\text{норм}}$ – нормальная реакция навивки шнека на корм.

С учетом вышеизложенного, N_2 определится:

$$N_2 = \frac{1}{2} \mu_{\text{к-ст}} \cdot \mu_{\text{к-к}} \cdot \gamma \omega R_0 \rho g (V_{\text{рк1}} + V_{\text{рк2}}) \left(\frac{k\gamma + k \cdot \gamma}{2} \right), \quad (16)$$

В таком случае, рассмотрим мешалку открытого турбинного типа, которая перемещается в кормовой смеси.

$$\begin{aligned} N_3 &= M_3 \cdot \omega, \\ M_3 &= F_{\text{сопр}} \cdot R_0 \cdot N, \end{aligned} \quad (17)$$

где $F_{\text{сопр}}$ – сила, с которой навивка шнека воздействует на кормосмесь, Н,

$$F_{\text{сопр}} = F_{\text{дв меш}} - F_{\text{тр меш}}, \quad (18)$$

где, $F_{\text{тр меш}}$ – сила трения навивки о массу кормосмеси, Н;

$F_{\text{дв меш}}$ – сила, необходимая для перемещения навивки в кормосмеси, Н.

Силу, затраченную на перемещение навивки определим, учитывая физико-механические свойства кормосмеси, а также геометрические размеры мешалки.

$$F_{\text{дв меш}} = m_{\text{см}} r \omega^2 + \mu_{\text{к-ст}} m_{\text{см}} g, \quad (19)$$

где $m_{\text{см}}$ – масса, кормосмеси, перемещаемая навивкой мешалки, кг;

r – радиус мешалки смесителя, м.

Мощность, затрачиваемая на перемешивание корма мешалкой N_3 определится:

$$N_3 = \rho \omega L_{\text{меш}} R_0 N_{\text{в}} \left(\frac{k\gamma + k \cdot \gamma}{2} \right) (1 - \mu_{\text{к-к}}) (S_{\text{шнек}} - S_{\text{вал}}) (r \omega^2 + \mu_{\text{к-ст}} g). \quad (20)$$

С учетом всех полученных уравнений, общая формула для определения мощности, потребляемой смесителем будет иметь вид:

$$N = 1800\mu_{к-к}S_{1\text{ раб}}\rho l g L \frac{\omega}{\pi} \left((1-k)^{y+1} \right) + \frac{1}{2}\mu_{к-ст} \cdot \mu_{к-к} \cdot y\omega R_0 \rho g (V_{рк 1} + V_{рк 2}) \left(\frac{ky+k\cdot y}{2} \right) + \rho\omega L_{меш} R_0 N_B \left(\frac{ky+k\cdot y}{2} \right) (1 - \mu_{к-к})(S_{шнек} - S_{вал})(r\omega^2 + \mu_{к-ст}g). \quad (21)$$

Теоретическим путем получены аналитические зависимости, характеризующие взаимосвязь технологических и конструктивно-режимных параметров с обоснованием однородности, производительности и энергоемкости процесса смешивания концентрированных кормов.

Для установления оптимальных значений параметров, входящих в состав формул (10) и (21), необходимо проведение эксперимента.

В третьей главе «Методика, экспериментальные исследования и их обработка» представлены основные методики и результаты экспериментальных исследований процесса смешивания концентрированных кормов, внешний вид смесителя для проведения экспериментов (рисунки 2–5), их описание и методы обработки. Приведены итоги исследований влияния конструктивно-технологических параметров смесителя концентрированных кормов по производительности и мощности, потребляемой электродвигателем. Проведен ряд многофакторных экспериментов с целью эмпирического обоснования конструктивно-технологических параметров смесителя концентрированных кормов.

Привод вала шнекового смесителя концентрированных кормов осуществлялся от двигателя АИР80В4 (1,5 кВт, 1500 об/мин).

Для снятия энергетических характеристик использовали приборы: цифровой мультиметр DT-832, цифровые токоизмерительные клещи M266, цифровые весы MG-100, бесконтактный оптический тахометр DT2234C+. Экспериментальные работы по смешиванию компонентов концентрированного корма проводили, без изменения частоты вращения электрического двигателя. Изменение частоты вращения вала смесителя реализовывалось в пределах от 100 до 140 об/мин посредством смены ведомого шкива, устанавливаемого на вал шнека смесителя.

Для определения массы контрольного компонента в каждой пробе (масса которой составляла 100 г.), сначала использовали набор сепарирующих решет с различным диаметром отверстий, что позволяло отсеять крупную и мелкую фракцию, отличные от контрольного компонента

(подкрашенная пищевым красителем пшённая крупа). После чего вручную производили отбор частиц контрольного компонента, далее их взвешивали на цифровых весах MG-100.



Рисунок 2 – Общий вид экспериментальной установки



Рисунок 3 – Общий вид шнековой мешалки с пересыпными отверстиями



Рисунок 4 – Общий вид привода смесителя



Рисунок 5 – Общий вид бункера

На этапе проведения эксперимента, в качестве объекта исследований, при определении ств использовались измельченные зерна кукурузы, измельченные зерна пшеницы и измельченные зерна овса и установлении их физико-механических свойств.

Для определения однородности смешивания измельченный овес был заменен контрольным компонентом, которым является подкрашенная красным пищевым красителем пшеничная крупа.

В основу исследований положены методики, изложенные в работах В.Р. Алёшкина, Г.В. Веденяпина, Б.А. Доспехова, Ф.С. Завалишина, Р.Л. Зенкова, Д.А. Краснова, Г.М. Кукты, И.В. Кулаковского, С.В. Мельникова и других ученых.

Критерии оптимизации: производительность – Q (отклик Y_1), энергоёмкость – N (отклик Y_2) и однородность смеси – G . Факторами,

влияющими на технологический процесс являются: X_1 – количество пересыпных отверстий (n), шт; X_2 – частота вращения барабана (ω), %; X_3 – коэффициент загрузки смесителя (T), мм.

Для проведения эксперимента был выбран план Плакетта – Бермана. Получены координаты оптимума и построены поверхности отклика, а также решена компромиссная задача между двумя основными критериями оптимизации: модулем помола и энергоемкостью.

После математической обработки экспериментальных данных получили следующие уравнения регрессии:

Для однородности:

$$G = 91,988 + 6.381 \cdot x_1 - 0.998 \cdot x_3 - 0.159 \cdot x_1 - 2.203x_1x_3 + 0.129x_2 - 7.068 \cdot x_1^2 + 3.6 \cdot x_3^2,$$

Для мощности, потребляемой электродвигателем:

$$N = 4204,84 - 214,95 \cdot x_1 - 67,61 \cdot x_2 + 1001,2 \cdot x_3 + 0.075 \cdot x_1 \cdot x_2 - 37,3919x_1 - 1,397x_2 + 25,125 \cdot x_1^2 + 0,281 \cdot x_2^2 - 794,217.$$

Анализ сечений поверхностей, представленных на рисунках 6 – 11, показывает, что при оптимальном режиме работы мощность, потребляемая электродвигателем, N составляет 0,901 кВт, количество пересыпных отверстий диаметром 0,02 м составляет 4 шт, а частота вращения вала шнека – 122 об/мин.

Анализ зависимостей показывает, что с увеличением количества пересыпных отверстий от 2 до 6 повышается однородность смешивания и может достигать $G=0,929$. При увеличении угловой скорости вращения вала до 120 об/мин производительность смесителя возрастает без последствий для однородности, однако, при дальнейшем увеличении частоты вращения вала смесителя до 140 об/мин происходит снижение однородности кормосмеси до значений $G = 0,74 \dots 0,77$. Зависимости, построенные по предложенной формуле хорошо согласуются с экспериментальными. Расхождение результатов не превышает 5% с учетом влияющего фактора. Сходимость результатов по критерию Фишера составила 95,5%.

Поверхность отклика представляет эллипсоид (рисунок 6), а ее центр - экстремум, причем максимум, так как коэффициенты уравнения регрессии в канонической форме отрицательны.

Максимальная степень однородности системы наблюдается при определённых условиях: частота вращения шнека смесителя составляет 120 оборотов в минуту, а количество отверстий равно четырём. Эти параметры обеспечивают оптимальное распределение смешиваемых компонентов, что критически важно для достижения равномерности в промышленном или лабораторном процессе.

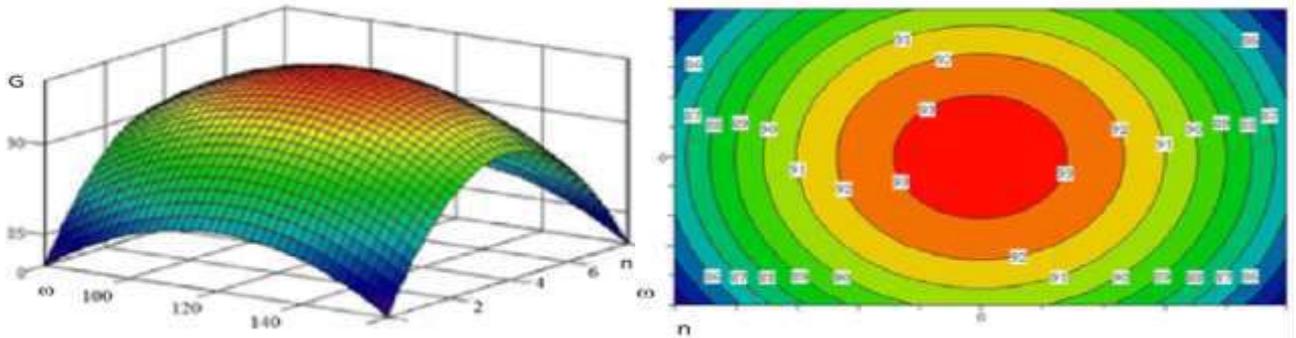


Рисунок 6 – Поверхность зависимости однородности от количества отверстий в мешалке и частоты её вращения и его двумерное сечение

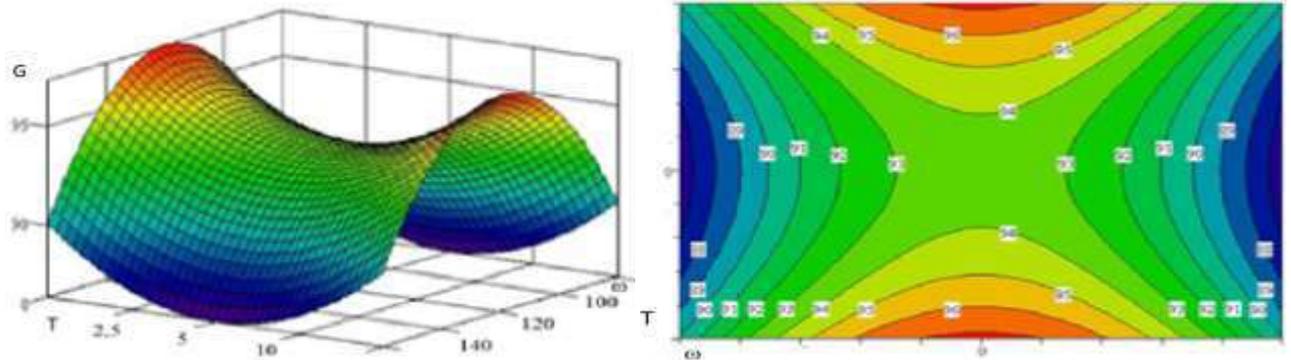


Рисунок 7– Поверхность зависимости однородности от количества отверстий в мешалке и времени смешивания и его двумерное сечение

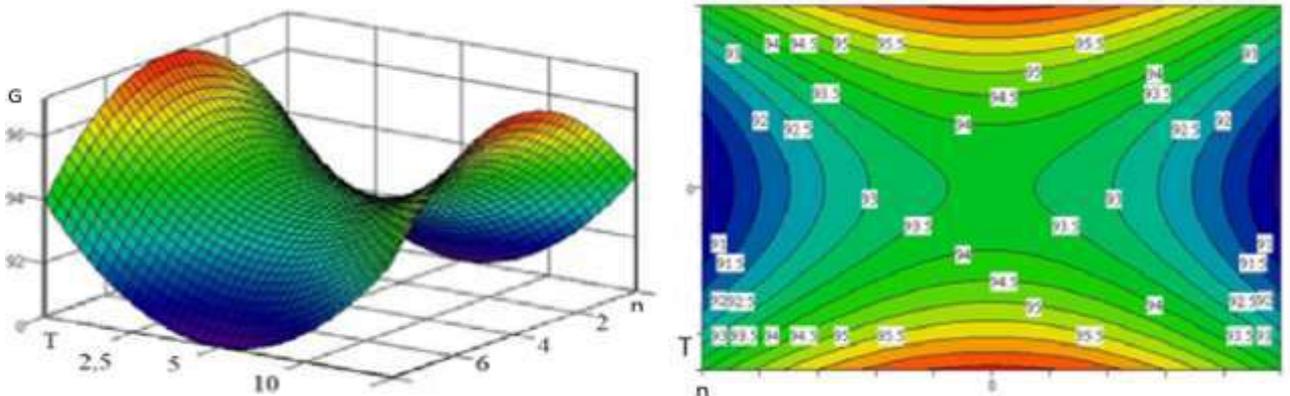


Рисунок 8 - Поверхность зависимости однородности от количества пересыпных отверстий и времени смешивания и его двумерное сечение

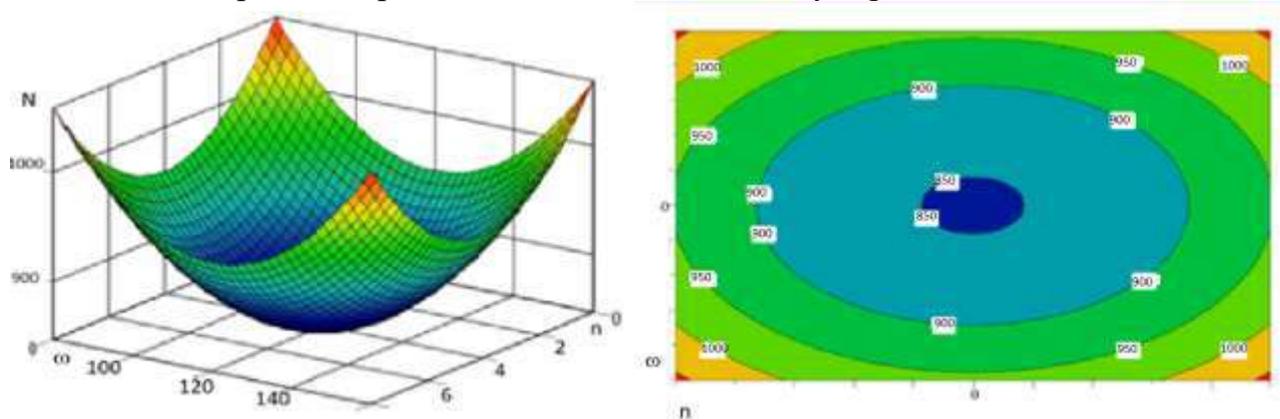


Рисунок 9 - Поверхность зависимости мощности от количества отверстий в мешалке и частоты её вращения и его двумерное сечение

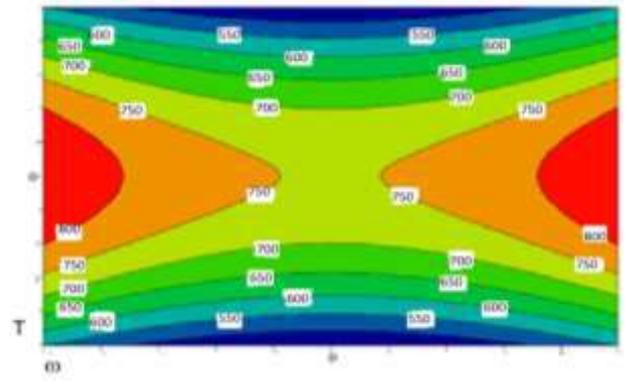
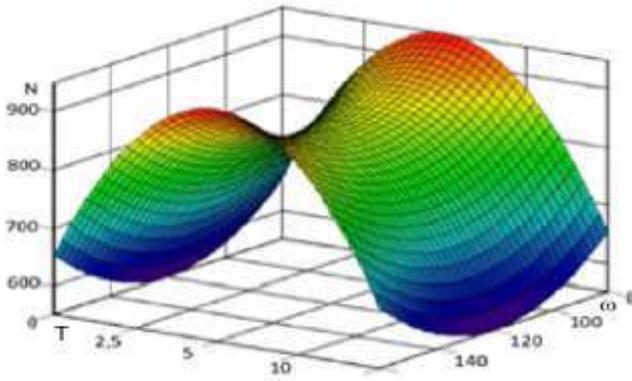


Рисунок 10 - Поверхность зависимости мощности от частоты вращения мешалки и времени смешивания и его двумерное сечение

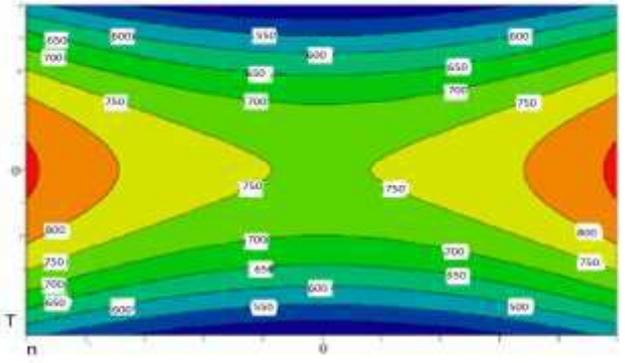
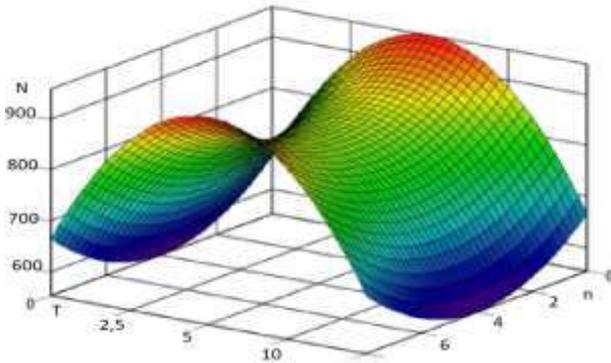


Рисунок 11 - Поверхность зависимости мощности от количества пересыпных отверстий и времени смешивания и его двумерное сечение

Результаты экспериментальных и теоретических исследований и их сравнение представлены на рисунках 12 и 13.

Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований позволяет сделать вывод об их согласованности.

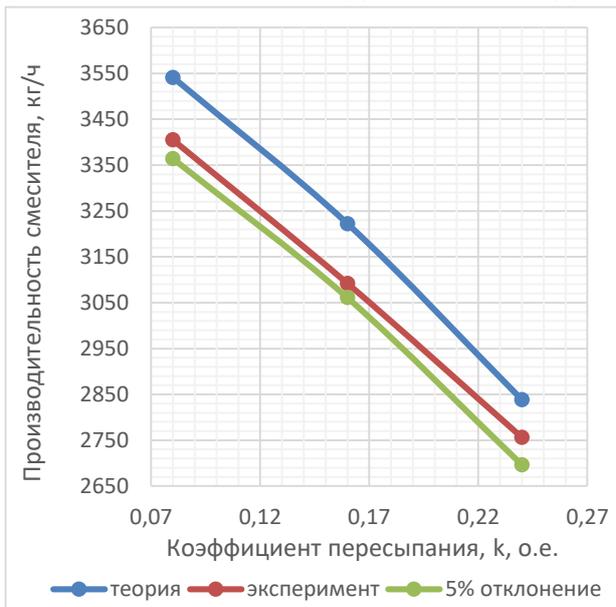


Рисунок 12 – График сходимости теоретических и экспериментальных результатов по производительности

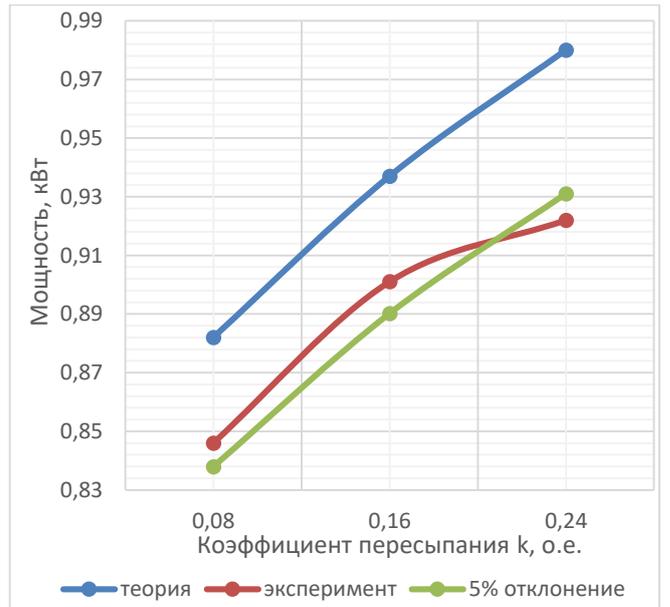


Рисунок 13 – График сходимости теоретических и экспериментальных результатов по мощности

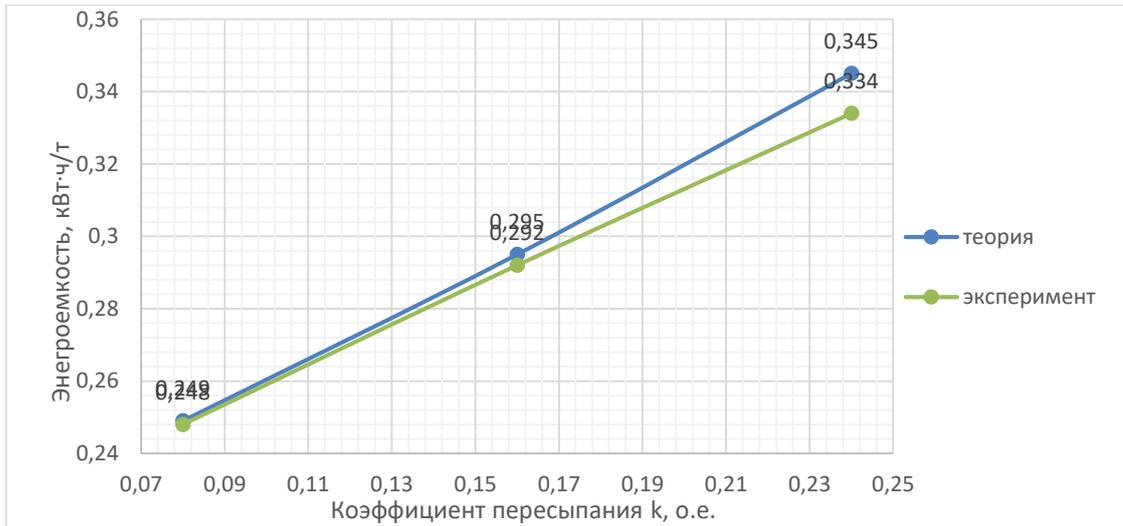


Рисунок 14 – График зависимости энергоёмкости процесса смешивания от коэффициента пересыпания k

В результате экспериментальных исследований получены зависимости, которые коррелируют с результатами теоретических исследований. Сходимость теоретических и экспериментальных исследований составляет 92–98 %.

В четвертой главе «Экономическая оценка результатов исследований». За базу для сравнения предлагаемого смесителя принята существующая технология смешивания кормов смесителем СЛШ-3.

Оценка экономической эффективности предложенной технологии и средств механизации проводили по общепринятым методикам, предусмотренными ГОСТ Р 53057-2008.

Внедрение смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями в ЛПХ с численностью КРС 7 голов позволит получить годовой экономический эффект: 81 тыс. руб при сроке окупаемости капиталовложений 1 год. При этом, чистый дисконтированный доход за 7 лет использования составит 290 тыс. руб. Экономический эффект достигается за счет увеличения продуктивности КРС благодаря вскармливанию им концентрированных кормов с высокими качественными показателями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. На основании проведенного анализа тенденций развития технических средств для смешивания концентрированных кормов, применяемых на животноводческих предприятиях АПК, усовершенствована классификация смесителей концентрированных кормов, которая позволила разработать конструктивно-технологическую схему смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями. Новизна технических решений подтверждена патентами на изобретение: №2813791 «Смеситель кормов», №2805955 «Смеситель кормов».

2. В результате проведенного теоретического анализа процесса смешивания концентрированных кормов смесителем концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного пересыпными отверстиями, определены аналитические выражения, которые характеризуют взаимосвязь между технологическими и конструктивно-режимными параметрами, что позволило определить конструктивные и технологические параметры смешивания концентрированных кормов, влияющих на однородность, и производительность процесса смешивания, а также мощность, потребляемую электродвигателем при работе: частота вращения вала смесителя от 100 до 140 об/мин; рекомендуемая продолжительность периода непрерывной работы смесителя от 2,5 до 10 минут; диаметр шнека и мешалки – 0,1 м; шаг витка навивки – 0,11 м, длина мешалки – 0,55 м; длина шнека – 0,55 м; коэффициент пересыпания – 0,1...0,25, при этом диаметр циркуляционных отверстий 0,02 м, а их количество на каждый виток от 2 до 6 включительно. При таких параметрах производительность смесителя составит 2838–3541 кг/час; потребляемая электродвигателем мощность составит от 0,882 до 0,98 кВт; энергоёмкость процесса смешивания – от 0,236 до 0,42 кВт·ч/т.

3. Изготовлен экспериментальный образец смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями. Получены математические модели оценки работы устройства в виде адекватных уравнений регрессии в режиме приготовления концентрированных кормов смесителем концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного пересыпными отверстиями. Оптимизированы конструктивно параметры смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека с

навивкой, снабженной циркуляционными отверстиями: частота вращения – 122 об/мин, что входит в диапазон от 100 до 140 об/мин; коэффициент пересыпания, 0,2, что входит в установленный ранее диапазон от 0,1 до 0,25.

4. В результате сопоставления теоретических и экспериментальных результатов установлено: экспериментальные значения мощности, потребляемой электродвигателем, энергоемкости процесса смешивания и производительности смесителя от коэффициента пересыпания укладываются в 95% доверительный интервал аналогичных теоретических значений.

5. Внедрение смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного навивкой с пересыпными отверстиями в ЛПХ с численностью КРС 7 голов, позволит получить: годовой экономический эффект 81 тыс. руб., срок окупаемости капиталовложений составит 1 год, ЧДД за 7 лет 290 тыс. руб. Экономический эффект достигается за счет увеличения продуктивности КРС благодаря вскармливанию им концентрированных кормов с высокими качественными показателями.

Рекомендации производству

Предложенная в работе конструктивно-технологическая схема смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного пересыпными отверстиями, а также параметры его рабочих органов могут быть использованы конструкторскими организациями при разработке технических средств для механизации животноводства в условиях МФХ, ЛПХ. Конструктивно-технологическая схема может быть использована для самостоятельного изготовления смесителя в условиях МФХ, ЛПХ.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Совершенствование смесителя концентрированных кормов с рабочим органом в виде шнека, оснащенного пересыпными отверстиями является перевод смесителя на мобильную основу, а также установка шиберных заслонок, которая увеличит количество приготавливаемых кормов различной рецептуры, благодаря установке шиберной заслонки, которая позволит изменять дозировку каждого компонента.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

В международных наукометрических базах данных:

1. Auger feed mixer with perforated winding *Frolov V., Rytov K., Samurганov E.* В сборнике: BIO Web of Conferences. International Scientific and

Practical Conference “Development and Modern Problems of Aquaculture” (AQUACULTURE 2023). Сер. "BIO Web of Conferences" 2024. С. 05044

статьи в рецензируемых журналах:

2 Фролов, В. Ю. шнековый смеситель концентрированных кормов / В. Ю. Фролов, А. В. Бычков, **К. П. Рытов** // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2022. – № 184. – С. 248-259. – DOI 10.21515/1990-4665-184-021.

3. Школьников, М. А. Теоретическое и экспериментальное обоснование способа и параметров устройства для приготовления кормов на основе картофельно-тыквенной композиции концентрированных кормов / М. А. Школьников, **К. П. Рытов** // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2023. – № 194. – С. 245-253. – DOI 10.21515/1990-4665-194-025.

4. Повышение эффективности процесса получения пастообразных продуктов / В. Ю. Фролов, М. А. Школьников, **К. П. Рытов** [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 195. – С. 182-198. – DOI 10.21515/1990-4665-195-020.

5. Туманова, М. И. Модернизация группового станка для содержания поросят-отъемышей на свиноводческих предприятиях АПК / М. И. Туманова, Е. А. Котелевская, **К. П. Рытов** // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2023. – № 191. – С. 51-60. – DOI 10.21515/1990-4665-191-012.

патенты РФ на изобретения:

6. Пат. 2813791 С1 Российская Федерация МПК В30В 11/00 Смеситель кормов. [Текст] / В.Ю. Фролов, **К.П. Рытов**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина». – №2023115557; заявл. 13.06.2023; опуб. 16.02.202, Бюл. № 1.

7. Пат. 2805955 С1 Российская Федерация В30В 11/28 Смеситель кормов. [Текст] / В.Ю. Фролов, **К.П. Рытов**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина». – №2023102725; заявл. 06.02.2023; опуб. 19.01.2023, Бюл. № 2.

в прочих научных изданиях:

8. Фролов, В. Ю. Совершенствование технологического процесса смешивания концентрированных кормов / В. Ю. Фролов, **К. П. Рытов** // Эффективное животноводство. – 2023. – № 3(185). – С. 70.

9. Рытов, К. П. Смеситель кормов с перфорированным рабочим органом / К. П. Рытов, В. Ю. Фролов // Эффективное животноводство. – 2024. – № 3(193). – С. 96-97. – DOI 10.24412/cl-33489-2024-3-96-97.

10. Фролов, В. Ю. Обоснование конструктивно-режимных параметров смесителя с перфорированным рабочим органом / В. Ю. Фролов, **К. П. Рытов** // Современные векторы развития науки : Сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2023 год, Краснодар, 06 февраля 2024 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2024. – С. 348-349.

11. Рытов, К. П. Обоснование конструктивно-режимных параметров смесителя с перфорированным рабочим органом / К. П. Рытов, В. Ю. Фролов // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : Сборник статей по материалам 79-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2023 год. В 2-х частях, Краснодар, 25 апреля 2024 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2024. – С. 385-387.

12. Фролов, В. Ю. Обоснование конструктивно-режимных параметров смесителя с перфорированным рабочим органом / В. Ю. Фролов, **К. П. Рытов** // Инновационное развитие агропромышленного комплекса: новые подходы и актуальные исследования : Материалы Международной научно-практической конференции в рамках мероприятий «Десятилетия науки и технологий в Российской Федерации», 300-летия Российской академии наук, Краснодар, 24–25 апреля 2024 года. – Краснодар: ИП Копыльцова П.И, 2024. – С. 506-507. – DOI 10.33775/conf-2024-506-507.

13. Рытов, К. П. Повышение эффективности процесса смешивания

смесителем с рабочим органом в виде шнека с перфорированной навивкой / **К. П. Рытов**, В. Ю. Фролов // Точки научного роста: на старте десятилетия науки и технологии : Материалы ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2022 г., Краснодар, 12 мая 2023 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2023. – С. 415-417.

14. Рытов, К. П. Повышение качества смешивания концентрированных кормов / К. П. Рытов, В. Ю. Фролов // Вектор современной науки : Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых, Краснодар, 15 ноября 2022 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2022. – С. 902-903.

15. Рытов, К. П. Смеситель концентрированных кормов с рабочим органом в виде одновального горизонтального шнека с многозаходной прутковой навивкой / К. П. Рытов // Инновационные научные исследования в современном мире : Сборник трудов по материалам X Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ, Уфа, 28 ноября 2022 года. Том Часть 1. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2022. – С. 58-62.

16. Рытов, К. П. Параметры и режимы работы смесителя концентрированных кормов с мешалкой в виде шнека с перфорированной навивкой / К. П. Рытов, В. Ю. Фролов // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : Сборник статей по материалам 78-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2022 год. В 3-х частях, Краснодар, 01 марта 2023 года / Отв. за выпуск А.Г. Кощаев. Том Часть 2. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2023. – С. 311-313.

Подписано к печати _____ 2025 г.
Бумага офсетная
Печ. л. 1

Формат 60×84 ¹/₁₆
Офсетная печать
Заказ № _____

Тираж 100 экз