


На правах рукописи



АВАКИМЯНЦ ЕВГЕНИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СМЕСИ
КОРМОВЫХ ДОБАВОК ПУТЕМ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ
И РЕЖИМОВ РАБОТЫ СМЕСИТЕЛЯ**

Специальность: 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в Институте агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

Научный
руководитель

Гордеев Владислав Владимирович, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, отдел «Агроэкология в животноводстве».

Официальные
оппоненты:

Савиных Петр Алексеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией механизации животноводства, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого»

Нечаев Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технические и биологические системы», Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»

Ведущая
организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (ФГБОУ ВО «РГАТУ имени П.А. Костычева»)

Защита состоится 01 марта 2024 г. в 12³⁰ на заседании диссертационного совета 35.2.033.02 на базе ФГБОУ ВО СПбГАУ по адресу: 196601, Россия, Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2, ауд. 2310. Тел.: 8 (812) 470-04-22, e-mail: ds431_2@spbgau.ru.

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

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

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

ВрИО ученого секретаря
диссертационного совета 35.2.033.02
доктор технических наук, профессор

**Огнев
Олег Геннадьевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение качества и количества продукции животноводства напрямую зависит от организации кормления. Основным фактором, влияющим на качество кормления, является сбалансированность рационов, которая обеспечивается включением в кормосмесь специальных функциональных компонентов в виде белково-минерально-витаминных добавок (БМВД). Применение добавок стимулирует повышение удоев и жирности молока, а также содержание в нем белка и конверсию корма. Применяются также БМВД, действие которых направлено на сглаживание последствий теплового стресса у животных и снижение негативного воздействия на окружающую среду. Применение таких добавок в рационах молочных коров позволяет снизить выбросы углекислого газа на 10 %, а метана на 30-40 %.

БМВД являются высококонцентрированными препаратами, их суммарная доля в рационе молочных коров составляет 1,5-2 %. В то же время доля отдельных добавок может составлять 0,02 %. В свою очередь затраты молочно-товарных ферм на приобретение БМВД составляют более 10 % от общих затрат на приобретение кормов. При такой относительно малой доле отдельных добавок (10-300 г/гол.), возникает проблема обеспечения эффективности смешивания и равномерности распределения микрокомпонентов в объеме кормосмеси, составляющей около 45-50 кг/гол. Существующее положение требует совершенствования технологий и технических средств приготовления кормосмеси. Одним из направлений совершенствования является разработка смесителя для приготовления предварительной смеси БМВД. В связи с чем обоснование рациональных параметров и режимов работы смесителя для внутрихозяйственного приготовления предварительной смеси БМВД, обеспечивающих снижение удельной энергоемкости при высоких показателях качества смеси, отвечающих зоотехническим требованиям, является актуальной народно-хозяйственной задачей.

Степень разработанности темы.

Значительный вклад в изучение процесса кормления и разработку новых эффективных технических средств для приготовления кормосмесей внесли: И.Н. Краснов, В.И. Пахомов, А.Н. Глобин, С.В. Брагинец, В.А. Сысуев, П.А. Савиных, С.Ю. Булатов, Д.А. Зырянов, В.В. Коновалов, В.П. Терюшков, А.Н. Чупшев, В.В. Коновалов, А.И. Завражнов, С.М. Ведищев, Н.В. Хольшев, А.А. Кажияхметова, А.П. Иванова, Т.И. Пискарева, Д.Е. Каширин, В.В. Утолин, А.А. Полякова.

Цель исследований. Повышение эффективности приготовления смеси БМВД для КРС путем обоснования параметров и режимов работы смесителя.

Задачи исследований:

- провести анализ структуры рационов, технологических линий приготовления кормосмесей на фермах КРС по производству молока и технических средств для смешивания порошкообразных материалов;
- определить физико-механические свойства БМВД и их смесей;

- разработать теоретические зависимости энергетических и мощностных показателей процесса смешивания с учетом физико-механических свойств БМВД;

- провести экспериментальные исследования смесителя в лабораторных условиях и определить влияние параметров и режимов его работы на качество смеси и энергоёмкость процесса смешивания;

- провести экспериментальные исследования смесителя в производственных условиях;

- определить экономическую эффективность.

Объект исследований. Смеситель, белково-минерально-витаминные добавки.

Предмет исследований. Физико-механические свойства белково-минерально-витаминных добавок, процесс смешивания.

Методы исследований. Применялись общепринятые и частные методы и методики исследований с последующей их обработкой на персональном компьютере с помощью программных пакетов Statgraphics 19, Microsoft Office, Excel 2016, КОМПАС-3D 18.

Научную новизну работы составляют теоретическая зависимость, характеризующая величину мощности, необходимую для формирования условий смешивания в псевдооживленном слое с учетом физико-механических свойств БМВД и параметров смесителя; регрессионная зависимость энергоёмкости процесса смешивания от параметров и режимов работы смесителя; регрессионная зависимость качества смешивания БМВД от параметров и режимов работы смесителя.

Теоретическую значимость работы составляют зависимости энергетических показателей от структурно-механических характеристик смешиваемого материала и параметров смесителя.

Практическая значимость работы. Полученные результаты позволяют обосновать параметры и режимы работы смесителя кормовых добавок при модернизации и проектировании технологических линий кормоприготовления с учетом свойств применяемых кормовых добавок и производственно-хозяйственных условий молочно-товарных ферм.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретические зависимости энергетических показателей процесса смешивания с учетом физико-механических свойств БМВД;

- экспериментально установленные зависимости влияния параметров и режимов работы смесителя на качество получаемой смеси и энергоёмкость процесса смешивания;

- результаты исследований смесителя в производственных условиях.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность научных положений подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований. Достоверность экспериментальных данных, полученных в лабораторных и производственных условиях, с при-

менением современных средств измерений, при достаточном количестве повторностей опытов подтверждается использованием утвержденных программ и методик экспериментальных исследований.

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, прошли широкую апробацию в печати. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на Международной научно-практической конференции «Иновационная техника и цифровые технологии в животноводстве» (Москва, 2020 г.), Международной научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся «Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК», (Санкт-Петербург 2021 г.), 12-й международной научно-практической конференции «Агроэкология и цифровые сельскохозяйственные технологии», (Санкт-Петербург 2021 г.), VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Молодые исследователи агропромышленного и лесного комплексов – регионам» (Вологда 2022 г.), 13-ой Международной научно-практической конференции «Агроэкология и цифровые технологии в сельскохозяйственном производстве» (Санкт-Петербург 2023 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 2 – в международных изданиях базы Scopus, получено 2 патента Российской Федерации на изобретение.

Структура и объем диссертации.

Диссертация изложена на 149 страницах машинописного текста и содержит 23 таблицы, 53 рисунка. Состоит из пяти глав, заключения, списка литературы из 159 наименований, из которых 22 на иностранных языках и 11 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель, задачи исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследований» представлен обзор современных технологий и технических средств приготовления кормосмесей для КРС, в ходе которого выполнен анализ рационов для кормления КРС, технологических схем приготовления полнорационных кормосмесей и конструктивных схем смесителей порошкообразных материалов. Выполнен анализ методов оценки качества смешивания.

Анализ рационов показал, что общая масса кормосмеси составляет 45-50 кг/гол. и состоит из 15-20 компонентов. При этом 5-7 компонентов, являющиеся БМВД, входят в смесь в расчете 10-300 г/гол., т.е. представлены в малых долях по отношению к общей массе смеси. При такой массовой доле становится практически невозможным обеспечение высокой точности кормления по существующим технологическим схемам приготовления кормосмесей, поэтому необходимость их совершенствования является актуальной задачей.

Существующие смесители не вполне отвечают требованиям для встраивания их в систему кормоприготовления, ввиду необоснованности их параметров и режимов работы с учетом физико-механических свойств используемых сегодня кормовых добавок.

При оценке качества смешивания наиболее рациональным является применение метода точечного отбора проб. Для оценки концентрации компонентов в пробе наиболее простым и доступным является метод весового анализа проб, который обеспечивает высокую точность результатов.

На основе анализа научно-технической и патентной литературы обоснованы пути совершенствования технологий кормления КРС путем модернизации технологических схем приготовления кормосмесей и обоснования предпосылок к разработке смесителя для предварительного смешивания БМВД с учетом их физико-механических свойств. Обоснованы цель и задачи исследований.

Во второй главе «Теоретические предпосылки обоснования параметров и режимов работы смесителя» обоснованы предпосылки к разработке смесителя БМВД, проведены теоретические исследования скоростных и энергетических характеристик процесса смешивания БМВД в режиме псевдооживления.

БМВД представляют собой мелкодисперсные порошкообразные материалы. Для их смешивания применяются центробежные смесители с вертикальным валом и лопастной радиальной мешалкой. В ряде исследований разработаны конструкции таких смесителей с помощью метода, основанного на равенстве моментов, создаваемых вращающимися лопастями мешалки и возникающих сопротивлений стенок корпуса аппарата.

Для повышения эффективности и качества смешивания БМВД возможно применить подход, при котором достигается состояние псевдооживления сыпучего материала. Псевдооживление материала лопастной мешалкой проходит в несколько этапов и связано с увеличением высоты слоя материала и уменьшением его плотности. Следствием этого является снижение энергозатрат на преодоление сопротивления материала.

Основными параметрами процесса псевдооживления сыпучего материала лопастной мешалкой являются окружная скорость на краю лопасти $u_o \geq 8$ м/с и высота слоя материала над мешалкой, определяемая отношением $H/b = 6 \dots 10$, где H – высота слоя над мешалкой, b – ширина лопасти. Установлено, что чем меньше значение H/b , тем меньше значения окружной скорости u_o необходимы для достижения псевдооживленного состояния.

На основании расчётной схемы смесителя и принятых условий получены зависимости и определены конструктивные размеры и объем бункера, а также параметры лопасти смесителя, обеспечивающие формирование условий смешивания в псевдооживленном слое с учетом физико-механических свойств БМВД и производственно-хозяйственных условий молочно-товарных ферм.

Проведены теоретические исследования скоростных и энергетических характеристик процесса смешивания БМВД в режиме псевдооживления с учетом их физико-механических свойств. Изменение скорости частицы рассмотрели с помощью теоремы об изменении количества движения, которая в векторной форме имеет вид:

$$\vec{S} = m \cdot \Delta \vec{v}, \quad (1)$$

где m – масса материальной точки, кг.

Принимая во внимание положения теории упаковки дискретных сред, определили условия верхней границы коэффициента заполнения трехмерного пространства при гексагональной решетчатой упаковке:

$$k_3 = \frac{\pi}{\sqrt{18}} \quad (2)$$

С учетом выражения (2) определили массу отдельной частицы по формуле:

$$m_{ч} = \frac{D_{ср}^3 \cdot \rho_n \cdot \sqrt{18}}{6}, \quad (3)$$

где ρ_n – насыпная плотность материала, кг/м³.

На рисунке 1 показана расчетная схема векторов сил и скоростей при воздействии мешалки на частицу смеси с указанием угла наклона лопасти.

В общем случае движение частицы материала в радиальном направлении происходит за счет центробежной силы инерции:

$$F_{ц} = m \cdot \omega^2 \cdot r, \quad (4)$$

где ω – угловая скорость, рад/с;

r – расстояние до оси вращения, м.

Окружная скорость на краю лопасти мешалки определяется как:

$$u_o = \frac{\pi \cdot (a + L_l) \cdot n}{30}, \quad (5)$$

где L_l – длина лопасти, м;

a – расстояние от оси вращения до лопасти, м;

n – частота вращения, мин⁻¹.

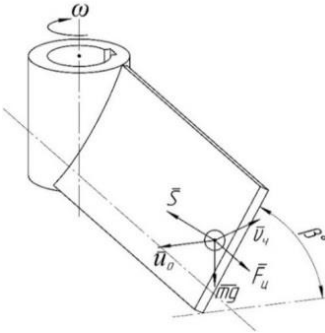


Рисунок 1 – Расчетная схема

Величина скорости движения частицы в радиальном направлении при сождении с поверхности лопасти определяется как:

$$v_{ч} = \frac{n \cdot (a + L_l)}{2 \cdot f_0}, \quad (6)$$

где L_l – длина лопасти, м;

f_0 – коэффициент внешнего трения.

Для уточнения кинематических и энергетических характеристик смешивания БМВД в режиме псевдооживления применили коэффициент структурно-механического сопротивления дисперсной многокомпонентной системы, характеризующий физико-механические свойства БМВД:

$$C_s = f(f_0; f; \varepsilon_i), \quad (7)$$

где f – коэффициент внутреннего трения;

ε_i – порозность слоя многокомпонентной смеси.

Преобразовав выражения (6), определили скорость схода частицы с лопасти с учетом коэффициента структурно-механического сопротивления дисперсной многокомпонентной системы и окружной скорости на краю лопасти:

$$v_{ч} = \frac{\pi \cdot n \cdot (a + L_l) \cdot \varepsilon_i \cdot \sin \beta_L}{30 \cdot f_0 \cdot f}, \quad (8)$$

где β_L – угол наклона лопасти мешалки, град.

Для определения мощности, необходимой для формирования и поддержания условий смешивания в псевдооживленном слое, определили массу слоя, перемещаемого мешалкой:

$$m_c = \rho_n \cdot V_c, \quad (9)$$

где V_c – объем слоя, перемещаемого мешалкой, м^3 .

Объем слоя нашли из выражения:

$$V_c = S_c \cdot b \cdot \sin\beta_L, \quad (10)$$

где β_L – угол наклона лопастей мешалки, град.;

S_c – площадь слоя, м^2 .

Площадь слоя определяли как:

$$S_c = \pi \cdot ((L_n + a)^2 - a^2). \quad (11)$$

Для определения величины сопротивления, обусловленного связностью дисперсной системы, определили характеристику предельного сопротивления сдвигу на границе слоя, перемещаемого мешалкой:

$$\tau_h = F_h \cdot f, \quad (12)$$

где F_h – аутогезия частиц на границе слоя, Па.

Аутогезия численно равна нормальному напряжению на верхней границе слоя, перемещаемого мешалкой при свободной засыпке:

$$F_h = \frac{V_h \cdot \rho_n \cdot g}{S_c}, \quad (13)$$

где V_h – объем слоя над мешалкой, м^3 .

Объем слоя над мешалкой равен:

$$V_h = S_c \cdot H_h, \quad (14)$$

где H_h – высота слоя материала над мешалкой, м.

Таким образом, преобразовав уравнения (12), (13) и (14) определили предельную характеристику напряженности дисперсной системы на границе слоя, перемещаемого мешалкой:

$$P_\tau = H_h \cdot \rho_n \cdot g \cdot f \cdot 2. \quad (15)$$

С учетом уравнений (9) и (14) получили выражение для определения энергии связности дисперсного слоя, перемещаемого мешалкой:

$$E_\tau = H_h \cdot \rho_n \cdot g \cdot f \cdot 2 \cdot S_c \cdot b \cdot \sin\beta_L. \quad (16)$$

С учетом вышеизложенного, обобщенная формула для определения затрат энергии на обеспечение условий формирования псевдооживленного слоя с учетом структурно-механических характеристик дисперсной многокомпонентной системы примет вид:

$$E_c = \frac{\rho_n \cdot V_c \cdot \left(\frac{\pi \cdot n \cdot (L_n + a) \cdot \varepsilon_i \cdot \sin\beta_L}{30 \cdot f_0 \cdot f} \right)^2}{2 \cdot C_s} + H_h \cdot \rho_n \cdot g \cdot f \cdot 2 \cdot S_c \cdot b \cdot \sin\beta_L. \quad (17)$$

На основании уравнения (17) находим выражение, характеризующее величину мощности, необходимую для формирования условий смешивания в псевдооживленном слое с учетом физико-механических свойств смешиваемого материала и параметров смесителя БМВД:

$$N_c = \left[\frac{\rho_n \cdot V_c}{2 \cdot C_s} \cdot \left(\frac{\pi \cdot n \cdot (L_l + a) \cdot \varepsilon_i \cdot \sin \beta_L}{30 \cdot f_0 \cdot f} \right)^2 + H_h \cdot \rho_n \cdot g \cdot f \cdot 2 \cdot S_c \cdot b \cdot \sin \beta_L \right] \cdot \omega. \quad (18)$$

На основании проведенных теоретических исследований получены зависимости скоростных и энергетических характеристик движения частиц БМВД под воздействием лопастной мешалки в зависимости от структурно-механических характеристик смешиваемого материала и параметров смесителя. Полученные данные позволяют сделать вывод, что увеличение структурно-механического сопротивления дисперсной системы приводит к значительному росту необходимой мощности. В то время как повышение порозности слоя приводит к снижению энергозатрат, в следствии уменьшения сопротивления движению лопасти. Установлено, что на скорость движения частиц в слое наибольшее влияние оказывает угол установки лопасти – наибольшим значениям скорости движения частиц в слое соответствует наибольший угол установки лопасти. При этом увеличение угла установки лопасти приводит к значительному росту необходимой мощности смешивания.

С целью изучения влияния структурно-механического сопротивления слоя БМВД и угла наклона лопасти смесителя на мощность, необходимую для формирования условий смешивания в псевдоожиженном слое, выполнено графическое решение уравнения (18) при значении скорости на краю лопасти $u_0 = 8$ м/с, соответствующем скорости начала псевдооживления (рисунок 2).

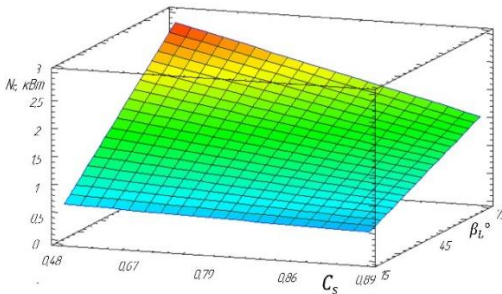


Рисунок 2 – Зависимость мощности от структурно-механического сопротивления слоя БМВД и угла наклона лопасти

и значении коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,48, значение мощности составляет 2,41 кВт. При значении коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,79 и угле наклона лопасти 45° значение мощности составляет уже 1,37 кВт. Возрастание необходимой мощности при снижении коэффициента структурно-механического сопротивления дисперсной системы связано с уплотнением слоя. При увеличении угла наклона лопасти от 30° до 60° наблюдается возрастание необходимой мощности на 45% – 55%, в зависимости от коэффициента структурно-механического сопротивления, что связано с увеличением сил сопротивления материала.

Анализируя график можно сказать, что изменение структурно-механического сопротивления оказывает значительное влияние на мощность смешивания. Наибольшее влияние на мощность оказывает угол установки лопасти.

При угле наклона лопасти 30° и значении коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,89 значение мощности составляет 0,72 кВт. При угле наклона лопасти – 60°

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» приведены методики определения физико-механических свойств БМВД для КРС и исследований влияния параметров и режимов работы экспериментальной установки смесителя на коэффициент неоднородности смеси БМВД и на энергоёмкость процесса смешивания, а также методика обработки экспериментальных данных.

Экспериментальные исследования проведены в соответствии с действующими ГОСТами (ГОСТ 51568-99, ГОСТ 28254-2014), общепринятыми и частными методиками, обеспечивающими получение первичной информации в виде реализаций случайных процессов с последующей их обработкой на персональном компьютере при помощи пакета программ MS Excel и Statgraphics.

Для исследований физико-механических свойств БМВД были изготовлены лабораторные установки и определены: гранулометрический состав, насыпная плотность, влажность, угол естественного откоса и коэффициент внутреннего трения, угол обрушения, коэффициент внешнего трения (по стали) для всех компонентов. Выбор факторов обусловлен их влиянием на скоростные и энергетические характеристики процесса смешивания и конструктивно-технологические параметры смесителя.

Для проведения экспериментальных исследований по определению рациональных параметров и режимов смешивания БМВД была изготовлена экспериментальная установка смесителя (рисунок 3). По принципу работы установка относится к смесителям периодического действия.



Основные технические характеристики установки:

- габаритные размеры – 820x450x1310 мм
- масса установки – 68 кг;
- общий объем смесительной камеры – 0,074 м³;
- мощность привода – 5,5 кВт.

1 – бункер; 2 – лоток выгрузки; 3 – привод; 4 – рама; 5 – блок управления; 6 – панель управления.

Рисунок 3 – Экспериментальная установка смесителя БМВД

Установка работает следующим образом. Смешиваемый материал загружается в бункер 1 в произвольной последовательности. В блоке управления 5 с помощью панели управления 6 задается необходимая частота вращения привода 3 в соответствии с планом эксперимента. После чего осуществляется пуск привода, тем самым, начинается процесс смешивания. Длительность смешива-

ния задается в соответствии с планом эксперимента и контролируется с помощью секундомера СОСпр-26-2-00. После окончания процесса смешивания материал выгружается через лоток выгрузки 2.

В соответствии с установленными зоотехническими требованиями к качеству кормосмеси для КРС, допустимый коэффициент неоднородности составляет не более 20 %, с введением в смесь карбамида – не более 10 %.

Качество смешивания определяли гравиметрическим методом, сущность которого заключается в отборе проб смеси с последующим разделением их на составляющие компоненты и взвешивании. При этом смесь условно считают двухкомпонентной, состоящей из основного и ключевого компонентов. На рисунке 4 показан пробоотборник, точки отбора проб и общий вид ключевого компонента.



Рисунок 4 – Пробоотборник и точки отбора проб

В результате однократного точечного отбора формируются две пробы из нижнего и верхнего слоя смеси, чем обеспечивается представительность проб и исключается возможность наличия незамеченных зон сегрегации.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» приведены результаты определения физико-механических свойств как отдельных добавок, так и смесей БМВД для КРС, используемых в рационах хозяйств Ленинградской области, и результаты исследований по определению влияния параметров и режимов на энергоёмкость смешивания.

В таблице 1 представлены исследуемые БМВД, входящие в рационы различных хозяйств, и их доли относительно общей массы кормовой смеси. В таблице 2 представлены результаты определения физико-механических свойств смесей БМВД.

Суммарная масса добавок в рационе КРС составляет 1,5-2,0 %. Отдельные добавки включаются в доле 0,01 кг/гол. Средневзвешенный размер частиц исследуемых смесей составил 0,62 мм и 0,59 мм, насыпная плотность – 905 кг/м³ и 911,3 кг/м³, влажность смесей – 8,14 % и 4,44 %, углы естественного откоса – 34,17° и 34,83°, углы обрушения – 25,6° и 25,9°, коэффициенты внутреннего трения – 0,76 и 0,7, коэффициенты внешнего трения (по стали) – 0,5 и 0,49.

По всем показателям физико-механических свойств, за исключением влажности, смеси БМВД, входящие в рационы коров нескольких хозяйств Ленинградской области, различаются не более чем на 10 %. По отдельным показателям, таким как насыпная плотность, угол обрушения и коэффициент внешнего трения, различия составляют менее 2 %. Исследования показали схожесть физико-механических свойств смесей БМВД, что определяет возможность

усреднения показателей физико-механических свойств при обосновании параметров смесителя БМВД для КРС.

Таблица 1 – Исследуемые БМВД в рационах хозяйств

Смесь БМВД 1				Смесь БМВД 2			
№ п/п	Наименование БМВД	Доля в смеси БМВД		№ п/п	Наименование БМВД	Доля в смеси БМВД	
		%	кг/гол.			%	кг/гол.
1	Мел	24,04	0,25	1	Фунгистат	15,63	0,15
2	Элитокс	1,92	0,02	2	Полисахариды сухие	31,25	0,30
3	Левисел	0,96	0,01				
4	Защищенный жир	28,85	0,30	3	Премикс П-60	26,04	0,25
5	Сода	28,85	0,30	4	Мел	16,67	0,16
6	Соль	15,38	0,16	5	Соль	10,42	0,10
7	Итого	100	1,04	6	Итого	100,00	0,96

Таблица 2 – Физико-механические свойства смесей БМВД

Исследуемые факторы	Смесь БМВД 1	Смесь БМВД 2	Различие свойств, %
Гранулометрический состав $D_{ср}$, мм	0,62	0,59	5,5
Насыпная плотность ρ_n , кг/м ³	905,00	911,30	0,7
Влажность $W_{см}$, %	8,14	4,44	83,3
Угол естественного откоса, α°	37,17	34,83	6,7
Угол обрушения, α_o°	25,60	25,90	1,2
Коэффициент внутреннего трения f	0,76	0,70	8,9
Коэффициент внешнего трения (по стали) f_o	0,50	0,49	1,3

При проведении экспериментальных исследований смесителя БМВД в качестве основного компонента применялась манная крупа, в качестве ключевого – просо, окрашенное с помощью пищевых красителей. На рисунке 5 представлен общий вид смеси. Для всех опытов смесь имела общую массу 27,27 кг и состояла из 27 кг основного компонента и 0,27 кг ключевого компонента (1 % относительно массы основного компонента).

Для уточнения интервала варьирования времени смешивания провели ряд поисковых опытов. При этом изменяли угол установки лопасти от 30° до 60° с интервалом 15° и время смешивания от 30 с до 240 с с интервалом в 30 с, а окружающая скорость на краю лопасти составляла 11 м/с для всех опытов.

Для упрощения анализа проб поисковых опытов в результате однократного точечного отбора формировали и анализировали объединенную пробу из нижнего и верхнего слоя смеси.

После загрузки смеси-тельной камеры включался привод смесителя, начинался процесс смешивания. По истечении 30 с процесс смешивания приостанавливали, отбирали пробы и процесс смешивания возобновляли еще на 30 с.

При углах установки лопасти 30° и 60° уже по истечении 60 с смешивания неоднородность смеси составляет менее 10 %, что отвечает зоотехническим требованиям.

При угле лопасти 45° смесь отвечает требованиям по истечении 90 с смешивания. Полученные в ходе поисковых опытов данные позволяют сделать вывод о необходимости корректировки интервалов варьирования времени смешивания ввиду нецелесообразности смешивания более 150 с.

Для установления оптимальных конструктивно-технологических параметров и более полного изучения рабочего процесса проведены исследования с использованием методики планирования многофакторного эксперимента с использованием трёхуровневого плана Бокса-Бенкина.

В таблице 3 указаны факторы, подлежащие исследованию, и уровни их варьирования, в таблице 4 – выходные параметры и критерии их оптимизации.



Рисунок 5 – Общий вид смеси

Таблица 3 – Факторы и уровни их варьирования

Факторы	Кодированное обозначение	Уровни факторов			Интервал
		-1	0	+1	
Окружная скорость на краю лопасти u_o , м/с	X_1	8	9,5	11	1,5
Время смешивания t , с	X_2	30	90	150	60
Угол установки лопасти β_L , град.	X_3	30	45	60	15

Таблица 4 – Выходные параметры

Параметр	Кодированное обозначение	Критерий
Коэффициент неоднородности, %	Y_1	≤ 10
Энергоемкость, кВт·ч/т	Y_2	Минимум энергоемкости

На основе анализа результатов проведенных экспериментальных исследований были получены следующие уравнения регрессии в раскодированном виде:

$$V_c = 653,656 - 103,656 \cdot u_o - 0,760835 \cdot t - 3,41503 \cdot \beta_L + 4,26274 \cdot u_o^2 + 0,0304722 \cdot u_o \cdot t + 0,295222 \cdot u_o \cdot \beta_L + 0,0014781 \cdot t^2 + 0,00296389 \cdot t \cdot \beta_L \quad (19)$$

$$R^2 = 94,66$$

$$E_i = 5,88729 - 0,7282 \cdot u_o + 0,0955833 \cdot t - 0,1119608 \cdot \beta_L + 0,0273504 \cdot u_o^2 - 0,00425 \cdot u_o \cdot t + 0,00455556 \cdot u_o \cdot \beta_L - 0,0004472 \cdot t \cdot \beta_L + 0,000762 \cdot \beta_L^2 \quad (20)$$

$$R^2 = 99,97$$

По уравнениям регрессии построены трехмерные поверхности отклика для определения влияния исследуемых факторов на неоднородность смеси (рисунок 6) и удельную энергоёмкость (рисунок 7) смешивания с указанием факторов в раскодированном виде: $V_c = f(u_o; \beta_L)$; $V_c = f(u_o; t)$; $E_i = f(u_o; \beta_L)$; $E_i = f(u_o; t)$.

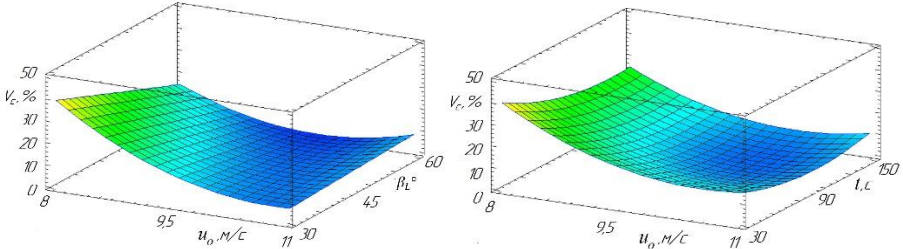


Рисунок 6 – Поверхности отклика влияния окружной скорости на краю лопасти u_o (м/с), угла наклона лопасти β_L (град.) и времени смешивания t (с) на коэффициент неоднородности смеси V_c (%)

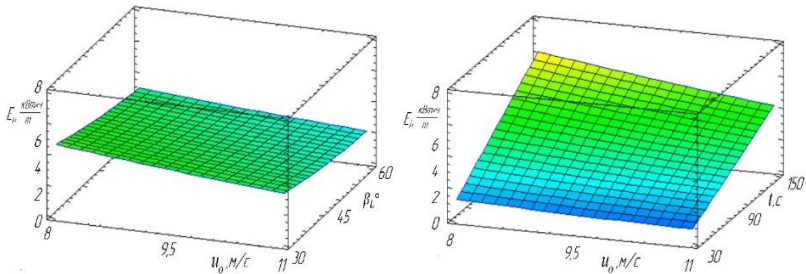


Рисунок 7 – Поверхности отклика влияния окружной скорости на краю лопасти u_o (м/с), угла наклона лопасти β_L (град.) и времени смешивания t (с) на энергоёмкость смешивания E_i (кВт·ч/т)

Анализ полученных данных показал, что наибольшее влияние на качество смеси оказывает окружная скорость на краю лопасти и ее квадрат, третий по влиянию – угол установки лопасти, увеличение которого положительно влияет на качество смеси, четвертый – время смешивания, пятый – произведение факторов окружная скорость и угол установки лопасти. С увеличением всех факторов неоднородность уменьшается.

Наилучшее качество смеси, полученное при экспериментальных исследованиях, составляет $V_c = 6,58$ % и достигается при окружной скорости $u_o = 9,5$ м/с, времени смешивания $t = 90$ с и угле наклона лопасти $\beta_L = 45^\circ$.

Энергоёмкость смешивания в большей степени зависит от времени смешивания и угла установки лопасти. Наименьшее значение энергоёмкости смешивания, полученное при экспериментальных исследованиях, $E_i = 0,54$ кВт·ч/т

достигается при окружной скорости $u_o = 9,5$ м/с, времени смешивания $t = 30$ с и угле наклона лопасти $\beta_L = 30$ град.

Исследования показали, что при увеличении окружной скорости на краю лопасти наблюдается снижение энергоемкости. Это обусловлено снижением структурно-механического сопротивления смешиваемого материала в следствии увеличения порозности слоя.

Для нахождения оптимальных параметров и режимов работы смесителя использовались нелинейное программирование. Решение задачи оптимизации записывается в виде:

$$\begin{cases} V_c = f(X1; X2; X3) \leq 10\%; \\ E_i = f(X1; X2; X3) \rightarrow \min; \\ -1 \leq X1 \leq 1. \\ -1 \leq X2 \leq 1. \\ -1 \leq X3 \leq 1. \end{cases} \quad (21)$$

сти смеси, соответствующего зоотехническим требованиям ($V_c \leq 10\%$) и минимума энергоемкости смешивания. На рисунке 8 показаны контуры сечения поверхности отклика при решении оптимизационной задачи.

Анализ полученных данных позволил сделать вывод, что оптимальные параметры и режимы работы смесителя для достижения коэффициента неоднородности смеси, соответствующего зоотехническим требованиям ($V_c \leq 10\%$) и минимума энергоемкости смешивания составляют: окружная скорость на краю лопасти $u_o = 9,83$ м/с; время смешивания $t = 88$ с; угол установки лопасти $\beta_L = 60$ град., при этом коэффициент неоднородности смеси составил $V_c = 2,51\%$, а энергоемкость смешивания $E_i = 2,31$ кВт·ч/т.

В пятой главе «Исследование смесителя в производственных условиях. Экономическая оценка» приведены результаты производственных исследований работы смесителя. Также представлены экономические показатели эффективности внедрения разработанного смесителя на молочно-товарной ферме с поголовьем 1200 голов дойного стада.

Исследования смесителя в производственных условиях проводились для проверки достоверности теоретических положений и результатов лабораторных исследований по определению качества смешивания, а также эффективности смесителя. Исследования смесителя проводились на молочно-товарной ферме АО ПЗ «Петровский», п. Петровское Приозерского района Ленинградской области (рисунок 9).

На основе анализа математических моделей (19, 20) была решена оптимизационная задача по определению значения факторов для достижения коэффициента неоднородности

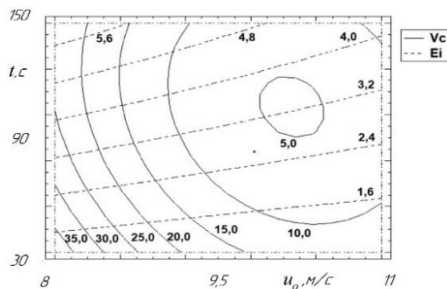


Рисунок 8 – Контурные сечения поверхности отклика при решении оптимизационной задачи



Рисунок 9 – Проведение исследований в производственных условиях

В ходе исследований приготавливались смеси БМВД в соответствии с действующими рационами и производственной необходимостью, в рамках существующей технологической схемы приготовления полнорационных кормовых смесей для молочных коров. Масса основного компонента для всех исследований составляла 21,24 кг и включала в себя 6,62 кг Левисела и 14,62 кг Элитокса. В качестве ключевого компонента применяли просо. Концентрация ключевого компонента для всех смесей составляла 1 % от массы основы или 0,212 кг.

Исследования проводились при расчетных параметрах и режимах работы, полученных в ходе решения оптимизационной задачи для достижения коэффициента неоднородности смеси, соответствующего зоотехническим требованиям ($V_c \leq 10\%$) и минимума энергоемкости смешивания.

После загрузки всех компонентов включался привод смесителя, тем самым начинался процесс смешивания. По истечении 30 с процесс смешивания приостанавливали, затем отбирали пробы и процесс смешивания возобновляли еще на 30 с.

Наилучшее качество смеси было достигнуто по истечении 60 с работы, при окружной скорости на краю лопасти $u_o = 9,83$ м/с и угле наклона лопасти $\beta_L = 60$ град. Коэффициент неоднородности смеси составил 1,91 %, что соответствует зоотехническим требованиям и является отличным показателем. Энергоемкость смешивания при этом составила 1,03 кВт·ч/т. Дальнейшее смешивание не привело к улучшению качества, по истечении 90 секунд смешивания коэффициент неоднородности составил уже 3,23 %. Полученные данные подтверждают результаты лабораторных исследований и свидетельствуют об эффективности работы разработанного смесителя в производственных условиях.

Экономическая оценка дана в сравнении со смесителем лопастным СЛВ 5,5, имеющем схожие технические характеристики и конструктивное исполнение. Геометрические формы лопастной мешалки и бункера прототипа отличаются от предлагаемого смесителя. Конструктивные параметры предлагаемого смесителя обоснованы с учетом производственно-хозяйственных условий, физико-механических свойств кормовых добавок и обеспечения формирования условий смешивания в псевдооживленном слое.

Расчет показателей экономической эффективности предлагаемого смесителя подтвердил экономическую целесообразность его применения в производственных условиях.

Годовые эксплуатационные затраты составили 99546 рублей, что на 61,2 % меньше чем у СЛВ 5,5. Снижение эксплуатационных затрат главным образом достигается за счет уменьшения времени смешивания. При этом однородность получаемой смеси составила 98 %, что на 3 % больше чем у прототипа. Экономия денежных средств в годовом выражении при использовании предлагаемого смесителя составила 163055 рублей. Срок окупаемости смесителя составил не более 9 месяцев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Структура полнорационной кормосмеси для молочных коров состоит из 15 – 20 компонентов общей массой 45 – 50 кг/гол., в том числе 5 – 7 компонентов входят в смесь в виде белково-минерально-витаминных добавок, каждый из которых составляет от 10 г/гол. до 300 г/гол., т.е. 0,02 % – 0,6 % от общей массы смеси. При таких малых долях обеспечить равномерность распределения в смеси компонентов затруднительно, поэтому на основе анализа технологий приготовления кормосмесей предложена технологическая схема, предусматривающая выделение предварительного смешивания БМВД в отдельную операцию с дальнейшим внесением смеси кормовых добавок в основной процесс смешивания в виде отдельного компонента. При этом предварительная смесь БМВД будет иметь достаточно высокую степень однородности и массу более 1,5 % от общей массы кормосмеси. Существующие конструкции смесителей не вполне отвечают требованиям по достижению высокого качества смеси с малой долей ключевого компонента при низкой удельной энергоёмкости смешивания для использования их в технологических линиях кормоприготовления, ввиду необоснованности их параметров и режимов работы с учетом физико-механических свойств используемых сегодня кормовых добавок.

2. Определены физико-механические свойства БМВД и их смесей для КРС: гранулометрический состав, насыпная плотность, влажность, угол естественного откоса и коэффициент внутреннего трения, угол обрушения, коэффициент внешнего трения (по стали). По всем показателям физико-механических свойств, за исключением влажности, смеси БМВД различаются не более чем на 10 %. По отдельным показателям, таким как насыпная плотность, угол обрушения и коэффициент внешнего трения, различия составляют менее 2 %. Схожесть физико-механических свойств смесей БМВД позволяет усреднить их при обосновании параметров и режимов работы смесителя БМВД.

3. Получена зависимость (18), характеризующая величину мощности, необходимую для формирования условий смешивания в псевдооживленном слое с учетом физико-механических свойств смешиваемого материала и параметров смесителя БМВД, которая показывает, что при угле наклона лопасти 30° и значении коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,89 значение мощности составляет 0,72 кВт. При угле наклона лопасти – 60° и значении

коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,48, значение мощности составляет 2,41 кВт. При значении коэффициента структурно-механического сопротивления – 0,79 и угле наклона лопасти 45° значение мощности составляет уже 1,37 кВт. Возрастание необходимой мощности при снижении коэффициента структурно-механического сопротивления дисперсной системы связано с уплотнением слоя. При увеличении угла наклона лопасти от 30° до 60° наблюдается возрастание необходимой мощности на 45 % – 55 %, в зависимости от коэффициента структурно-механического сопротивления, что связано с увеличением сил сопротивления материала.

4. На основании экспериментальных исследований получены уравнения регрессии для определения влияния исследуемых факторов на коэффициент неоднородности смеси (19) и удельную энергоёмкость смешивания (20). Решение оптимизационной задачи для достижения коэффициента неоднородности смеси, соответствующего зоотехническим требованиям ($V_c \leq 10\%$) и минимума энергоёмкости смешивания позволило определить оптимальные параметры и режимы работы смесителя, которые составили: окружная скорость на краю лопасти $u_o = 9,83$ м/с; время смешивания $t = 88$ с; угол установки лопасти $\beta_L = 60$ град., при этом коэффициент неоднородности смеси $V_c = 2,51\%$, а удельная энергоёмкость $E_i = 2,31$ кВт·ч/т.

5. Проведены исследования в производственных условиях. На основании экспериментальных данных можно заключить, что разработанный смеситель обеспечивает качество смешивания от 94 до 98%, что удовлетворяет зоотехническим требованиям.

Расчитаны показатели экономической эффективности предлагаемого смесителя в сравнении со смесителем лопастным СЛВ 5,5. Годовые эксплуатационные затраты составили 99546 рублей, что на 61,2 % меньше чем у СЛВ 5,5. Снижение эксплуатационных затрат главным образом достигается за счет уменьшения времени смешивания. При этом однородность получаемой смеси составила 98%, что на 3% больше чем у прототипа. Экономия денежных средств в годовом выражении при использовании предлагаемого смесителя составила 163055 рублей. Срок окупаемости смесителя составил 9 месяцев.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке технологического оборудования для дозирования, смешивания и транспортировки БМВД. В дальнейших исследованиях необходимо продолжить работу по совершенствованию параметров и режимов работы смесителя в направлении снижения удельной энергоёмкости смешивания и повышения качества получаемых смесей БМВД. Перспективным направлением является обоснование внедрения в конструкции смесителей кормов и кормовых добавок анализаторов ближнего инфракрасного спектра для контроля качества смешивания в режиме реального времени, определения изменений гранулометрического состава материала в процессе смешивания, определения реальных показателей содержания питательных веществ в приготавливаемой кормовой смеси.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

- в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Авакимянц, Е.В.** Разработка конструктивной схемы смесителя белково-минерально-витаминных добавок / Е.В. Авакимянц, В.В. Гордеев // *Агроинженерия*. – 2021. – № 3(103). – С. 32-36. – DOI 10.26897/2687-1149-2021-3-32-36.
2. **Авакимянц, Е.В.** Определение технологического объема смесителя белково-минерально-витаминных добавок // *Техника и технологии в животноводстве*. – 2021. – № 3(43). – С. 62-65. – DOI 10.51794/27132064-2021-3-62.
3. **Авакимянц, Е.В.** Теоретические предпосылки к обоснованию параметров смесителя белково-минерально-витаминных добавок / Е.В. Авакимянц // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. – 2022. – Т. 23, № 3. – С. 411-416. – DOI 10.30766/2072-9081.2022.23.3.411-416
4. **Авакимянц, Е.В.** Обоснование выбора модельного материала для экспериментальных исследований по смешиванию БМВД / Е.В. Авакимянц, В.В. Гордеев // *Техника и технологии в животноводстве*. – 2022. – № 3(47). – С. 59-62. – DOI 10.51794/27132064-2022-3-59

- в международных изданиях базы *Web of Science Core Collection, Scopus*:

5. **Avakimyan E.V. Gordeev. V.V.** Study of physical and mechanical properties of feed additives for cattle / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 723. – P. 032085. DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032085.
6. **Avakimyan E.V.** Physical and mechanical properties of mixtures of feed additives for cattle / E.V. Avakimyan, V.V. Gordeev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, 20–24 октября 2021 года. – Virtual, Online, 2022. – P. 012082. – DOI 10.1088/1755-1315/979/1/012082.

- патенты РФ:

7. Патент № 2743924 РФ, МПК В01F 7/16. Смеситель: № 2020127498: заявл. 18.08.2020: опубл. 01.03.2021 / **Е.В. Авакимянц, В.В. Гордеев**
8. Патент № 2780319 РФ, МПК В01F 27/90 Смеситель: № 2022102749: заявл. 04.02.2022: опубл. 21.09.2022 / **Е.В. Авакимянц, В.В. Гордеев**

- в трудах конференций, РИНЦ:

9. **Авакимянц Е.В., Гордеев В.В.** Анализ технологических линий приготовления кормосмесей и возможность их совершенствования / *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2020. № 2(103). С. 98-108. DOI: 10.24411/0131-5226-2020-10246.
10. **Авакимянц Е.В., Гордеев В.В.** Физико-механические свойства кормовых добавок для КРС / *АгроЭкоИнженерия*. 2020. № 1. С. 100-108. DOI: 10.24411/0131-5226-2020-10259.