

На правах рукописи

Обухов Андрей Дмитриевич

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ ПРОИЗВОДСТВА
ОДНОРОДНЫХ СМЕСЕЙ ЛЕЧЕБНЫХ КОМБИКОРМОВ

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

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

**Научный
руководитель:**

Парлюк Екатерина Петровна,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

**Официальные
оппоненты:**

Сергеев Николай Степанович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка, и технологии и механизации животноводства ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»

Булатов Сергей Юрьевич,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Технический сервис ГБОУ «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»

Ведущая организация: ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»

Защита состоится 19 февраля 2024 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел./факс: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан « ____ » декабря 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.03
к.т.н., доцент

Н. Н. Пуляев

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Производство премиксов и лечебных кормов – это сложный технологический процесс, при котором все компоненты добавляются в оптимальных количествах и требуемых соотношениях. На качество производства премикса следует обращать большое внимание, т.к. биологически активные вещества, которые входят в состав премикса, обладают опасно высокой активностью в отношении животных. И если премикс будет изготовлен с нарушением технологии, то не исключено, что в скором времени у животного могут возникнуть серьезные нарушения в адаптационных механизмах и может развиваться серьезное заболевание. Все составляющие премикса в ходе производства должны быть тщательно дозированы, качественно перемешаны до получения однородной смеси, макро- и микродозы биологически активных веществ в каждой порции смеси должны быть равномерно распределены.

Промышленные комплексы – свинофермы на 24; 54 и 108 тыс. голов, птицефабрики на 2...3 или 0,5 млн голов в своем составе имеют комбикормовые заводы, где могут производить лечебные комбикорма или лечебные премиксы, с использованием собственного оборудования. В то же время есть необходимость обслуживать отгонное животноводство, малые предприятия, межхозяйственные и кооперативные организации, которые не имеют собственной материальной технологической базой и не могут заготавливать лечебные премиксы и кормолекарственные смеси.

Таким образом, создание мобильной установки по производству лечебных, витаминных и минеральных премиксов, для обслуживания небольших хозяйств и отгонного животноводства имеет большое научное и практическое значение, мобильная установка может находиться в районной ветеринарной службе и осуществлять плановое, своевременное производство лечебных премиксов и лечебных кормовых смесей, которые по предписанию ветеринарных врачей скармливаются животным с целью профилактики и лечения различных заболеваний, а также в целях увеличения продуктивности.

Уровень проработки вопроса. Изучение процессов смешивания сыпучих материалов — это специализированная область, которая может пересекаться с различными дисциплинами, включая химическое машиностроение, процессную инженерию и материаловедение. В России многие ученые занимались и продолжают заниматься исследованиями в этой области. Механизация производства кормов — это ключевая область в сельском хозяйстве, которая включает в себя разработку и применение различных технологий для автоматизации процессов изготовления, обработки и распределения кормов для животных, Горячкин В. П., Сыроватка В. И., Кильчевский Н. А., Ластовцев А.М., Макаров Ю.И. – эти ученые и инженеры внесли важный вклад в разработку технологий и машин, которые использовались для автоматизации процессов смешивания.

Их работы помогли повысить эффективность и производительность в этой критически важной для агропромышленного комплекса области.

Целью исследования является разработка эффективных способов и устройств для приготовления высокой однородности смеси малых доз лечебных препаратов, витаминных и минеральных добавок с наполнителем.

Научная новизна исследования:

1. Установлены параметры смеси, характеризующие миграционную способность мелких частиц различной плотности в диапазоне крупности от 1,0 до 0,001 мм, подверженных действию воздушного потока, определяемые состоянием равновесия частицы на наклонной поверхности и зависящие от скорости потока и угла наклона, что позволяет определить условия эффективности разделения смеси по крупности и плотности.

2. Выявлены особенности перемещения частиц разной крупности и плотности в воздушно-материальных потоках при скоростях менее их скорости витания в шаровом корпусе смесителя и при скоростях псевдооживленного слоя в виде воздушно-материальной смеси и их активного взаимодействия, что позволяет предложить новую конструкцию смесителей.

3. Определены условия эффективности смешивания материалов различных размеров частиц и плотности достигается в воздушно-материальном потоке с обеспечением пересекающихся траекторий легких и тяжелых частиц в поле гравитационных, центробежных и аэродинамических сил.

Задачи исследования:

1. Исследовать и проанализировать преимущества и недостатки способов работы смесителей для приготовления лечебных кормов и премиксов;

2. Разработать математическую модель и методику расчёта смесителей работающих по принципу механического псевдооживления и обосновать рациональные способы и конструктивные параметры смесителей для приготовления лечебных комбикормов;

3. Обосновать методику расчета смесителей, работающих по принципу механического псевдооживления, позволяющую определить основные геометрические параметры и энергетические показатели смесителей в зависимости от их производительности и свойств сыпучих кормов;

4. Провести экспериментальные исследования сферической формы корпуса смесителей лечебных препаратов, витаминных и минеральных добавок с наполнителем и определить оптимальные технологические и конструктивные параметры линии приготовления лечебных кормов и премиксов;

5. Предложить концепцию мобильной установки по производству лечебных кормов, витаминных и минеральных добавок для обслуживания удаленных хозяйств.

Объектом исследования являются процессы производства кормов для получения однородных сыпучих ключевых компонентов (лечебных препаратов,

витаминовых и минеральных добавок) кормов для животноводства, птицеводства и аквакультур.

Предметом исследования является конструкция и эффективность вертикальных лопастных смесителей осуществляющих смешивание сыпучих ингредиентов комбикормов и ключевых компонентов (лечебных препаратов, аминокислот, стимуляторов, витаминных и минеральных добавок) кормов в режиме псевдоожижения для животноводства, птицеводства и аквакультур.

Практическая значимость исследований:

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны новый способ и смеситель новой конструкции, использование которых позволит решать проблему приготовления лечебных витаминных и минеральных премиксов, а также лечебных кормов для животноводства и птицеводства.

2. Разработано проектное предложение (конструкция) установки для приготовления лечебных кормов, включающая три последующих этапа: измельчение и смешивание препарата с наполнителем в соотношении 1:1 (первичный премикс); измельчение и смешивание полученной смеси с наполнителем 1:20 (вторичный премикс) и смешивание вторичного премикса с наполнителем в конечном соотношении (рабочий премикс).

Методы исследований. При проведении исследований использовались методы: анализа и сравнительных оценок, монографический и расчетно-конструктивный, теорий вероятностей. Результаты теоретических исследований подтверждаются результатами и данными экспериментальных исследований, выполненных с помощью моделирования исследуемых процессов на ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Научно-методические рекомендации и результаты исследований по оптимизации и математическому описанию сложного многофакторного процесса смешивания смеси малых доз лечебных препаратов, витаминных и минеральных добавок с наполнителем;

2. Способ повышения качества гомогенной смеси лечебных комбикормов с коэффициентом однородности не ниже 0,95...0,98 %;

3. Методика расчета смесителей, работающих по принципу механического псевдоожижения;

4. Способ приготовления лечебных кормов в шаровом смесителе.

Апробация работы. Основные материалы исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях: Научный семинар «Чтения академика В.Н. Болтинского» 22 января 2020 г. ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; Международная научная конференция профессорско-преподавательского состава, посвященной 177-летию со дня рождения К.А. Тимирязева 4-6 декабря 2020 г. Москва, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; Международная научно-практическая онлайн-конференция «Арктика: инновационные технологии, кад-

ры, туризм». Россия, г. Воронеж, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова». 17-19.11.2020 г.; Международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов «Агробиоинженерные инновации в сельском хозяйстве» Россия, г. Москва, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. 10.06.2021 г.; Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева, г. Москва, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. 5-7.06.2023 г.

Результаты работы экспонировались на инновационных конкурсах и выставках: Работа награждена золотой медалью в конкурсе «За разработку технологии и оборудования приготовления лечебных кормов для животноводства и птицеводства» в рамках Российской агропромышленной выставки «Золотая осень-2021» г. Москва, 9-12 октября 2021 г. Номинация: «Машины и оборудование для кормоприготовления». Работа выставлялась на выставке в рамках фестиваля науки и технологий «Техносреда» г. Москва, 25-26 сентября 2021 г.

Публикации. По материалам исследований опубликовано 28 работ, в том числе 8 статей в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов научных исследований, в международных базах данных – 4 статьи и 16 патентов на изобретения РФ.

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, 4 главы, заключение, список литературы из 107 наименований и приложения на 3 страницах. Объём диссертации – 190 страниц, содержит 32 таблицы и 45 рисунков.

Благодарности. Выражаю огромную благодарность Академику Российской академии наук Дидманисе Отари Назировичу, за большую научную и методическую помощь в подготовке, оформлении и представлении к защите диссертационной работы.

Основное содержание работы

Во введении дана краткая характеристика работы, обоснована ее актуальность, указаны объект, предмет и методы исследований, сформулированы цели и задачи научного исследования, отражена научная новизна работы, а также достоверность результатов и их практическая значимость.

В первой главе проведён анализ работы смесителей и установлено, что для получения однородной смеси необходимо такое воздействие на среду, которое обеспечивало бы эффективное протекание конвективного и диффузионного процессов смешивания одновременно. Указанные условия частично осуществляются при смешивании сыпучих материалов в псевдооживленном слое.

В результате проведенных исследований в этой области выявлено, что при псевдооживлении распределение компонентов в смеси наступает в десятки раз быстрее. Это объясняется равномерным распределением энергии внутри слоя материала и стабильной уравновешенностью сепарирующего и перемешива-

вающего эффектов, что практически недостижимо в механических смесителях, спецификой которых является наличие застойных зон.

Во второй главе представлены результаты исследований кинетики процесса смешивания, определено влияние геометрических параметров смесителя на процесс псевдооживления.

Следует отметить, что расчеты процессов смешивания некоторых теоретических исследований сложные и трудоемкие, но не дают достаточно точного результата.

Для интенсификации процессов тепло- и массообмена, процессов смешения сыпучих материалов, агломерации, гранулирования и других процессов широко используются аппараты с псевдооживленным слоем (рисунок 1) зернистого материала (взвешенный, кипящий слой).

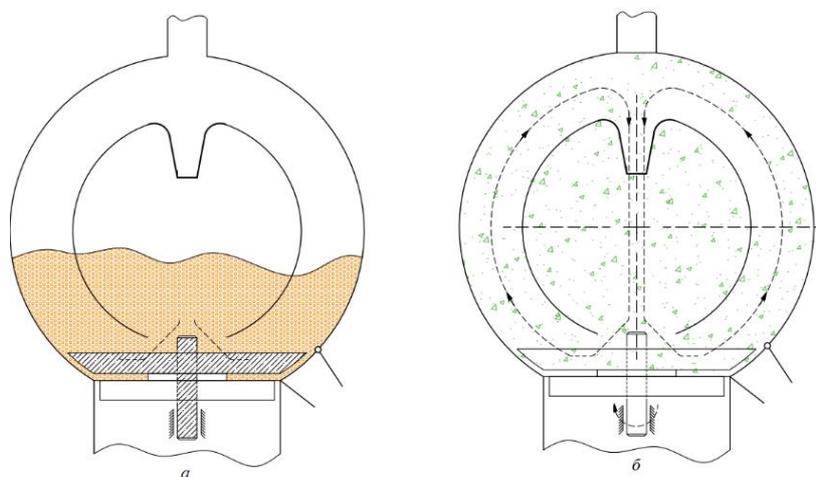


Рисунок 1 – Изменение структуры слоя: а – уплотненный слой; б – псевдооживленный слой

При этом, важным основополагающим параметром является окружная скорость концов лопастей $V_{\text{раб}}$. С увеличением частоты вращения лопастей достигается оптимальное число оборотов в минуту, при котором распределение компонентов оказывается наиболее равномерным.

Опытом установлено, что окружная скорость лопастей $V_{\text{раб}}$, соответствующая оптимальным условиям смесеобразования, равна:

$$V_{\text{раб}} = (1,2 \div 1,4) V_{\text{кр}}, \text{ м/с} \quad (1)$$

где $V_{\text{кр}}$ – критическая скорость псевдооживления, т.е. окружная скорость лопастей, при которой слой переходит в псевдооживленное состояние.

В сферической камере конвективное смешивание осуществляется при турбулентном движении воздушного потока. Сила сопротивления каждой частицы зависит от давления динамического воздушного потока и определяется по формуле Ньютона:

$$R = CF \frac{\rho V_2}{2} \text{ где} \quad (2)$$

где C – коэффициент аэродинамического сопротивления; F – миделево сечение – площадь частицы на плоскость, нормальную к вектору ее скорости, m^2 ; ρ – плотность воздуха, kg/m^3 ; V – скорость потока воздуха, m/s .

Значение коэффициента C зависит от формы частицы, состояния ее поверхности и обтекающего ее режима потока воздуха, он является функцией критерия Рейнольдса (Re).

При значениях $Re=0,1-1,0$

$$C = \frac{24}{Re} \quad (3)$$

$$Re = \frac{Vd}{\nu}, \quad (4)$$

где d – диаметр частицы, mm ; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха; V – область относится к пылинкам диаметром $0,1$ mm . При значениях $Re=10-1000$ зависимость коэффициента C от Re выражается формулой:

$$C = \frac{13}{\sqrt{Re}} \quad (5)$$

И относится к частицам диаметром $0,1 \dots 2,5$ mm . При значениях $Re=1000-20000$ коэффициент C почти не зависит от Re и в среднем равен $0,45$. Эта область относится к частицам $2,5 \dots 8,0$ mm . Все три случая имеют место при смешивании лечебных комбикормов.

Из расчетов следует, что переход сыпучих кормов в устойчивое псевдооживленное состояние возможен при углах наклона лопастей относительно рабочей поверхности 45° . С увеличением величины угла наклона до 45° псевдооживление слоя наступает при меньших окружных скоростях, а степень разрыхления материала увеличивается, создавая благоприятные условия для протекания конвективного процесса смешивания.

С увеличением размаха лопастей L возрастает поверхность воздействия рабочего органа на среду. Если диаметр корпуса D остается постоянным, то увеличение размаха лопастей приводит к повышению степени разрыхления и уменьшению критической скорости псевдооживления. При постоянной частоте вращения лопасти, наиболее равномерное распределение компонентов возникает в том случае когда зазор S между концом лопасти и стенкой корпуса достигает некоторой оптимальной величины.

Расширение псевдооживленного слоя характеризуется порозностью ε , которая определяется как отношение объема пустот $V_{п}$ в слое к объему всего слоя $V_{сл}$

$$\varepsilon = \frac{V_{п}}{V_{сл}} = \frac{V_{сл} - V_{т}}{V_{сл}} = 1 - \frac{V_{т}}{V_{сл}}, \quad (6)$$

где $V_{т}$ – объем, занимаемый твердыми частицами в слое, m^3 ; $V_{сл} = f_a H$ – объем слоя (H – высота псевдооживленного слоя), m^3 ; $f_a = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь поперечного сечения сферического корпуса смесителя), m^3 .

Известно, что порозность неподвижного слоя твердых частиц одинакового диаметра составляет приблизительно 0,4. В процессе псевдооживления объем остается величиной постоянной, следовательно, его можно определить по параметрам неподвижного слоя:

$$V_T = f_a H_0 (1 - \varepsilon_0), \quad (7)$$

где H_0 – высота неподвижного слоя частиц.

Подставим (3) и (4), получим формулу для расчета порозности по измеренным значениям высот слоя:

$$\varepsilon = 1 - \frac{f_a H_0 (1 - \varepsilon_0)}{f_a H} = (1 - \varepsilon_0) \frac{H_0}{H}. \quad (8)$$

Из формулы (5) видно, что с увеличением скорости оживающего агента порозность слоя растет. При скорости, предельной для псевдооживленного слоя, можно считать, что $V_{сл} \geq V_T$, следовательно, $\varepsilon = 1$. Таким образом, псевдооживленный слой может существовать в пределах от $\varepsilon = \varepsilon_0 = 0,4$ ($\omega < \omega_{кр}^1$) до $\varepsilon = 1$ ($\omega \geq \omega_{кр}^1$).

Минимальная неоднородность достигается в интервале варьирования факторов от $\frac{\gamma_H}{\gamma_K} = 1$ и $c = 0,16$ до $\frac{\gamma_H}{\gamma_K} = 1,7$ и $c = 0,15$.

При большом соотношении размеров зерен $\frac{d_H}{d_K}$ для снижения разделяющего эффекта необходимо увеличить удерживающую способность поверхности частиц.

Из условий был определён общий объем V , занимаемый материалом, по формуле:

$$V = \frac{G}{\gamma_{об}}, \text{ м}^3 \quad (9)$$

Оптимальные размеры сферического корпуса смесителя (диаметр D , высота h) вычисляют из условий минимальной затраты на трение материала о корпус. Для этого необходимо, чтобы полная поверхность слоя F была минимальной:

$$F = 2\pi \left(r^2 + \frac{V}{\pi r} \right) = F_{min} \quad (10)$$

где r – радиус основная, слоя, м.

Ввиду того, что при работе лопастей слой расширяется, высота корпуса должна быть увеличена на 30% по сравнению с высотой слоя материала, т.е. $h = 1,3H = 1,3D$, м.

Параметры лопастного рабочего органа определяют из соотношений, полученных в результате исследования. Ширина лопасти:

$$b = \frac{H}{(3,5 \div 5)z}, \text{ м}; \quad (11)$$

Число ярусов $z = 1 \div 3$, число лопастей в ярусе 2, размах лопастей $L = (0,85 \div 0,95) D$, м.

Число оборотов рабочего органа вычисляют по формуле:

$$n = \frac{60V_p}{\pi L}, \text{ об/мин,} \quad (12)$$

где $V_p = 1,2 V_{кр}$ – рабочая окружная скорость лопастей, м/с; $V_{кр} = 3,76 (H/b)^{0,18}$ – критическая скорость псевдооживления м/с.

Общая мощность для привода рабочего органа равна сумме мощностей, необходимых для привода каждого яруса лопастей, рассчитанных по формуле (12).

В сферической камере конвективное смешивание осуществляется при турбулентном движении воздушного потока, а вогнутая поверхность сферического горпуса смесителя обеспечивает различные траектории движения частиц за счет разности их формы, удельного веса и коэффициента трения.

Диффузионное смешивание осуществляется способом взаимной диффузии компонентов при совместном смятии, в результате из двух гетерогенных (неоднородных компонентов) образуется гомогенный (однородный) продукт – вещества находятся в одном агрегатном состоянии и при последующем смешивании не разделяются. Диффузионное смешивание представляется как процесс взаимного проникновения молекул одного вещества между молекулами другого, что приводит к выравниванию их концентрации по всему занимаемому объему. При этом происходит перенос вещества с мест высокой концентрации в места низкой концентрации и наоборот.

В результате анализа работы смесителей установлено, что для получения однородной смеси необходимо такое воздействие на среду, которое обеспечивало бы эффективное протекание конвективного и диффузионного смешивания одновременно.

В третьей главе представлено математическое описание сложного многофакторного процесса смешивания, основанного на применении математических методов планирования экспериментов, позволяет получить аналитические распределения компонентов смеси. В общем случае объект исследования можно представить в виде структурной схемы, показанной на рисунке 2.

Физико-механические факторы: Φ_1 – размер частиц, смешиваемых ингредиентов; Φ_2 – удельный вес препаратов и наполнителя; Φ_3 – сыпучесть препаратов и наполнителя; Φ_4 – концентрация контрольного компонента в смеси.

Технологические факторы: T_1 – время смешивания; T_2 – скорость вращения вала ротора; T_3 – окружная скорость концов лопастей; T_4 – удельные затраты энергии.

Конструктивные факторы: K_1 – количество лопастей; K_2 – угол наклона лопастей; K_3 – емкость ванны смесителя; K_4 – отношение L/D (длины лопасти к диаметру емкости смесителя); K_5 – ширина лопастей.

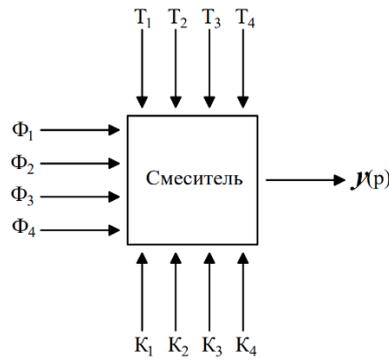


Рисунок 2 – Структурная схема связей физико-механических, технологических и конструктивных факторов, влияющих на процесс смешивания

Представление объекта в виде такой схемы основано на принципе «черного ящика». Имеем следующие группы параметров:

- 1) управляющие (входные) Φ_i , K_i и T_i , которые называются факторами;
- 2) выходной параметр y , параметр оптимизации (однородность);

Каждый фактор Φ_i , K_i и T_i имеет область определения, которая должна быть установлена до проведения эксперимента.

Комбинацию факторов можно представить как точку в многомерном пространстве, характеризующую состояние системы.

На практике целью многофакторного эксперимента является установление зависимости $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$, описывающей поведение процесса смешивания.

По результатам анализа, выявлены следующие факторы, существенным образом влияющие на параметр оптимизации (y), формула может быть представлена в таком виде:

$$y = f\left(P; \frac{Y_K}{Y_H}; \frac{d_H}{d_K}; C\right), \quad (13)$$

где y – параметр оптимизации – однородность смеси, %; P – концентрация ключевого компонента, %; $\frac{Y_K}{Y_H}$ – соотношение удельных весов контрольного компонента и наполнителя; $\frac{d_H}{d_K}$ – соотношение размеров частиц наполнителя и контрольного компонента; C – сыпучесть наполнителя; $C = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$.

Однородность смеси в основном зависит от указанных выше факторов. Известны и другие менее значимые факторы: парусность смешиваемых компонентов, коэффициенты их внешнего и внутреннего трения, удельные затраты энергии, которые для упрощения решения задачи не учитываются.

Комбинацию факторов можно представить как точку в многомерном пространстве, характеризующую состояние системы, тогда она примет вид полинома (многочлена):

$$y = b_0 \sum_1^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_1^k b_{ji} x_i^2 \quad (14)$$

где y – расчетное значение параметра оптимизации; b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ji} – коэффициенты регрессии; x_i и x_j интервалы варьирования, выбираются из

данных, приведенных в условиях матрицы, интервал варьирования факторов выбирается с учетом условий приготовления смесей лечебных кормов.

Составляем матрицу планирования эксперимента (таблица 1), которая представляет собой таблицу дискретных величин и факторов.

Таблица 1 – Матрица планирования эксперимента

	код	Р	$\frac{\gamma_k}{\gamma_n}$	$\frac{d_n}{d_k}$	С	Степень неоднородности смеси	
		X1	X2	X3	X4	\bar{y}	\hat{y}
Верхний уровень	+1	2,2	4	13	0,33	>12,2	12,95
Нулевой	0	1,5	2,5	7	0,24	>5,04	6,54
Нижний	-1	0,8	1	1	0,15	>7,33	6,72
Интервал варьирования		0,7	1,5	6	0,09		

Данные таблицы показывают возможность для разработки нового способа и смесителя, обеспечивающего заданную однородность лечебных кормов (не менее 95...98 %).

Смешивание в смесителе с цилиндрическим вертикальным корпусом и плоскими лопастями, установленными под углом 45° к оси вала, осуществляется следующим образом. Под действием вращающихся наклонных лопастей материально-воздушный поток перемещается по вертикальной цилиндрической поверхности корпуса смесителя и скапливается в ее верхней части, а под действием вакуума, который образуется при вращении лопастей по оси корпуса и гравитационных сил, поступает на лопасти и процесс повторяется.

Образуется замкнутый материально-воздушный поток в виде воронки, в котором непрерывно повторяется один и тот же установившийся процесс конвективного смешивания и разделения (сегрегации) соответствующей смеси, где частицы по удельному весу, форме, размерам и другим особенностям смешиваемых компонентов потока в поле аэродинамических, гравитационных и центробежных сил приобретают устойчивую скорость и траекторию движения. При этом созданы равные условия для смешивания и разделения (рисунок 3).

Протекание процесса смешивания препаратов с наполнителем в смесителе с вертикальным цилиндрическим и сферическим корпусами:

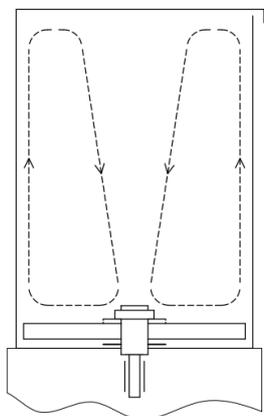


Рисунок 3 – Конвективный способ смешивания

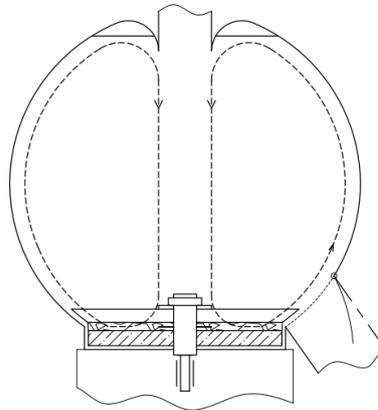


Рисунок 4 – Конвективный и диффузионный способ смешивания

Диффузионное смешивание осуществляется способом взаимного внедрения компонентов при совместном смятии, в результате из двух гетерогенных компонентов образуется гомогенный продукт – вещества находятся в одном агрегатном состоянии и при последующем смешивании не разделяются, оно представляется как процесс взаимного проникновения молекул одного вещества между молекулами другого, что приводит к выравниванию их концентрации по всему занимаемому объему. При этом происходит перенос вещества с мест высокой концентрации в места низкой концентрации и наоборот. Атомы соприкасающихся материалов перемешиваются на границе соприкосновения рабочих органов (рисунок 4).

Таблица 2 – Скорость витания материалов

Наименование материала	Скорость витания, м/с
Горох шлифованный	14,7...15,5
Крахмал	1,5...1,8
Крупа манная	3,2...4,5
Комбикорм мелкий сухой	3,5...3,9
Просо	8,2...9,5
Соль мелкая (до 1 мм)	9,8...12

Скорость потока, при которой частица находится во взвешенном состоянии или в состоянии безразличного равновесия, называется скоростью витания (v_s).

Сила действия движущегося воздуха может быть определена из выражения:

$$P=k \cdot A \cdot \rho_a \cdot v_s^2 \quad (15)$$

где k – безразмерный коэффициент пропорциональности; F – площадь миделевого сечения частицы, m^2 ; ρ_a – плотность воздуха, kg/m^3 ; v_s – скорость витания, m/s .

В свою очередь скорость витания равна:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{k \cdot F \cdot \rho_a}} \quad (16)$$

Из таблицы 3 видно, что коэффициент вариации однородности смеси возрастал с увеличением размера частиц и времени смешивания. Из этого следует, что помол премикса, добавляемого в комбикорм, должен быть максимально однородным.

Таблица 3 – Влияние размера частиц на эффективность смешивания

Средний размер частиц комбикорма, мкм (микрон)	Время смешивания, мин		
	0,5	1,5	3,0
	Коэффициент вариации, %		
<699	35,1	8,3	8,8
100...899	43,1	10,3	8,7
>900	50,1	14,3	11,6

Однородность смеси (коэффициент вариации) зависит от уровня загрузки ванны смесителя. Перегрузка, даже на 20 %, приводит к снижению качества смеси.

Таблица 4 – Влияние заполнения смесителя и времени смешивания на коэффициент вариации однородности смеси

Заполненный объем, %	Время смешивания, мин	Коэффициент вариации, %	
		лизин	метионин
100	2,0	11,99	34,61
100	2,5	8,33	4,99
100	3,0	4,64	2,59
120	2,0	56,18	34,88
120	2,5	62,58	31,37
120	3,0	33,96	29,80

Коэффициент вариации (V_c) распределения компонентов в выборках (M_b) зависит от уровня его ввода в смесь, его плотности и размера частиц.

Результаты опытов по смешиванию сыпучих кормов показывают (рисунок 5), что небольшая однородность смеси достигается в режиме псевдооживления.

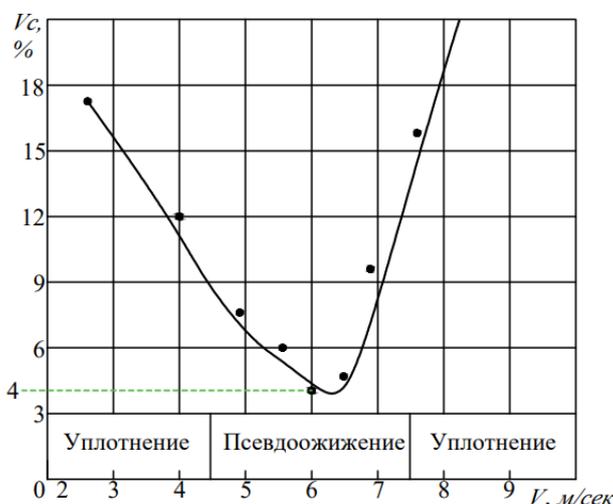


Рисунок 5 – Качество смешивания сыпучих кормов при различных физических состояниях

Из таблицы 5 видно (столбец 6 и 7), что коэффициент вариации менее 5 % в выборках 20 г распределен смесителем только один компонент ($MnCO_3$), а в выборках 150 г уже четыре компонента. Сравнивая значения столбцов 6 и 7 можно отметить, что с увеличением выборок коэффициент V_c снижается.

Размеры частиц солей микроэлементов, используемых в комбикормовом производстве, варьируют в широких пределах – от пылевидных, способных витать в воздухе, до аномально крупных (1,2 мм), ограниченных лишь требованиями ГОСТ 52356-2005 «Премиксы. Номенклатура показателей», что не противоречит действующим нормативным документам.

Если размер компонентов не соответствует нормативам (ГОСТ), то для цыплят-бройлеров, норма комбикорма 20 г в сутки, может не попасть нужный элемент, а если в эти 20 г корма попадает лишь одна частичка размером 1,2 мм, то будет перекорм. Применяемые компоненты являются солями тяжелых металлов. Они обладают высокой токсичностью для живых организмов, даже при невысоких превышениях допустимых норм, а также способствуют биоаккумуляции их в организме.

Таблица 5 – Коэффициенты вариации распределения компонентов в зависимости от содержания микроэлементов в корме от плотности, размеров частиц компонентов, от веса выборки

Микро-элемент	Нормы содержания микроэлемента в комбикорме, г/т	Компонент-носитель микроэлемента	Плотность частиц компонента, г/см ³	Средний размер частиц компонента, мк	Коэффициенты вариации (Vc) распределения компонента в выборках, %	
					Mв=20 г	Mв=150 г
1	2	3	4	5	6	7
Zn	70,0	<i>ZnSO₄•7H₂O</i>	3,740	320	10,2	3,7
Zn	70,0	<i>ZnCO₃</i>	4,440	360	21,2	7,7
Zn	70,0	<i>ZnO</i>	5,700	210	11,9	4,4
Co	1,0	<i>CoSO₄•7H₂O</i>	1,948	800	232,5	84,9
Co	1,0	<i>CoCO₃</i>	4,130	560	292,6	106,9
Co	1,0	<i>CoCl₂•6H₂O</i>	1,924	1130	424,6	155,0
Mn	100,0	<i>MnSO₄•5H₂O</i>	2,950	280	6,1	2,2
Mn	100,0	<i>MnCO₃</i>	3,125	120	2,5	0,9
Cu	2,5	<i>CuSO₄•5H₂O</i>	2,290	640	122,1	44,6
Cu	2,5	<i>CuCO₃</i>	4,000	100	15,2	5,6
J	0,7	<i>KJ</i>	3,140	620	459,4	167,7
Se	0,2	<i>Na₂SeO₃</i> (измельченный)	3,070	320	244,0	89,1
Se	0,2	<i>Na₂SeO₃</i> (измельченный)	3,070	780	928,4	339,0

Качество смешивания комбикормов определяется следующими показателями: уровнем ввода компонентов в смесь, коэффициентом вариации (Vc) – от 2 до 5 %, с которыми эти 10 г должны быть распределены смесителем и весом выборки – Mв=20-150 г. При производстве комбикормов, содержание в них витаминов К3, В1, В2, В6 в 1т не достигают и 10 г, а таких микроэлементов, как фолиевая кислота, витамин В12, биотин, селенит натрия, соли кобальта и йода не превышают 1 г. Эти биологически активные вещества важны, они обеспечивают состояние здоровья, рост продуктивности животных и птицы. На современных комбикормовых заводах в качестве индикаторов применяют ферромагнитные микротрейсеры (МТ).

Микротрейсеры надежные и безопасные добавки премиксов используются для поддержания здоровья животных; для оценки качества смешивания. Микротрейсеры добавляют в микроколичествах, результаты их легко воспроизводимы; они не токсичны, дешевы, не изменяют цвет премиксов. Микротрейсеры содержат частицы железа, нержавеющей стали, покрытые слоем пищевых красителей. Количество МТ добавляемых в комбикорм - от 5 до 50 г/т для проверки качества перемешивания. Разрешенное содержание железа в кормах – до 100 г/т, пищевого красителя в МТ до 2%, т.е. до 2 г/т. Число частиц на грамм: микротрейсеры FS:50 000 частиц на гр., микротрейсеры RF: более 1 000 000 частиц на грамм.

Для оценки однородности распределения частиц контрольного компонента используем формулу:

$$V_c = \frac{100}{B_0} \sqrt{\frac{\sum(B_i - B_0)^2}{n-1}} \%, \quad (17)$$

где B_i – фактическое содержание контрольного компонента в пробе, кг (шт.);
 B_0 – расчетное содержание контрольного компонента в пробе, кг (шт).

Оценка определяется из 10...20 проб весом 60...70 г. Исходя из эффективности скармливания комбикормов различной степени однородности, технических возможностей в нашей стране установлены допустимые пределы однородности смешивания. Так, для поросят в возрасте до 4 месяцев $V_c < 7\%$, свиней старше 4 месяцев $V_c < 10-15\%$, для птицы $V_c < 10\%$, для КРС $V_c < 12-16\%$.

Рассмотрим энергетику смешиваемых частиц на горизонтальной вращающейся лопасти (точка А), на вогнутой (кривизне) сферической поверхности (точка В), и на вертикальном участке корпуса смесителя (точка С) (рисунок 7).

При рассмотрении движения отдельной твердой частицы, находящейся на рабочей поверхности треугольной лопасти смесителя (рисунок 7, точка А) приняты следующие допущения: частицы считаем шарообразными и изолированными одна от другой, не учитываем скорость турбулентного воздушного потока, создаваемого ротором в сферическом объеме и не учитываем движение частиц по оси u .

Движение единичной рассматриваемой частицы описывается уравнением:

$$m \frac{dv}{dt} = \sum_i F_i, \quad (18)$$

где m – масса частицы; $\frac{dv}{dt}$ – ускорение частицы; $\sum_i F_i$ – равнодействующая сила, приложенная к частице m .

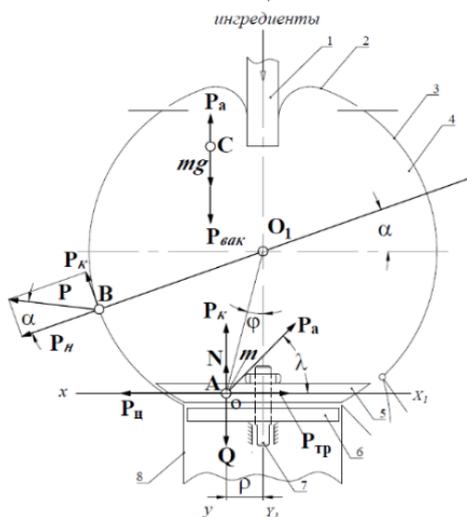


Рисунок 7 – Схема приложения сил на частицу m , расположенную на лопасти, шарового смесителя (точка А), на сферической поверхности (точка В) и на вертикальном участке (точка С), где 1 – загрузочный шлюз; 2 – направляющий обтекатель; 3 – шаровой корпус смесителя; 4 – сферический объем смесителя; 5 – двухсторонняя лопасть; 6 – рабочий диск; 7 – вал привода лопастей; 8 – рама смесителя

Для составления уравнения движения частицы принимаем переносную систему координат $X_1O_1Y_1$, которую свяжем с вращательным движением лопасти и относительную систему xoy , которой обозначаем движение частицы относительно рабочей поверхности лопасти. Используя схему сил (рисунки 7 и 8) дифференцируемое уравнение движения частицы m в принятых системах координат имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dV_{отн}}{dt} &= m\omega^2\rho \cdot \cos\varphi - P_{тр} - CF \frac{V^2}{2g} \sin\lambda, \\ 0 &= N + m\omega^2\rho \cdot \sin\varphi - 2m\omega V_{отн} - CF \frac{V^2}{2g} \cos\lambda, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

или

$$N = 2m\omega V_{отн} + CF \frac{V^2}{2g} \cos\lambda - m\omega^2\rho \cdot \sin\varphi; \quad (20)$$

при этом $P_{тр} = N \cdot f$, тогда

$$m \frac{dV_{отн}}{dt} = m\omega^2\rho \cdot \cos\varphi - f \left(2m\omega V_{отн} + CF \frac{V^2}{2g} \gamma_B \cos\lambda - m\omega^2\rho \cdot \sin\varphi \right) - CF \frac{V^2}{2g} \gamma \sin\lambda \quad (21)$$

где ω – угловая скорость; $V_{отн}$ – скорость движения частицы по рабочей поверхности лопасти; f – коэффициент трения частицы смеси по стали; F – проекция частицы по направлению ее движения (миделево сечение тела) γ_B – удельный вес воздуха; g – ускорение силы тяжести; C – коэффициент аэродинамического сопротивления, который зависит от формы, размера тела и является функцией критерия Рейнольдса (Re).

Процесс смешивания в смесителе со сферическим корпусом осуществляется следующим образом. Вращающиеся лопасти образуют и выбрасывают материально-воздушный поток на нижнюю вогнутую сферическую поверхность корпуса смесителя, с усилием P , (рисунок 7, точка В), где оно распределяется на нормальное – $P_n = m\omega^2\rho \cos\alpha$, которое достигает максимального значения на уровне 90° и касательное $P_{кас.} = m\omega^2\rho \sin\alpha$ на этом уровне равно нулю, где α – угол падения, образованный горизонтальной осью сферы и радиусом с центра сферы к точке В (рисунок 7).

В верхней полусфере обрабатываемый поток перемещается к вершине сферы, где направляющий обтекатель – он же составляет вершину сферы, изменяет траекторию движения потока снизу-вверх на обратное: сверху-вниз (рисунок 7, точка С). Каждая частица m в составе воздушного потока под влиянием силы тяжести mg , воздушного потока (P_λ) и силы вакуума ($P_{вак.}$) с различной скоростью устремляются вниз к оси вала привода лопастей; поступает на лопасти и процесс повторяется. Известно, что максимальный вакуум образуется у вертикальной оси сферической камеры, а максимальное давление на внутренней поверхности сферы. Нейтральная линия – линия разграничения вакуума от

давления, которая параллельна меридиане сферы и находится на расстоянии $\frac{2}{3} R_{сф.}$ от вертикальной оси (рисунок 8).

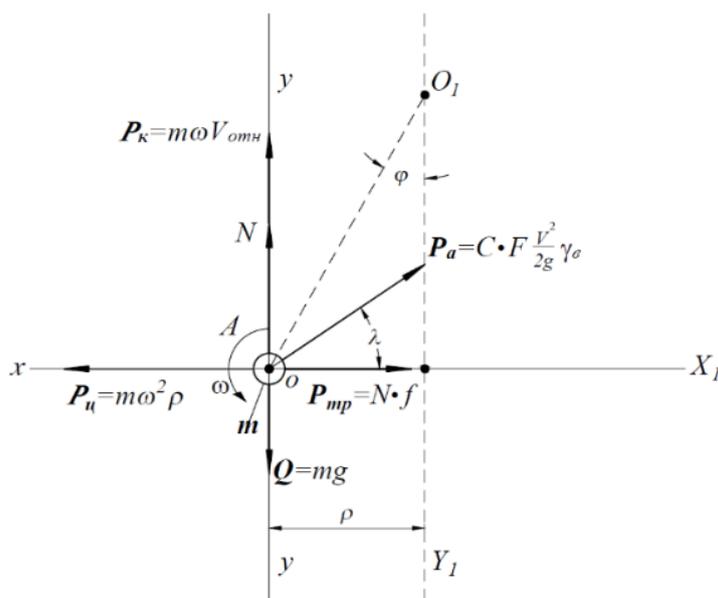


Рисунок 8 – Переносная система координат $X_1O_1Y_1$ и относительная xoy и формулы для расчета сил, приложенных к частице m , расположенную на лопасти, где $P_{ц}$ – центробежная сила; P_a – аэродинамическая сила; $P_{к}$ – сила Кориолиса; $P_{тр}$ – сила трения по поверхности лопасти; N – сила реакции; Q – сила тяжести частицы m

По результатам расчета построен график (рисунок 9), из которого видно, что материальные частицы различных размеров и плотности перемещаются по стальной рабочей поверхности вращающейся лопасти с разной скоростью и, как следовало ожидать, доминирующей для крупных и плотных частиц является центробежная сила ($P_{ц}$) для мелких легких – аэродинамическая (P_a). Скорость движения крупных частиц в центробежном силовом поле больше, чем мелких. В материально-воздушном потоке они сортируются, постоянно соударяются, при этом происходит обмен скоростями: меньшие частицы ускоряются, а большие – замедляются. Происходит постоянная миграция частиц и процесс конвективного смешивания.

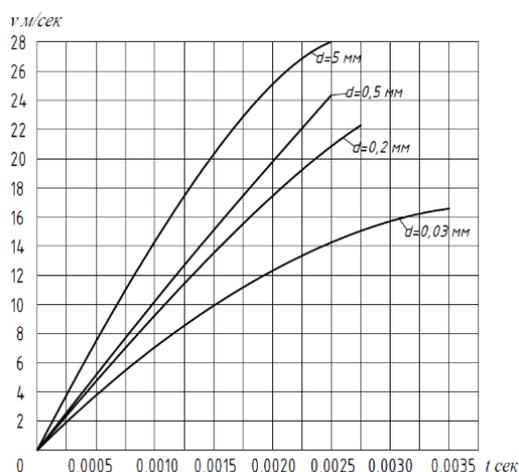


Рисунок 9 – Скорость перемещения частиц различных размеров по рабочей поверхности лопасти

Кинетика (траектория, вектор, скорость) движения отдельных частиц с различными физико-механическими свойствами материально-воздушного потока в объеме сферической камеры в большой степени зависит также от величины приложенной к ним силы Кориолиса (P_k). Под влиянием этой силы частицы потока перемещаются снизу-вверх под различным углом к линии меридиана сферы, с разной скоростью и вектором движения. Таким образом в объеме сферической камеры образуется многообразная кинетика перемещения, взаимное проникновение смешиваемых компонентов, что является условием оптимального процесса конвективного смешивания.

Таким образом, на сферической поверхности создаются благоприятные условия пересекающихся траекторий движения легких и тяжелых материалов в поле действия аэродинамических, гравитационных, центробежных и сил Кориолиса.

В четвертой главе предложена концепция мобильной линии по производству лечебных кормов, витаминных и минеральных добавок для обслуживания небольших хозяйств, ферм не имеющих технического оснащения, которое обеспечивало бы необходимую однородность кормовых смесей при использовании лекарственных препаратов, минеральных и витаминных добавок.

Мобильная установка позволяет обеспечить возможность производить лечебные корма и премиксы с использованием биологически активных добавок с высокой степенью однородности (95...98 %) с использованием в качестве наполнителя (агента)кормовую базу хозяйства. А также обеспечит лекарственными смесями хозяйства в условиях отсутствия дорог или дорог с низкой категорией качества дорожного покрытия.

Мобильная установка представляет собой подвижной состав специализированного назначения, снаряженный всем необходимым оборудованием для выполнения технологического процесса.

Установка по приготовлению гомогенной смеси (рисунок 11) смонтирована на базе автомобиля ГАЗ - ГАЗель Next и размещена внутри кузова. В комплект установки входят: два смесителя, весы технологические, мельница для размолва компонентов, загрузочное и разгрузочное средства, силовой электрощит, штыковое заземление, соединительный кабель.

Технические характеристики: Средняя производительность лечебного корма в час, 600-800 кг; привод: электропривод; суммарная мощность электродвигателей, кВт: 4,7. Мобильная установка для приготовления лечебных кормов и может применяться как на отгонных пастбищах, так и на фермах и комплексах любых размеров и во всех зонах России.

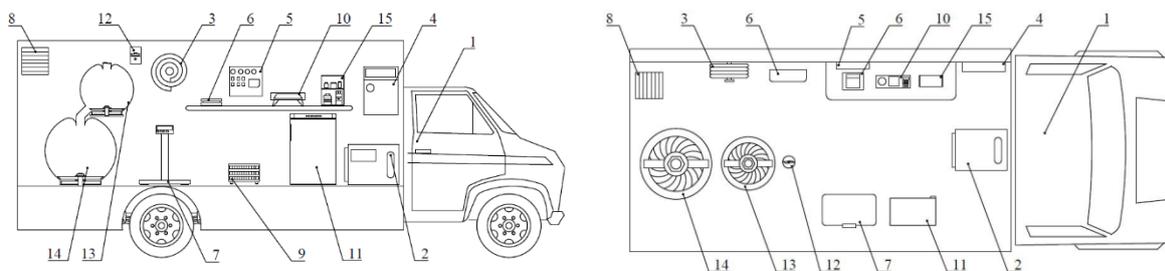


Рисунок 11 – Мобильная установка по приготовления лечебных кормов, витаминных и минеральных премиксов. 1 - мобильная установка; 2 - электрогенератор; 3 - переносной силовой кабель; 4 - силовой щит; 5 - панель управления; 6 - лабораторные весы; 7 - платформенные весы; 8 - приточно-вытяжная система вентиляции; 9 - электрокалорифер; 10 - прибор по определению однородности смеси; 11 - холодильник; 12 - лабораторная мельница для приготовления первичных премиксов; 13 - измельчитель-смеситель со сферической камерой для приготовления вторичных премиксов; 14 - шаровой смеситель для приготовления смеси лечебных кормов и премиксов; 15 - шкаф для хранения лечебных препаратов

Процесс приготовления лечебных кормов двухстадийный: вначале готовят рабочий премикс (лекарственный препарат и наполнитель) и далее лечебный корм (рабочий премикс с наполнителем). В качестве наполнителя используют измельченные концентрированные корма – дерть, комбикормы.

Лекарственный препарат и наполнитель в нужном соотношении взвешивают и поочередно измельчают на измельчителе до мелкодисперсного состояния и загружают в малый смеситель, где в результате псевдооживления материалов в течении 2...3 минут достигается необходимая однородность 95...98 %.

Далее, в зависимости от заданного рецепта лечебного корма, отвешивается необходимое количество рабочего премикса и наполнителя, которые затем перемешиваются во смесителе. Готовую кормолекарственную смесь выгружают в тару. За один цикл работы можно приготовить около 50 кг лечебного корма.

Предложенная концепции работы мобильной установки по приготовлению лечебных кормов для животноводства и птицеводства, позволит получить прибыль свыше 23 млн рублей в ценах 2022 года, при условии обслуживании поголовья 3000 голов крупного рогатого скота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа существующих способов работы смесителей показал, что наилучшими характеристиками обладают смесители работающие по принципу механического псевдооживления.

2. Процесс смешивания сыпучих кормов можно интенсифицировать, если перевести перемешиваемый слой материала в псевдооживленное состояние, характеризующееся увеличением подвижности материала, обеспечиваемое механическим воздействием наклонной лопасти на сыпучую среду. Усовершенствована методика определения параметров, характеризующих миграционную способность мелких частиц различной плотности в диапазоне крупности от 1,0 до

0,001 мм под действием воздушного потока, позволяющая определить условия эффективности разделения смеси по крупности и плотности, определяемые состоянием равновесия частицы на наклонной поверхности и зависящее от скорости потока и угла наклона лопастей смесителя.

3. Разработана математическая модель и усовершенствована методика расчета смесителей, работающих по принципу механического псевдооживления с выявлением особенностей перемещения частиц разной крупности и плотности в воздушно-материальных потоках при скоростях менее их скорости витания в шаровом корпусе смесителя и при скоростях псевдооживленного слоя в виде воздушно-материальной смеси и их активного взаимодействия, что позволяет предложить новую конструкцию смесителей. Установлено, что наиболее эффективные условия смешивания материалов различных размеров частиц и плотности достигается в воздушно-материальном потоке с обеспечением пересекающихся траекторий легких и тяжелых частиц в поле гравитационных, центробежных и аэродинамических сил.

4. Определено что минимальная неоднородность достигается в интервале варьирования соотношения удельных весов компонентов γ_n/γ_k от 1 до 1,7 при сыпучести наполнителя с в диапазоне от 0,16 до 0,15. Высота корпуса должна быть больше на 30 % по сравнению с высотой слоя материала, оптимальное количество ярусов z составляет от 1 до 3, при количестве лопастей в ярусе равном двум и размахе лопастей, составляющем 85...95 % от диаметра корпуса, обеспечивающей рабочую окружную скорость лопастей на 20 % выше критической скорости псевдооживления. Определено, что для перехода среды в псевдооживленное состояние и увеличения степени разрыхления слоя необходимо, чтобы осевой поток материала через лопасть был максимальным и для выполнения указанного условия угол наклона лопасти смесителя должен составлять $\alpha = 45^\circ$.

5. Определено оптимальное значение окружной скорости лопасти 4...4,5 м/с при которой происходит также резкое увеличение объема слоя с переходом сыпучей среды в псевдооживленное состояние, сходное с тем, которое получается при продувке газа через слой, а также предельное значение скорости на уроне 7...8 м/с при достижении которой происходит резкое увеличение внутреннего и внешнего трения и потребной мощности. Выполнение измельчителя-смесителя и смесителя линии приготовления лечебных кормов в форме шара, внутри которого устанавливаются сферические экраны, разделяющие его объем на зоны повышенного давления и вакуума с формированием посредством вращающихся лопастей целенаправленного устойчивого потока материально-воздушной смеси по вогнутым поверхностям сферы в зонах диффузионного и конвективного смешивания позволяет повысить однородность смеси лечебных кормов до 95...98 %.

6. Приготовление кормолекарственной смеси в турбулентном потоке, реализованное на базе мобильной установки, оборудованной конструктивно про-

стой и технологичной линией смешивания, может обеспечить своевременную подготовку смеси высокой однородности, т.е. с коэффициентом вариации находящегося в пределах $2\% < V_c < 1\%$. для животноводства и птицеводства во всех регионах страны, при этом время смешивания и удельные затраты энергии ниже в 2 раза в сравнении с традиционными способами производства смесей. Анализ предложенной концепции работы мобильной установки по приготовлению лечебных кормов для животноводства и птицеводства, позволит получить прибыль свыше 23 млн рублей в ценах 2022 года, при условии обслуживании поголовья 3000 голов крупного рогатого скота.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Обухов, А. Д. Модульная установка для производства лечебных комбикормов и премиксов в хозяйствах / В. И. Сыроватка, О. Н. Дидманидзе, Е.П. Парлюк, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2021. – № 1(61). – С. 96-103.
2. Обухов, А. Д. Совершенствование способов и технических средств приготовления лечебных комбикормов и рабочих премиксов / А. Д. Обухов // Техника и технологии в животноводстве. – 2021. – № 1(41). – С. 59-65.
3. Обухов, А. Д. Обоснование конструктивных параметров и режимов работы сферического смесителя / А. Д. Обухов // Техника и технологии в животноводстве. – 2021. – №3(43). – С. 48-53.
4. Обухов, А. Д. Система машин для приготовления комбикормов в хозяйствах Сыроватка В. И., Обухов А. Д., Жданова Н. В. // Техника и технологии в животноводстве. – 2020. – № 1(37). – С. 24-31.
5. Обухов, А. Д. Исследование способов и устройств производства однородных смесей лечебных комбикормов / В. И. Сыроватка, А. Д. Обухов, Н. В. Жданова // Техника и технологии в животноводстве. – 2020. – № 2(38). – С. 32-40.
6. Обухов, А. Д. Производительность установки фракционного измельчения и производства смесей концентрированных и лечебных кормов / В. И. Сыроватка, А. Д. Обухов, Н. В. Жданова // Достижения науки и техники АПК. – 2018. – № 12. – С. 101-104.
7. Обухов, А. Д. Автоматические установки для производства комбикормов в хозяйствах / В. И. Сыроватка, А. Д. Обухов, Н. В. Жданова, А. С. Дорохов // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. – 2020. – № 2. – С. 66-70.
8. Обухов, А. Д. Научные основы процесса смешивания лечебных препаратов, витаминных и минеральных добавок с наполнителем в технологии производства комбикормов / В. И. Сыроватка, О. Н. Дидманидзе, А. Д. Обухов, Н. В. Жданова // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. – 2020. – № 3. – С. 7-16.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных

9. Обухов, А. Д. Исследование кинетики движения ингредиентов лечебных кормов в шаровом смесителе / А. Д. Обухов // Российская сельскохозяйственная наука. – 2021. – № 2. – С. 59-63.
10. Обухов, А. Д. Установка для повышения однородности смешивания лечебных кормов и премиксов / В. И. Сыроватка, А. Д. Обухов, Н. В. Жданова // Российская сельскохозяйственная наука. – 2018. – № 6. – С. 62-64.
11. Обухов, А. Д. Сублимация рыбопродуктов в условиях Арктики при производстве кормов для сельскохозяйственных животных / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов [и др.] // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31. – № 2. – С. 274-290.
12. Обухов, А. Д. Способ производства высоковитаминной травяной муки / В. И. Сыроватка, А. Д. Обухов // Техника и оборудование для села. – 2017. – № 9. – С. 12-14.

Патенты

13. Патент № 2757721 С1 Российская Федерация, МПК А23N 17/00. Мобильная установка для приготовления смеси лечебных комбикормов и премиксов в турбулентном потоке : № 2021109901 : заявл. 09.04.2021 : опубл. 21.10.2021 / В. И. Сыроватка, О. Н. Дидманидзе, А. С. Дорохов, Е. П. Парлюк, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов.
14. Патент № 2763455 С1 Российская Федерация, МПК А23К 10/00, А23N 17/00. Способ приготовления смеси лечебных комбикормов и премиксов в турбулентном потоке :

№ 2021111176 : заявл. 20.04.2021 : опубл. 29.12.2021 / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов.

15. Патент № 2711595 С1 Российская Федерация, МПК А23N 17/00. Установка производства фракционных смесей концентрированных кормов : № 2019107021 : заявл. 13.03.2019 : опубл. 17.01.2020 / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов, Н. С. Сергеев.

16. Патент № 2713331 С1 Российская Федерация, МПК А23К 10/00, А23N 17/00. Способ производства фракционных смесей концентрированных кормов : № 2019108765 : заявл. 17.04.2019 : опубл. 04.02.2020 / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов, Н. П. Мишуров.

17. Патент № 2728320 С1 Российская Федерация, МПК А23N 17/00, А23К 40/10. Способ смешивания лечебных препаратов, витаминных и минеральных добавок с наполнителем : № 2020108044 : заявл. 25.02.2020 : опубл. 29.07.2020 / В. И. Сыроватка, А. С. Дорохов, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов.

18. Патент № 2730651 С1 Российская Федерация, МПК А23N 17/00. Линия приготовления лечебных кормов : № 2020108001 : заявл. 25.02.2020 : опубл. 24.08.2020 / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов.

19. Патент № 2730652 С1 Российская Федерация, МПК А23N 17/00. Установка смешивания лечебных препаратов, витаминных и минеральных добавок с наполнителем : № 2020108048 : заявл. 25.02.2020 : опубл. 24.08.2020 / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов.

20. Патент № 2737404 С1 Российская Федерация, МПК А23К 10/00, А23N 17/00. Способ приготовления лечебных кормов в шаровом смесителе : № 2020111837 : заявл. 23.03.2020 : опубл. 30.11.2020 / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов.

21. Патент № 2737405 С1 Российская Федерация, МПК А23N 17/00. Шаровой смеситель для приготовления лечебных кормов : № 2020111840 : заявл. 23.03.2020 : опубл. 30.11.2020 / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов.

22. Патент № 2737422 С1 Российская Федерация, МПК А23К 10/00, А23N 17/00. Способ приготовления лечебных кормов : № 2020111512 : заявл. 19.03.2020 : опубл. 30.11.2020 / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов.

23. Патент № 2677798 С1 Российская Федерация, МПК А23N 17/00. Установка фракционного измельчения и производства смесей концентрированных кормов : № 2018110718 : заявл. 26.03.2018 : опубл. 21.01.2019 / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов.

24. Патент № 2687138 С2 Российская Федерация, МПК А23N 17/00. Линия производства различных видов комбикормов : № 2017123468 : заявл. 03.07.2017 : опубл. 07.05.2019 / В. И. Сыроватка, А. Д. Обухов, Т. С. Комарчук.

25. Патент № 2687139 С2 Российская Федерация, МПК А23N 17/00. Способ баротермической обработки комбикормов в псевдооживленном слое : № 2017137692 : заявл. 27.10.2017 : опубл. 07.05.2019 / В. И. Сыроватка, А. Д. Обухов, Т. С. Комарчук.

26. Патент № 2703196 С1 Российская Федерация, МПК А23N 17/00. Установка для приготовления гомогенной смеси лечебных кормов, витаминных термолабильных и минеральных премиксов : № 2019110236 : заявл. 08.04.2019 : опубл. 15.10.2019 / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов.

27. Патент № 2706584 С1 Российская Федерация, МПК А23К 10/30, А23К 40/10. Способ приготовления гомогенной смеси лечебных кормов, витаминных термолабильных и минеральных премиксов : № 2019110097 : заявл. 05.04.2019 : опубл. 19.11.2019 / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Д. Обухов.

28. Патент № 2707042 С2 Российская Федерация, МПК А23К 40/10, А23N 17/00. Способ производства лечебных кормов : № 2018102652 : заявл. 23.01.2018 : опубл. 21.11.2019 / В. И. Сыроватка, А. Д. Обухов, Н. В. Жданова.