

На правах рукописи



КОТОВ РОМАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННОГО СМЕСИТЕЛЯ
СЫПУЧИХ КОРМОВ С ГИБКИМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул 2015

Работа выполнена на кафедре «Механизация животноводства» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный аграрный университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Федоренко Иван Ярославович
(ФГБОУ ВО Алтайский государственный аграрный университет, заведующий кафедрой «Механизация животноводства»)

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Сергеев Николай Степанович (ФГБОУ ВО Челябинская государственная агроинженерная академия, заведующий кафедрой «Технология и механизация животноводства»)

доктор технических наук, профессор
Фоминых Александр Васильевич (ФГБОУ ВО Курганская государственная сельскохозяйственная академия имени Т.С. Мальцева, заведующий кафедрой «Механизация технологических процессов»)

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина»

Защита диссертации состоится «26» июня 2015 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, проспект Ленина, 46. <http://www.altstu.ru>,
e-mail: ntsc@desert.secna.ru; elnis@inbox.ru; тел/факс 8(3852)36-71-29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АлтГТУ им. И.И. Ползунова и на сайте <http://www.altstu.ru/media/f/Dissertaciya-Kotov-RA.pdf>

Автореферат разослан «28» апреля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Куликова Лидия Васильевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Успешное развитие животноводства напрямую зависит от качества применяемых кормов, которые целесообразно использовать в виде кормовых смесей. Кормовые смеси состоят из большого количества питательных веществ, необходимых для получения максимального биологического, продуктивного и экономического эффекта от животных и птицы.

Сбалансированные кормовые смеси для крупного рогатого скота содержат до 10, для свиней до 15...20, а для птицы до 40...50 различных компонентов.

На основании литературного обзора было выявлено, что серийно выпускаемые смесители сыпучих кормов не обеспечивают установленной зоотехническими требованиями однородности смеси.

К крупнейшим достижениям отечественной науки, по мнению академика К.В. Фролова, можно отнести фундаментальные и прикладные разработки механики вибрационных машин, механизмов и технологий. Этот сравнительно молодой и быстро развивающийся раздел механики находит все более широкое практическое применение при обработке дисперсных систем в виброоживленном или виброкипящем слое, ускоряет процесс массообмена.

Обусловлено это тем, что при использовании вибрационных воздействий на обрабатываемый материал повышается производительность оборудования, снижаются удельные энергетические затраты, улучшается качество готовой продукции. Причем вибрационные эффекты поддаются быстрому регулированию путем изменения амплитуды и частоты вибрации, что способствует оптимизации основных технологических режимов в соответствии с высокими требованиями, предъявляемыми к качеству смеси.

Работа выполнялась по тематическому плану ФГБОУ ВО АГАУ, «Развитие теории вибрационных машин различного целевого назначения для разработки высокоэффективных технологических процессов в агропромышленном комплексе» (номер государственной регистрации №01201157189).

Цель исследования – повышение эффективности приготовления сыпучих кормовых смесей путем обоснования параметров вибрационного смесителя с гибким рабочим органом.

Объект исследования – технологический процесс вибросмешивания в машинах с гибким рабочим органом.

Предмет исследования - действующие факторы, связи и закономерности технологического процесса вибросмешивания в машинах с гибким рабочим органом.

Методы исследований - при теоретических исследованиях применяли методы гидродинамики, теоретической механики, теории подобия и размерности. При экспериментальном исследовании использовали методы планирования эксперимента и регрессионного анализа. При обработке результатов исследования – методы математической статистики совместно с программами MathCAD и EXCEL.

Научная гипотеза - заключается в том, что повышение эффективности приготовления сыпучих кормовых смесей, снижение динамической напряженности и шума вибрационного смесителя можно достичь путем использования гибкого рабочего органа.

Научная новизна. 1) Получены математические модели процессов, протекающих при вибрационном смешивании сыпучего материала;

2) Обоснованы конструктивно-режимные параметры вибрационного смесителя с гибким рабочим органом.

Новизна конструкторской разработки подтверждена патентом РФ на изобретение № 2421271.

Практическая ценность:

- разработана и предложена конструкция вибрационного смесителя с гибким рабочим органом, обеспечивающая получение качественной кормовой смеси, соответствующей требованиям ОСТ и зоотехническим рекомендациям;

- обоснованы параметры вибрационного смесителя, которые могут быть использованы конструкторскими организациями при разработке смесительного оборудования;

- разработаны исходные требования на разработку вибрационного смесителя сыпучих кормов.

На защиту выносятся:

- материалы исследований переданы ООО «Агромаштехсервис» для разработки проектной документации с последующим мелкосерийным производством вибрационного смесителя.

- теоретические зависимости вибрационных процессов, осуществляемых при смешивании сыпучих кормов;

- результаты экспериментальных исследований по обоснованию конструктивно-режимных параметров вибрационного смесителя.

Реализация результатов исследований:

- результаты проведенных исследований используются в учебном процессе Алтайского государственного аграрного университета при проведении практических и лабораторных работ по курсу «Технология и механизация животноводства»;

Апробация. Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены на следующих конференциях:

- XI городская научно – практическая конференция «Молодежь - Барнаул» (Барнаул, АлтГТУ им. Ползунова, 17 – 20 ноября 2009 г.);

- научно-техническая конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава АГАУ (Барнаул, АГАУ, 2011 г.);

- X Международная научно - техническая конференция «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (Барнаул, АГАУ, 4 – 5 февраля 2015 г.);

- I Региональная молодежная реферативно – практическая конференция «Теория и практика инновационного развития в представлениях нового поколения» (Барнаул, АГАУ, 18-19 февраля 2015 г.).

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 6 печатных работах, в том числе в 3 статьях в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК, а также получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, пять глав, общие выводы. Работа изложена на 131 страницах машинописного текста, содержит 40 рисунков, 14 таблиц и 8 приложений. Список использованной литературы включает 136 наименований, в том числе 6 на иностранных языках.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, ее цель, показаны объект и предмет исследований, раскрыты научная гипотеза, новизна и практическая ценность результатов работы.

В первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи исследования» изложены требования, предъявляемые к кормовым смесям, рассмотрены существующие конструкции смесителей вибрационного действия, представлена классификация этих машин, проведен анализ теоретических исследований по динамическому поведению сыпучей среды при вибрациях.

Исследованиям процесса смешивания сыпучих материалов под действием вибрации посвящены работы М.В. Баканова, И.Ф. Гончаревича, С.Е. Евсеенкова, А.П. Ивановой, В.А. Кузмичева, П.И. Леонтьева, Л.В. Межуевой, В.Н. Николаева, П.Ф. Овчинникова, А.А. Пасько, В.А. Пушко, У.К. Сабиева, Н.С. Сергеева, Н.Б. Урьева, И.Я. Федоренко, А.В. Фоминых и др.

Анализ существующих конструкций смесителей вибрационного действия, применяемых в производстве сыпучих кормовых смесей, а также теоретических исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Применяемые в настоящее время смесители не отвечают в полной мере предъявляемым к ним требованиям, поэтому возникает необходимость дальнейшего совершенствования в части снижения их энергоемкости, динамической напряженности и шума в работе;

2. Перспективным направлением в производстве сыпучих кормовых смесей является применение вибрации, которая позволяет интенсифицировать процесс смешивания;

3. Анализ теоретических исследований поведения сыпучей среды при вибрации показал, что для описания физической сущности процесса вибросмешивания необходимо выбрать модель в виде вязкой среды.

В соответствии с целью работы определены **задачи исследования:**

1. Проанализировать тенденции развития вибрационных смесителей и предложить пути их совершенствования;

2. Провести математическое описание и анализ процесса смешивания в вибрационном смесителе с гибким рабочим органом;

3. Выявить критерии подобия процесса вибросмешивания, являющиеся базой для расчетов и конструирования типоразмерного ряда вибрационных смесителей с гибким рабочим органом;

4. Обосновать конструктивно – режимные параметры вибрационного смесителя с гибким рабочим органом;

5. Оценить экономическую эффективность использования разработанного смесителя при приготовлении сыпучих кормовых смесей.

Во второй главе «Обоснование динамического режима вибросмешивания сыпучих кормов» рассмотрены и проанализированы закономерности процесса вибросмешивания, выявлены динамические факторы, вызывающие циркуляционные движения составляющих кормовой смеси, установлена связь качественных показателей процесса смешивания с диссипативным рассеянием энергии в виброкипящем слое.

Для рассмотрения движения частицы в камере смешивания предлагается следующий подход: частица – сплошная среда. Такой подход дает необходимую информацию о процессах движения частиц и элементов слоя сыпучего материала и их перемешивании.

Рассмотрим относительное движение частицы в виброкипящем слое смешиваемого материала (рисунок 1).

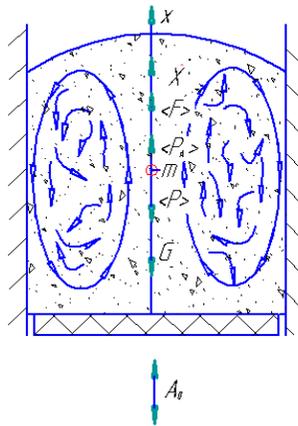


Рисунок 1 – Схема сил, действующих на частицу в виброкипящем слое ($\langle F \rangle, \langle P \rangle$ – усредненные за период колебаний силы сухого трения и аэродинамического сопротивления)

Нам следует учесть следующие силы, действующие на частицу:

- силу тяжести

$$G = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_r g, \quad (1)$$

где d - эквивалентный диаметр частицы;

ρ_r - плотность материала частицы;

g - ускорение свободного падения;

- силу Архимеда от воздействия окружающей частицы среды

$$P_A = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_c g, \quad (2)$$

где ρ_c - плотность среды, окружающей частицу;

- силу аэродинамического сопротивления от осциллирующего воздушного потока

$$P = \frac{1}{8} \pi c_v d^2 \dot{x} \text{sign}(\dot{x}), \quad (3)$$

- силу сухого трения, моделирующую взаимодействие частицы с другими частицами

$$F_{(x)} = \begin{cases} -F_+, & \text{при } \dot{x} > 0; \\ 0, & \text{при } \dot{x} = 0; \\ +F_-, & \text{при } \dot{x} < 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{причем } |F_-| > |F_+| \quad (5)$$

- переносную силу инерции, поскольку мы рассматриваем относительное движение

$$J = mA\omega^2 \cos \omega t, \quad (6)$$

где A - амплитуда колебаний среды в точке, совпадающей с центром нахождения частицы.

Дифференциальное уравнение относительного движения частицы запишем в виде:

$$m\ddot{x} = -P - F + P_A - G + J. \quad (7)$$

После преобразований получим уравнение в форме, соответствующей уравнению вынужденных колебаний:

$$\ddot{x} + \frac{F(\dot{x})}{m} + \beta \dot{x}^2 \text{sign} \dot{x} + g_1 = A\omega^2 \cos \omega t. \quad (8)$$

Уравнение (8) содержит два нелинейных члена $\frac{F(\dot{x})}{m}$ и $\beta \dot{x}^2 \text{sign} \dot{x}$. Для его решения использовали метод прямого разделения движений в форме, предложенном П.Л. Капицей и И.И. Блехманом:

$$x = X(t) + \zeta(\omega t), \quad (9)$$

где $X(t)$ - медленная составляющая;

$\zeta(\omega t)$ - быстрая составляющая.

Выделим уравнения медленного и быстрого вибрационного движения. Уравнение медленного движения примет вид:

$$\ddot{X} + \left\langle \frac{F(\dot{X} + \dot{\xi})}{m} \right\rangle + \left\langle \beta(\dot{X} + \dot{\xi})^2 \text{sign} \dot{x} \right\rangle + g_1 = 0, \quad (10)$$

где $\langle \dots \rangle$ - означает усреднение за период колебаний.

Уравнение быстрого движения И.И. Блехман рекомендует записывать в инерционном приближении, и не учитывать на этом этапе сопротивление:

$$\xi = A\omega^2 \cos \omega t, \quad (11)$$

Из работ Блехмана следует, что:

$$\left\langle \frac{F(\dot{X} + A\omega \sin \omega t)}{m} \right\rangle = -\frac{1}{\pi m} \left[(F_+ + F_-) \arccos \frac{\dot{X}}{A\omega} - F_+ \pi \right], \quad (12)$$

$$\text{при условии } |\dot{X}| \leq A\omega. \quad (13)$$

Знак силы трения изменился по сравнению с изначально предполагавшимся. Это означает, что за счет своей асимметрии сила сухого трения выталкивает частицу вверх. Механизм появления выталкивающей (подъемной) силы состоит в том, что при асимметрии сил сухого трения частица в течение некоторого времени за период колебаний будет перемещаться относительно среды вверх, когда действует сила F_+ . В течении второго полуцикла частица или остается на месте, или передвинется вниз на меньшее расстояние, чем при движении вверх. В осредненном движении сила трения превратилась, за счет ее асимметрии, из силы сопротивления в движущую силу.

Относительная скорость частицы в слое равна:

$$U = \dot{X} + A\omega \sin \omega t. \quad (14)$$

Отсюда можно заключить, что при $\dot{X} > A\omega$ характер движения частицы является пульсирующим, а при $\dot{X} < A\omega$ имеют место скольжение частицы относительно среды вверх и вниз. Интерес представляет именно второй тип движения.

В среднем за период колебаний аэродинамическое сопротивление на частицу составит:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} (\langle P_+ \rangle - \langle P_- \rangle) = \frac{\omega}{2\pi} (\langle P_+ \rangle - \langle P_- \rangle), \quad (15)$$

где T - период колебаний;

$\langle P_+ \rangle$ - среднее сопротивление за промежуток времени движения частицы вверх;

$\langle P_- \rangle$ - среднее сопротивление за промежуток времени движения частицы вниз.

$$\begin{aligned} \langle P_+ \rangle = & \frac{m\beta}{\omega(t_2 - t_1)} \cdot \left\{ \dot{X}^2 + 2\dot{X}A\omega(\cos \omega t_1 - \cos \omega t_2) + \right. \\ & \left. + A^2\omega^2 \cdot \left[\frac{\omega(t_2 - t_1)}{2} - \frac{(\sin \omega t_2 - \sin \omega t_1)(\cos \omega t_2 - \cos \omega t_1)}{2} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \langle P_- \rangle = & \frac{m\beta}{\omega(t_3 - t_2)} \cdot \left\{ \dot{X}^2 + 2\dot{X}A\omega(\cos \omega t_2 - \cos \omega t_3) + \right. \\ & \left. + A^2\omega^2 \cdot \left[\frac{\omega(t_3 - t_2)}{2} - \frac{(\sin \omega t_3 - \sin \omega t_2)(\cos \omega t_3 - \cos \omega t_2)}{2} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (17)$$

где t_1, t_2, t_3 - моменты времени.

Таким образом, уравнение медленного движения частицы в общем виде можно представить так:

$$\left\langle \frac{F}{m} \left(\frac{\dot{X}}{A\omega} \right) \right\rangle - \left\langle \beta \left(\frac{\dot{X}}{A\omega}, \dot{X}, A\omega \right) \right\rangle - g_1 = 0. \quad (18)$$

Поскольку величины A и ω известны, то из этого уравнения в принципе может быть единственная неизвестная величина \dot{X} - скорость всплывания частицы в виброкипящем слое материала. Эта скорость устанавливается такой, чтобы усредненные силы аэродинамического сопротивления, сухого трения, а также сила веса и сила Архимеда взаимно компенсировали друг друга.

Условие для перехода к циркуляционному движению составляющих сыпучей среды и началу смешивания принимает вид:

$$\left\langle \frac{F}{m} \right\rangle > \beta + g_1. \quad (19)$$

Оно означает, что выталкивающая сила должна преодолеть сопротивление частицы от действия воздушного потока и вес частицы (за вычетом архимедовых сил).

В соответствии с принятой гипотезой, движение виброкипящего слоя как сплошной среды будем описывать векторным уравнением Навье – Стокса:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)\vec{V} = -\frac{1}{\rho_c} \nabla P + \nu\Delta\vec{V} - \vec{W} + g_1, \quad (20)$$

где \vec{V} - вектор скорости виброкипящего слоя;

ρ_c - плотность среды слоя;

P - давление в слое;

W - ускорение от подъемной силы;

ν - коэффициент эффективной кинематической вязкости виброкипящего слоя;

∇ - (оператор «набла») символическая операция пространственного векторного дифференцирования;

Δ - оператор Лапласа, представляющий собой скалярный квадрат оператора «набла».

Запишем систему уравнений Навье – Стокса в скалярной форме:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial x_1} + w \frac{\partial u}{\partial x_2} &= -\frac{1}{\rho_c} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla u - W + g_1 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x_1} + w \frac{\partial v}{\partial x_2} &= -\frac{1}{\rho_c} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_1} + \nu \nabla v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial x_1} + w \frac{\partial w}{\partial x_2} &= -\frac{1}{\rho_c} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_2} + \nu \nabla w \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x_1} + \frac{\partial w}{\partial x_2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Аналитическое решение этого нелинейного уравнения с учетом циркуляционной, колебательной и хаотической составляющих представляется нереальным. Но если рассматривать усредненное движение (для этого величину W нужно трактовать как постоянную усредненную подъемную силу), то можно заметить аналогию в данных уравнениях и уравнениях тепловой конвекции в реальной жидкости. Действительно, эти уравнения отличаются лишь различным толкованием члена W . В нашем случае это подъемная сила, возникающая от действия сил сухого трения, в случае теплоконвекции – сила Архимеда (нагретые с нижней поверхности частицы жидкости становятся легче и всплывают). Поднимаясь вверх, частицы жидкости остывают и опускаются вниз. Причем устанавливаются (самоорганизуются) разные потоки жидкости вверх и вниз. Речь идет о знаменитых ячейках Бенара, описываемых во всех учебниках по синергетике.

В пространственном движении вязкой изотропной системы, как и в нашем случае, принимается обобщенный закон Ньютона, устанавливающий, в первом приближении линейную связь между тензором напряжения P и тензором скоростей деформации:

$$P = 2\mu \dot{S}, \quad (22)$$

где μ - динамический коэффициент вязкости слоя ($\mu = \nu\rho$).

Выражение для механической энергии, диссипированной в единице объема слоя и в единицу времени, можно записать в виде:

$$N = P\dot{S}. \quad (23)$$

Для единицы массы этот показатель можно подсчитать по формуле:

$$N = \frac{2\mu\dot{S}^2}{\rho_c} = 2\nu S^2. \quad (24)$$

Квадрат величины тензора \dot{S} равен сумме квадратов его компонентов.

$$\begin{aligned} \dot{S}^2 = & \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x_2}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x_1}\right)^2 + \\ & + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x_1} + \frac{\partial v}{\partial x_2}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x_2} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2. \end{aligned} \quad (25)$$

Окончательное выражение для диссипированной в единице массы и в единицу времени энергии будет иметь вид:

$$\begin{aligned} N = 2\nu \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x_2}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x_1}\right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x_1} + \frac{\partial v}{\partial x_2}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x_2} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \right\}. \end{aligned} \quad (26)$$

Таким образом, мощность диссипации зависит как от свойств смешиваемого материала, представляемых интегрально коэффициентом кинематической вязкости ν , так и режимных A, ω и геометрических h, D параметров смесителя. Именно параметры A, ω, h, D задают определенные компоненты и величину деформации слоя. При этом мощность пропорциональна квадрату этих деформаций.

Для описания процесса смешивания воспользовались формулой И.Я. Федоренко, в которую входит мощность диссипации N . Эта формула связывает однородность смеси θ с параметрами процесса смешивания и временем t :

$$\theta = \frac{N}{W} \left\{ t - (t - t_1) \left[1 - \exp\left(\frac{t}{t_1}\right) \right] \right\}, \quad (27)$$

где W - модуль смешивания, показывающий, какая работа совершается при увеличении однородности 1кг смеси на 1%, Дж/кг · %;

t_1 - постоянная, имеющая размерность времени, и также характеризующая физико-механические свойства смешиваемого материала, мин.;

t - время смешивания, мин.

Как видно из формулы (27) однородность смеси, и мощность диссипации связаны прямо пропорциональной зависимостью. Увеличение интенсивности вибровоздействия приводит к увеличению мощности диссипации и однородности смеси.

На рисунке 2 приведена теоретическая кривая, построенная согласно формуле (27). Точки соответствуют экспериментальным данным.

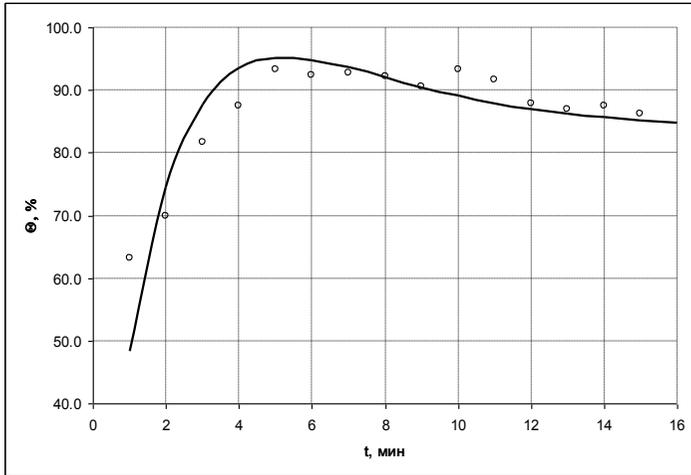


Рисунок 2 – Кривая смешивания для вибрационного смесителя

Для определения значений W и t_1 в вибрационном смесителе смешивали компоненты комбикорма с семенами ячменя, которые служили контрольным компонентом.

Получив экспериментальные значения однородности смеси, их аппроксимировали кривой вида (27), получив при этом следующую зависимость:

$$\theta = 31,9 \left[2,63 + (t - 2,63) \exp\left(-\frac{t}{2,63}\right) \right]. \quad (28)$$

Таким образом, из эксперимента стало известно отношение $\frac{N}{W} = 31,9\%/мин.$ и $t_1 = 2,63$ мин.

Используя эти данные, можем определить:

- оптимальное время смешивания:

$$t^* = 2t_1 = 2 \cdot 2,63 = 5,26 \text{ мин};$$

- максимальную однородность смеси:

$$\theta_{\max} = 1,135 \cdot \frac{N}{W} \cdot t_1 = 1,135 \cdot 31,9 \cdot 2,63 = 95,01\% ;$$

- однородность смеси при неограниченном времени смешивания ($t \rightarrow \infty$):

$$\theta_n = \frac{N}{W} \cdot t_1 = 31,9 \cdot 2,63 = 83,8\% .$$

Таким образом, максимальная однородность смеси достигается при оптимальном времени смешивания. При дальнейшем увеличении времени смешивания однородность снижается, поскольку процессы разделения смеси начинают доминировать над процессами смешивания. При этом впустую затрачивается энергия приводного двигателя.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» изложены: цель экспериментальных исследований; описание экспериментальной установки и обоснование ее параметров; методика проведения экспериментальных исследований; методика обработки данных, полученных по результатам экспериментальных исследований.

Исследования процесса вибросмешивания проводили в лабораторных условиях на экспериментальной установке (рисунок 3).

Рабочий процесс исследуемого вибрационного смесителя с гибким рабочим органом протекает следующим образом. После установки всех необходимых параметров в камеру смешивания 2 засыпают основной и контрольный компоненты. При помощи пульта управления запускается электродвигатель 8, который приводит во вращение вибропривод 5. Вибропривод 5 преобразует вращательное движение электродвигателя 8 в вертикальные прямолинейные колебания гибкого виброднища 3. Колебания гибкого виброднища 3 способствуют интенсивному смешиванию материала. После окончания процесса смешивания материал выгружается через выгрузной патрубков 9. На выходе из выгрузного патрубка 9 из смеси отбирают пробы при помощи пробоотборника, равномерно протаскиваемого при помощи лебедки.

Частоту вращения электродвигателя изменяли при помощи преобразователя частоты электрического тока FR-E540-0.4K-7.5K(FC). Для регистрации мощности, потребляемой электродвигателем, использовали измерительный комплект К-50.

На основе теории размерности было выделено 7 факторов, оказывающих наибольшее влияние на однородность кормовой смеси: коэффициент перегрузки, вибрационный аналог числа Рейнольдса, масштабные факторы, безразмерное время виброобработки, коэффициент заполнения.

Для проведения отсеивающего эксперимента воспользовались планом Плакетта-Бермана. После обработки результатов четыре фактора оказались незначимыми.

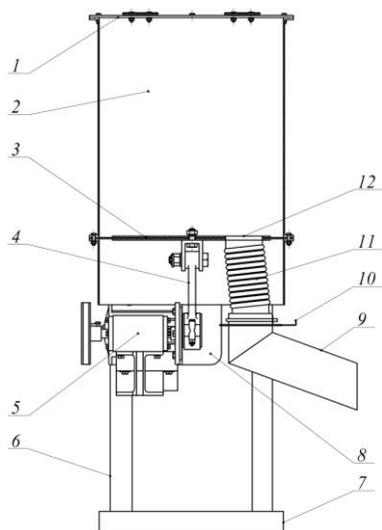


Рисунок 3 – Схема вибрационного смесителя:

1 – крышка, 2 – камера смешивания, 3 – гибкое виброднище, 4 – шатун, 5 – вибропривод, 6 – стойка, 7 – основание, 8 – электродвигатель, 9 – выгрузной патрубкок, 10 – заслонка, 11 – гофра, 12 – выгрузное отверстие.

Для проведения основного эксперимента были приняты следующие факторы с уровнями варьирования (таблица 1). Была использована методика планирования эксперимента с применением квази-D-оптимального плана Песочинского.

Таблица 1 - Факторы и интервалы варьирования основного эксперимента

| Обозначение | Наименование фактора | Значения | | |
|-------------|---|----------|-------|-------|
| | | -1 | 0 | +1 |
| x_1 | Коэффициент перегрузки, $A\omega^2 / g$ | 16,5 | 23,1 | 29,7 |
| x_2 | Масштабный фактор, h / D | 0,24 | 0,54 | 0,84 |
| x_3 | Безразмерное время виброобработки, ωt | 32000 | 54000 | 76000 |

В качестве критериев оптимальности процесса вибросмешивания были приняты:

- однородность кормовой смеси θ , %;
- удельная мощность, потребная на смешивание кормовой смеси N_{ydr} , Вт/кг;
- производительность смесителя Q , т/ч.

Опыты проводили с трехкратной повторностью, порядок их проведения определялся рандомизацией. Статистическая обработка опытных данных, ана-

лиз полученных результатов проводили с использованием прикладных компьютерных программ Statistica, Excel, MathCAD.

Качество смешивания кормов определяли по распределению контрольного компонента в 16 пробах, отобранных при помощи пробоотборника через равные промежутки времени при выгрузке готовой смеси. В качестве основного компонента использовался комбикорм марки К-58. В качестве контрольного компонента, согласно ОСТ 70.19.2-83, использовали семена ячменя, вводимых в комбикорм в количестве 1%.

Четвертая глава посвящена анализу результатов проведенных экспериментальных исследований.

В ней изложены результаты исследования наиболее значимых факторов, влияющих на процесс вибросмешивания и получены математические модели, описывающие данный процесс.

После математической обработки результатов основного эксперимента получили следующие уравнения регрессии в кодированной форме:

- для определения однородности кормовой смеси (%):

$$\theta = 71,00 - 4,75x_1 + 3,63x_3 + 7,25x_1x_2 + 2,75x_1x_3 + 4,88x_2^2; \quad (29)$$

- для определения удельной мощности $N_{y\phi}$, (Вт/кг):

$$N_{y\phi} = 12,31 + 3,66x_1 - 2,09x_2 + 0,63x_1^2 - 0,93x_1x_2 - 0,77x_2^2; \quad (30)$$

- для определения производительности смесителя Q , (т/ч):

$$Q = 0,210 + 0,043x_2 - 0,038x_3 + 0,228x_2^2 - 0,129x_3^2. \quad (31)$$

Проверка регрессионных моделей (29), (30), (31) на адекватность осуществлялась по критерию Фишера при 5% - ом уровне значимости. В случае, если $F^{PACЧ} \leq F_{f2;f1}^{ТАБЛ}$, то полученная полиномиальная модель уравнения регрессии адекватно описывает изучаемую закономерность.

Для определения точек экстремумов функций θ (однородность кормовой смеси), $N_{y\phi}$ (удельная мощность), Q (производительность смесителя) анализировали двумерные сечения поверхности отклика (рисунки 4-6).

В исследованной области факторного пространства конструктивные и кинематические параметры смесителя значительно влияют на однородность кормовой смеси θ (рисунок 4).

При увеличении масштабного фактора h/D необходимо одновременно с этим увеличивать как коэффициент перегрузки $A\omega^2/g$, так и безразмерное время виброобработки ωt , чтобы добиться требуемой однородности смеси.

Снижение удельной мощности $N_{y\phi}$ (рисунок 5) происходит с уменьшением коэффициента перегрузки $A\omega^2/g$ и масштабного фактора h/D .

Производительность смесителя (рисунок 6) повышается при увеличении масштабного фактора h/D .

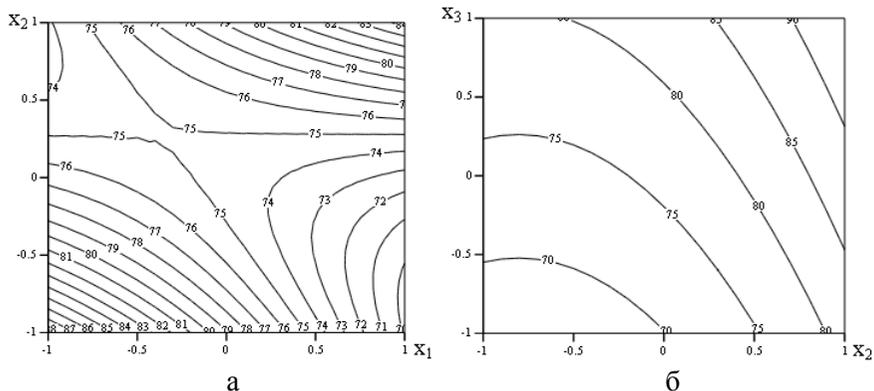


Рисунок 4 – Двумерное сечение поверхности отклика θ :
 а) $\theta = f(x_1, x_2)$; б) $\theta = f(x_2, x_3)$.

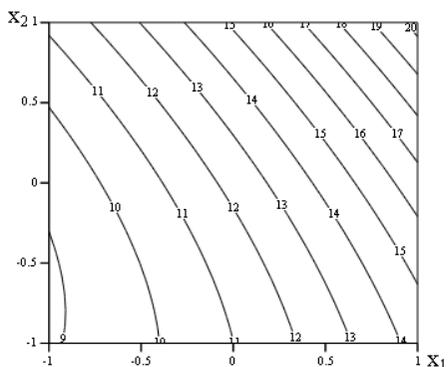


Рисунок 5 – Двумерное сечение поверхностей отклика $N_{\gamma_0} = f(x_1, x_2)$

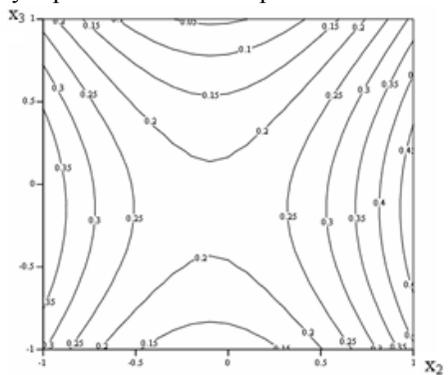


Рисунок 6 – Двумерное сечение поверхности отклика $Q = f(x_2, x_2)$

Для определения рациональных значений факторов, которые бы удовлетворяли всем трем критериям оптимальности θ (однородность кормовой смеси), N_{yd} (удельная мощность), Q (производительность смесителя) решили многокритериальную задачу.

При решении многокритериальной задачи был применен метод свертки критериев на основе весовых коэффициентов. Предложенным методом подвергнуты сравнению такие критерии, как: однородность кормовой смеси, удельная мощность и производительность смесителя.

Нормированные значения критериев оптимальности:

$$W_{\theta} = \frac{\theta(x_i)}{b_0(\theta)}; \quad (35)$$

$$W_{N_{yd}} = \frac{N_{yd}(x_i)}{b_0(N_{yd})}; \quad (36)$$

$$W_Q = \frac{Q(x_i)}{b_0(Q)}; \quad (37)$$

Располагая нормированными значениями функций, целевая функция примет вид:

$$W = \alpha_{\theta} \cdot W_{\theta}(x_i) - \alpha_N \cdot W_N(x_i) + \alpha_Q \cdot W_Q(x_i) \rightarrow \max, \quad (38)$$

где $\alpha_{\theta}, \alpha_N, \alpha_Q$ - вес (важность) каждого критерия оптимальности.

На основании полученных результатов условно-оптимальными будут следующие значения факторов: $x_1 = 1,2$ - коэффициент перегрузки; $x_2 = 1,2$ - масштабный фактор; $x_3 = 0,098$ - безразмерное время виброобработки.

При этих значениях однородность кормовой смеси будет составлять 95,01%, удельная мощность 8,7 Вт/кг, производительность смесителя 0,45 т/ч.

В пятой главе «Экономическая эффективность использования результатов исследования» произведен расчет экономической эффективности применения данной научно-исследовательской работы. Полученные результаты показывают, что применение вибрационного смесителя с гибким рабочим органом экономически выгодно. Годовая прибыль при запланированной годовой загрузки 900т составит 55,3 тыс. руб. Снижение энергоемкости в 2,5 раза, металлоемкости в 2,6 раза по сравнению с серийно выпускаемым вибрационным смесителем. Срок окупаемости вибрационного смесителя составляет 0,4 года.

Общие выводы

На основе анализа современного состояния вопроса и проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Применяемые в настоящее время вибрационные смесители не отвечают в полной мере предъявляемым к ним требованиям. В связи с этим, перспек-

тивным направлением при вибросмешивании сыпучих кормов является применение гибкого рабочего органа, который позволит интенсифицировать процесс смешивания, а также снизить динамическую нагруженность и уровень шума.

2. Разработанные математические модели процессов, протекающих при вибрационном смешивании сыпучего материала, позволяют утверждать, что циркуляционные движения элементов виброкипящего слоя с наложением хаотических всплесков обуславливают смешивание компонентов. Выявлены динамические факторы, вызывающие циркуляционные движения составляющих кормовой смеси: анизотропия силы сухого трения; архимедова сила действия среды, окружающей частицы; силы аэродинамического сопротивления частиц. Установлена связь качественных показателей процесса смешивания с диссипативным рассеянием энергии в виброкипящем слое. Констатировано, что в виброкипящем слое наблюдается пространственное движение составляющих элементов, но наибольший вклад в диссипацию энергии дает вертикальная составляющая движения, задаваемая вибродвижателем.

3. Выявлены основные критерии подобия процесса смешивания, необходимые для проектирования типоразмерного ряда вибрационных смесителей с гибким рабочим органом: $A\omega^2/g$ – коэффициент перегрузки, $Ah\omega/v$ – вибрационный аналог числа Рейнольдса, h/D – масштабный фактор, ωt – безразмерное время виброобработки.

4. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены следующие конструктивно-режимные параметры вибрационного смесителя для получения комбикорма марки К-58 (сведенные в критерии подобия), позволяющие достичь необходимое по зоотехническим требованиям качество смешивания исходных компонентов: $A\omega^2/g = 35,6$; $Ah\omega/v = 40,9$; $h/D = 1,2$; $\omega t = 54050$. При этом оптимальное время смешивания составляет 5,26 мин, качество смешивания, оцениваемое однородностью смеси - 95,01%.

5. Проведена оценка экономической эффективности результатов исследования, которая показывает, что экономический эффект при использовании вибрационного смесителя с гибким рабочим органом достигается за счет более низкой энергоемкости и металлоемкости. Так, годовая прибыль при запланированной годовой загрузке смесителя $Q = 900$ т. составит 55,3 тыс. руб, а срок окупаемости вибрационного смесителя 0,4 года.

Список основных публикаций по теме диссертационной работы: публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Федоренко, И.Я. Использование модели Лоренца для описания процесса смешивания сыпучих кормовых материалов [Текст] / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков, **Р.А. Котов** // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 9. – С. 81-85.

2. Федоренко, И.Я. Оптимизация конструктивно-кинематических парамет-

ров вибрационного смесителя [Текст] / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков, **Р.А. Котов** // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. – 2011. – № 12. – С. 38-42.

3. Федоренко, И.Я. Оптимизация процесса вибросмешивания в смесителе с гибким рабочим органом [Текст] / И.Я. Федоренко, **Р.А. Котов** // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 4. – С. 106-109.

в других сборниках научных трудов

4. **Котов Р.А.** Использование теории размерности при анализе факторов вибрационного смешивания сыпучих кормов [Текст] / **Р.А. Котов** // Молодежь Барнаулу: материалы XI научно-практической конференции молодых ученых: в 2т. - Барнаул: 2009-Т.1.-С. 255.

5. **Котов Р.А.** О силах, действующих на частицу в виброкипящем слое сыпучего кормового материала [Текст] / **Р.А. Котов** // I Региональная молодежная реферативно – практическая конференция «Теория и практика инновационного развития в представлениях нового поколения»: Барнаул. 2015 – С. 47-50.

патент

6. Пат. 2421271 Российская Федерация, С 1 В01 F3/18, В01 F 11/00. Смеситель для сыпучих материалов [Текст] / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков, **Р.А. Котов**; заявитель и патентообладатель И.Я. Федоренко. - №2010104355/05; заявл. 08.02.2010; опубл. 20.06.2011, Бюл. № 17. – 5 с.

Подписано в печать 28.04.2015 г. Формат 60×84/16.
Бумага для множительных аппаратов. Печать ризографная.
Гарнитура «Times New Roman». Усл. - печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № ____.

РИО АГАУ,
656049, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 98,
тел. 62-84-26