

*На правах рукописи*

**МАЗЬКО Наталья Николаевна**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАГРУЗКИ  
КОМПОНЕНТАМИ КОМБИКОРМА ЕМКОСТЕЙ  
РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

**Автореферат**  
диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Оренбург, 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО СамГУПС).

- Научный руководитель: **Варламов Александр Васильевич** - кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВПО «Самарский государственный университет путей сообщения»
- Официальные оппоненты: **Межуева Лариса Владимировна** - доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевые биотехнологии» ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет»  
**Третьяков Геннадий Михайлович** - доктор технических наук, профессор, генеральный директор ОАО «Волжско-Уральская транспортная компания», почетный железнодорожник, заслуженный работник транспорта РФ
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Поволжская государственная зональная машиноиспытательная станция»

Защита состоится 26 июня 2015 г. в 12<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д.220.051.02 в ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный аграрный университет» по адресу: 460014, г. Оренбург, ул. Коваленко, д. 4 (корпус № 3, инженерный факультет), ауд. 500.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Оренбургского государственного аграрного университета. Объявление о защите и автореферат размещены на сайте ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный аграрный университет» <http://www.orensau.ru> и на сайте Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки Минобрнауки России <http://www.vak.ed.gov.ru>.

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

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета доктор технических наук, профессор

В.А. Шахов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Разработанная ведущими специалистами ГНУ ВНИИМЖ и принятая Правительством РФ «Стратегия машинно-технологического обеспечения производства продукции животноводства» на период до 2020 года предусматривает решение ряда конкретных задач, направленных на создание принципиально новых инженерно-технических решений нового поколения, направленных на внедрение среднеинтенсивных и интенсивных технологий.

В частности, в животноводстве, наиболее перспективной, по мнению многих ученых и практиков, является проблема использования кормосмесей и комбикормов, полученных на специализированных предприятиях и в хозяйственно-производственных условиях. Это связано с процессом заполнения емкостей.

При распространенном способе заполнения бункеров, силосов компактной струей частицы комбикорма, имеющие различный размер или природу, самосортируются, происходит сегрегация. Такое расслоение особенно недопустимо для кормовых смесей, так как может стать причиной отравления и гибели животных. В то же время компактный поток, падая с высоты, сильно уплотняет насыпь в емкости, что приводит к слеживаемости и ухудшению качества комбикорма. Это, в свою очередь, влияет на усвояемость кормов и может привести к ухудшению здоровья животных и, следовательно, уменьшению привесов. Кроме того, загрузка емкостей компактным потоком снижает коэффициент использования их полезного объема. Перечисленные негативные явления в полости хранилищ могут быть сведены к минимуму правильно выбранным способом загрузки, которая является начальным звеном в процессе функционирования емкости и оказывает значительное влияние на весь технологический процесс и на качество конечного продукта.

**Степень разработанности темы.** Исследованиям загрузки емкостей сыпучими материалами посвящены труды В.А. Богомягких, И.В. Горюшинского, А.Ф. Яшина и др. Загрузка является начальным звеном в процессе функционирования емкости и оказывает значительное влияние на весь технологический процесс и на качество конечного продукта. Вопросу изучения процесса загрузки, как основополагающему этапу функционирования емкости, уделено очень мало внимания.

**Цель исследования.** Повышение эффективности процесса загрузки емкостей различного назначения компонентами комбикорма посредством использования энергосберегающего загрузочно-распределительного устройства, позволяющего повысить степень равномерности распределения комбикорма в емкости, уменьшить слеживаемость, сегрегацию.

**Объект исследования.** Процесс загрузки емкостей компонентами комбикорма для хранения и транспортировки, равномерного распределения комбикорма по объему емкости посредством загрузочно-распределительного устройства.

**Предмет исследования.** Закономерности, характеризующие процессы загрузки комбикормов и их компонентов при использовании бесприводного загрузочно-распределительного устройства.

**Методика исследований.** В теоретических исследованиях использовались известные законы и методы теоретической механики и математики. Постановка экспериментальных исследований и производственных испытаний проводилась в соответствии с действующими стандартами и разработанными индивидуальными методиками

**Научная новизна выполненных исследований заключается в следующем:**

- предложен ресурсосберегающий способ загрузки емкостей различного назначения компонентами комбикорма, позволяющий повысить степень равномерности его распределения в емкости, сохранить его качество, исключить сегрегацию;

- разработана параметрическая модель процесса эксплуатации емкости для компонентов комбикорма, позволяющая выявить все параметры, влияющие на данный процесс, и оценить значимость этих параметров на каждом этапе процесса;

- разработана теоретическая модель расчета оптимальных параметров предлагаемого загрузочно-распределительного устройства;

- получены теоретические зависимости, подтверждающие эффективность применения загрузочно-распределительного устройства и описывающие влияние конструктивных параметров устройства на диаметр разброса комбикорма по объему емкости.

**Практическую ценность представляют:**

- конструкция загрузочно-распределительного устройства;

- методика расчета конструктивно-технологических параметров разработанного загрузочно-распределительного устройства;

- результаты проверки загрузочно-распределительного устройства в лабораторных и производственных условиях.

**Вклад автора в проведенное исследование** – предложен ресурсосберегающий способ загрузки емкостей компонентами комбикорма; разработана параметрическая модель процесса эксплуатации емкости для компонентов комбикорма; предложена методика расчета конструктивно-технологических параметров загрузочно-распределительного устройства; проведена экспериментальная обработка результатов исследования и произведена их апробация.

**Внедрение.** Результаты исследований процесса равномерной загрузки компонентов комбикорма используются в учебном процессе СамГУПС в учебных курсах «Транспортно-грузовые системы», «Грузоведение».

**Апробация.** Результаты теоретических и экспериментальных исследований доложены, обсуждены и одобрены: на международной научно-практической конференции «Ресурсосбережение и инновации: проблемы и методы решения» в ПГУ, г. Пенза, 2006 г.; на международной научно-технической конференции «Наука, инновации, образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России» в УрГУПС, г. Екатеринбург, 2006 г.; на V Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития транспортного комплекса» СамГУПС, г. Самара, 2009 г.; на VI Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы

развития транспортного комплекса» СамГУПС, г. Самара, 2010 г.; на расширенных заседаниях кафедр СамГАПС, СамГУПС, г. Самара, 2009-2014 гг.

**Положения выносимые на защиту:**

- классификация существующих конструкций загрузочных устройств для компонентов комбикорма и зерновых материалов;
- параметрическая модель эксплуатации емкостей для комбикорма и его компонентов;
- теоретическое обоснование конструкции загрузочно-распределительного устройства и его элементов;
- результаты экспериментальных исследований загрузочно-распределительного устройства в лабораторных и производственных условиях;
- результаты экономического обоснования применения загрузочно-распределительного устройства.

**Обоснование и достоверность.** Достоверность научных положений и результатов работы обеспечена использованием для анализа экспериментальных данных стандартных пакетов прикладных программ и подтверждена совпадением расчетных и экспериментальных данных.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 18 работ, из них 7 - печатные работы в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, получен патент на полезную модель. Объем публикаций составляет 2,33 п.л.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и приложения. Содержание работы изложено на 142 страницах машинописного текста, включает 46 иллюстраций, 11 таблиц, список использованных источников из 153 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность рассматриваемой задачи и основных научных положений, выносимых на защиту.

**В первой главе** «Состояние механизации перегрузочных и транспортных операций с комбикормами в агропромышленном комплексе. Цель и задачи исследований» дана общая характеристика технологии загрузки комбикормовых продуктов в емкости для их хранения.

На основе анализа литературных источников и патентных документов разработана классификация загрузочных устройств, проведен обзор научных исследований процесса загрузки как основополагающего этапа функционирования емкости.

Исследованиям загрузки емкостей сыпучими материалами посвящены труды В.А. Богомягких, Е.М. Вобликова, Л.А. Гячева, В.С. Горюшинского, И.В. Горюшинского, Р.Л. Зенкова, В.С. Кунакова, Н.Н. Мосиной, В.П. Лобзина, В.Д. Прохоренкова, Г.А. Рогинского, В.А. Рычкова, А.Л. Степанова, Г.М. Третьякова, Л.А. Трисвятского, А.Ф. Яшина и др.

Анализ практики проектирования и эксплуатации емкостей, а также вспомогательных устройств к ним позволяет сделать вывод о необходимости комплексного подхода к вопросу их функционирования. Одно из звеньев данного подхода – это совершенствование показателей загрузки емкостей с учетом их

влияния на дальнейшее функционирование емкости и качество хранимого продукта. При выборе пути совершенствования процесса загрузки необходимо стремиться обеспечить универсальность применяемых конструкций как по количеству решаемых задач, так и по различным видам емкостей, низкую стоимость и энергоемкость, простоту в изготовлении и эксплуатации.

**На основе предложенной цели были поставлены следующие задачи:**

- проведение анализа конструктивных схем существующих загрузочных устройств, разработка и обоснование конструктивной схемы загрузочно-распределительного устройства, способного без энергозатрат равномерно распределять комбикорм в емкостях и исключать его сегрегацию;

- выполнение теоретических исследований процесса загрузки емкостей компонентами комбикорма с применением загрузочно-распределительного устройства;

- проведение экспериментальных исследований предложенного загрузочно-распределительного устройства для выявления влияния его параметров на характер и структуру заполнения емкости;

- экономическая оценка эффективности использования предлагаемого устройства.

**Во второй главе «Теоретическое обоснование предлагаемого загрузочно-распределительного устройства»** на основе анализа процесса загрузки емкостей разработана конструктивно-технологическая схема загрузочно-распределительного устройства (рис. 1.). Устройство состоит из гофрированного трубопровода 1, в нижней части которого монтируется металлический цилиндр 2. В верхней части цилиндра установлено крепежное устройство 3, в котором по центру цилиндра жестко крепится ось 4. На оси подвижно с помощью крепежного устройства 5 крепятся лопасти 6. Лопасти 6 свободно располагаются по плоскости конуса 7, который жестко закреплен в нижней части оси 4.

Устройство работает следующим образом. Сыпучая масса поступает из отпускного бункера по гофрированному трубопроводу 1. Попадая в цилиндр 2, она устремляется к лопастям 6 и приводит их в круговое движение вокруг своей оси. Таким образом, материал начинает разлетаться по лопастям, распределяясь по периметру емкости.

Методом параметрического моделирования были выделены основные факторы, влияющие на процесс функционирования данного устройства:  $x_{13}$  - угол наклона лопастей;  $x_{23}$  - угол атаки лопастей;  $x_{33}$  - высота установки распределительных лопастей под

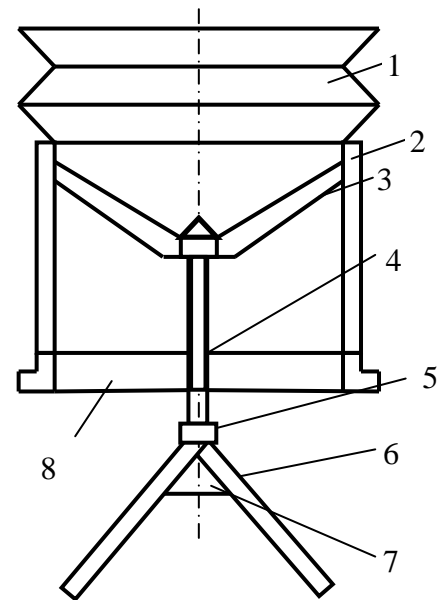


Рисунок 1 – Схема конструкции загрузочно-распределительного устройства:

1- гофрированный рукав отпускового устройства; 2 - цилиндр; 3, 5 - крепежное устройство; 4 - ось; 6 - подвижные лопасти; 7 - конус; 8 - люк загружаемой емкости

загрузочной горловиной;  $x_{4з}$  - размер межлопастных углов;  $x_{5з}$  - скорость вращения и коэффициент парусности частицы сыпучего материала;  $x_{6з}$  - угол внутреннего трения частиц материала;  $x_{7з}$  - угол трения частиц материала о материал устройства;  $x_{8з}$  - содержание связывающих частицы материала веществ (влажность, жирность и т.п.).

Перечисленные факторы комбинируются в зависимости от своей значимости и образуют функционал  $\bar{X}_{ПЗ}$ .

Выходные данные процесса загрузки служат в исследовании критериями оценки данного процесса и используемых в нем устройств.

Основными критериями являются:  $y_{1з}$  - равномерность укладки частиц материала;  $y_{2з}$  - степень сегрегации сыпучей массы;  $y_{3з}$  - коэффициент использования объема хранилища;  $y_{4з}$  - динамическое воздействие материала на нижние слои;  $y_{5з}$  - целостность/повреждение частиц сыпучей массы;  $y_{6з}$  - затраты энергии на выполнение загрузки.

Факторы  $y_{1з}$ ,  $y_{4з}$  оказывают влияние на длительность хранения и стабильность выпуска,  $y_{2з}$ ,  $y_{5з}$  - на качество конечного продукта, а  $y_{3з}$  и  $y_{6з}$  играют роль при экономической оценке как загрузки, так и процесса функционирования емкости в целом. Факторы  $y_{3з}$  и  $y_{4з}$  непосредственно зависят от равномерности заполнения  $y_{1з}$ .

**Обоснование формы лопасти загрузочно-распределительного устройства.** Целью оптимизации параметров рабочего органа загрузочно-распределительного устройства является равномерная загрузка материалом максимального объема заполняемой емкости. Поверхность зоны засыпки материалом емкости имеет форму круга с центром в точке, образованной от оси вращения загрузочно-распределительного устройства. Радиус разброса равен сумме длины лопасти и расстояния свободного полета частиц материала, упавшего с крайней части лопасти. Форма лопасти должна быть такой, чтобы с каждой части лопасти падало такое количество материала, масса которого равномерно заполняла бы площадь поверхности круга охвата. С увеличением расстояния от центра вращения лопасти или с увеличением длины лопасти количество сходящего с нее сыпучего материала должно увеличиваться по зависимости  $S = \pi r^2$ . Подача материала на лопасть происходит от потока из рукава равномерно на каждый выделенный элементарный сектор с углом  $\varphi$ . И с каждого такого сектора материал, двигаясь по плоскости лопасти, попадает в определенное место схода на расстоянии  $r$  от оси вращения. Отсюда, приравняв величину сектора и площадь засыпки, охватываемой этой лопастью, получим уравнение формы лопасти, обеспечивающее необходимые условия равномерности засыпки:  $\varphi = \pi r^2$ . Данное уравнение, записанное в полярных координатах, удобнее записать как зависимость  $r$  от  $\varphi$  в следующем виде:

$$r(\varphi) = \sqrt{\varphi/\pi}. \quad (1)$$

Таким образом, лопасть имеет вид геометрической фигуры, образованной степенной спиралью, ограниченной линией радиуса  $r$ , а ее форма будет зависеть от угла  $\varphi$ . Поэтому, регулируя эти величины, мы можем изменять форму лопасти в зависимости от конкретных условий, сохраняя при этом условие равномерного распределения.

**Определение величины угла атаки лопасти.** Распределение материала происходит наиболее качественно при работе данного устройства, если лопасти будут постоянно и равномерно вращаться вокруг собственной оси с угловой скоростью  $\omega$ . Это возможно в случае возникновения крутящего момента, действующего на лопасти. Такой момент можно создать потоком движущегося по лопасти материала, если плоскость лопасти отклонить от горизонтального положения на угол  $\alpha$  относительно оси  $Ox$ .

Для того, чтобы материал равномерно распределялся по плоскости лопасти с скоростью  $v$  и была исключена его остановка или препятствие движению, необходимо плоскость, в которой находится лопасть, отклонить на угол  $\beta$  относительно оси  $Oy$ .

Для определения оптимального режима работы устройства необходимо найти значения параметров  $\alpha$  (угол атаки лопасти) и  $\beta$  (угол наклона лопасти).

Рассмотрим силы, действующие на лопасть при движении по ней материала.

На элементарный объем материала будут действовать следующие силы, показанные на рисунке 2.:

- $N$  – нормальная сила, Н;
- $F_{mp}$  – сила трения, Н;
- $F_T$  – сила тяги, Н;
- $G$  – сила тяжести, Н.

Для того, чтобы лопасть приобрела определенную угловую скорость, необходимо приложить момент силы  $M$ .

При этом должно выполняться следующее условие:

$$M \geq M_{сопр}, \text{ Нм} \quad (2)$$

где  $M_{сопр}$  – момент, возникающий от сопротивления движению лопасти, Нм.

Силу тяги найдем, рассмотрев схему движения массы сыпучего тела по лопасти, показанной на рисунке 2.

$$F_T = \frac{Gtg\alpha(1-f)}{\cos\beta(1+f)}, \text{ Н} \quad (3)$$

где  $f$  – коэффициент внешнего трения.

Толщина слоя на лопасти неравномерна и убывает с увеличением ее радиуса, так как подаваемый сыпучий материал распространяется на большую

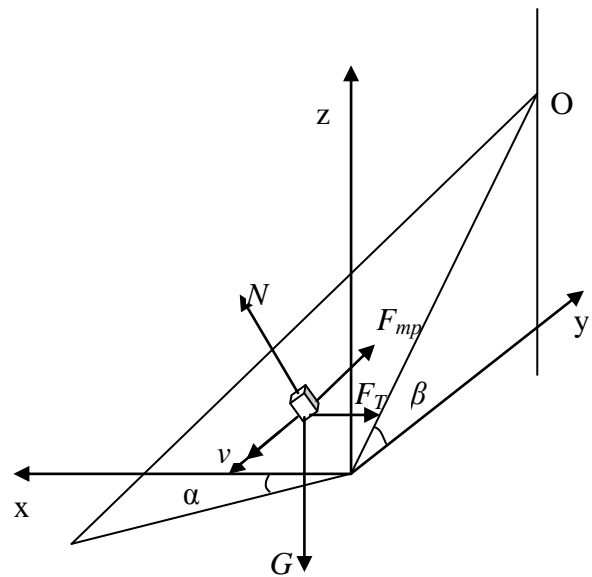


Рисунок 2 – Схема к расчету сил, действующих на движущийся по лопасти сыпучий материал



площадь. Найдем толщину слоя из следующих соображений. Рассмотрим часть лопасти, на которую падает подаваемый материал. Она представляет собой сектор с углом вершины  $\gamma$ . Попавший на этот участок лопасти материал далее распространяется по всей площади лопасти. Потому, зная характеристику потока и геометрию лопасти, можем найти толщину слоя в зависимости от координаты лопасти. Имеем равенство расхода подаваемого материала и материала, распространяющегося по лопасти:

$$Q_n = Q_p, \text{ м}^3/\text{с} \quad (4)$$

где  $Q_n$  - расход подаваемого материала,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$Q_p$  - расход материала с лопасти,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Текущее значение  $h$  найдем из равенства:

$$v_n \frac{\gamma}{2} R_n^2 = \gamma R_n h v_k, \quad (5)$$

где  $v_n$  - скорость движения материала перед попаданием на лопасть,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$v_k$  - скорость движения материала по лопасти,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\gamma$  - угол основания лопасти, рад.;

$R_n$  - радиус сектора (равен половине диаметра потока), м;

$h$  - толщина слоя движущегося материала, м.

Скорость движения материала по лопасти равна:

$$v_k = \sqrt{2gr \cos \beta (tg \beta - f) + v_n^2 \sin^2 \beta}, \text{ м}/\text{с} \quad (6)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$r$  - радиус лопасти, м.

Толщина слоя материала:

$$h = \frac{v_n R_n}{2\sqrt{2gr \cos \beta (tg \beta - f) + v_n^2 \sin^2 \beta}}, \text{ м} \quad (7)$$

Момент силы тяги можно определить с помощью двойного интеграла:

$$M = \iint_S \frac{tg \alpha (1-f) \rho g v_n R_n r \cdot r}{2 \cos \beta (1+f) \sqrt{2gr \cos \beta (tg \beta - f) + v_n^2 \sin^2 \beta}} d\varphi dr, \quad (8)$$

где  $\rho$  - плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Это выражение вычисляется определенным интегралом:

$$M = \frac{tg \alpha (1-f) \rho g v_n R_n}{2 \cos \beta (1+f)} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{r_1(\varphi)}^{r_2(\varphi)} \frac{r^2}{\sqrt{2g \cos \beta (tg \beta - f) \cdot r + v_n^2 \sin^2 \beta}} dr. \quad (9)$$

Границы интегрирования  $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = \varphi$  и  $r_1(\varphi) = 0, r_2(\varphi) = \sqrt{\frac{\varphi}{\pi}}$ .

Получим момент:

$$M = \frac{tg \alpha (1-f) \cdot k_f \cdot \rho \cdot g \cdot v_n \cdot R_n}{2 \cos \beta (1+f)} \cdot \left[ \frac{1}{b_2^3} \cdot \left[ \frac{2}{5} \cdot \left( b_1 + b_2 \cdot \sqrt{\frac{\varphi}{\pi}} \right)^{2.5} - \frac{4}{3} \cdot b_1 \left( b_1 + b_2 \cdot \sqrt{\frac{\varphi}{\pi}} \right)^{1.5} + 2 \cdot b_1^2 \cdot \left( \sqrt{b_1 + b_2 \cdot \sqrt{\frac{\varphi}{\pi}}} \right) \right] \right], \text{ Нм} \quad (10)$$

где  $b_1 = v_n^2 \sin^2 \beta$

$b_2 = 2g \cos \beta (tg \beta - f)$ ;

$k_f$  - коэффициент трения, зависящий от изменения влажности.

Заменяя в выражении (10)  $M$  на  $M_{comp}$ , можно найти угол  $\alpha$  (угол атаки лопасти), необходимый для вращения лопастей устройства.

Таким образом, из формулы (10) видно, что крутящий момент, возникающий в результате движения материала по лопасти, зависит от плотности материала, площади потока, подаваемого на лопасть, угла наклона лопасти, угла атаки лопасти, а также от радиуса, формы и размеров лопасти. Анализируя формулу (10), видим, что с увеличением угла  $\alpha$  крутящий момент возрастает, а с увеличением угла  $\beta$  от 0 до  $\pi/4$  - уменьшается, далее опять увеличивается. С увеличением угла основания лопасти  $\gamma$  момент увеличивается, т.к. увеличивается площадь самой лопасти и, следовательно, давление материала на лопасть также увеличивается.

**Определение необходимого числа лопастей.** Число лопастей, необходимое для эффективной работы устройства, можно определить, найдя функцию, описывающую оптимальную работу устройства. Данная функция должна иметь один экстремум. Для этого необходимо найти критерий оптимальности работы устройства. Одним из самых важных критериев работы грузочно-распределительного устройства является обеспечение равномерного заполнения загружаемой емкости. Равномерное заполнение может осуществляться только при движении лопастей вокруг оси вращения. Вращающиеся пластины обеспечивают равномерный разброс материала по всей своей длине и площади вращения благодаря наличию угловой скорости. Равномерность также увеличится, если увеличить число лопастей, так как один и тот же поток в этом случае будет распределяться не по одной лопасти, а по нескольким. В связи с этим уменьшится толщина слоя засыпки насыпи за один проход, что приведет к увеличению точности засыпки. Критерий оптимальности включает в себя две зависимости от одного и того же фактора – числа лопастей  $n$ . Представим данную функцию в виде:

$$E(n) = E_1(n) + E_2(n), \quad (11)$$

где  $E_1(n)$  - зависимость равномерности засыпки от числа рабочих органов;

$E_2(n)$  - зависимость простоты конструкции от числа лопастей.

Причем оптимум функции находится при минимальном значении критерия оптимизации. Искомая зависимость:

$$E(n) = k_1 n + \frac{k_2}{n}, \quad (12)$$

где  $k_1, k_2$  - коэффициенты пропорциональности, показывающие значимость данных процессов.

Таким образом, оптимальное число рабочих органов (лопастей) зависит от величины оценочных показателей значимости каждого критерия и определяется по формуле:

$$n_{opt} = \sqrt{k_2/k_1}. \quad (13)$$

**Определение угла основания лопасти.** Поток сыпучего материала, исходящий из подающего рукава, падает на основания лопастей и далее часть его распределяется по поверхности лопастей, а часть просыпается между их осно-

ваниями. Этот материал заполняет центральную часть емкости. Для того, чтобы выполнялось условие равномерности загрузки по всей площади емкости, необходимо, чтобы на единицу поверхности емкости приходилась одинаковая масса материала как в центральной части, так и по периферии. Поэтому данное условие можно записать в виде выражения:

$$V_u/S_u = V_o/S_o, \quad (14)$$

где  $V_u, V_o$  – объем материала, падающего в центральную и боковые части, м<sup>3</sup>;  
 $S_u, S_o$  – площади центральной и боковой частей, м<sup>2</sup>.

Общий поток сыпучего материала имеет некоторый объем  $V_o$ , который разделяется на объем центральной и боковой части  $V_u, V_o$ . То есть имеем:

$$V_o = V_u + V_o, \quad (15)$$

где  $V_o$  - объем общего потока сыпучего материала, м<sup>3</sup>.

На основании выражений (14) и (15) можем найти объем материала, поступающего в центральную часть, решив систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} V_u/S_u = V_o/S_o \\ V_o = V_u + V_o \end{cases}. \quad (16)$$

После решения получим:

$$V_u = V_o \left( 1 - \frac{1}{S_u/S_o + 1} \right), \quad (17)$$

Угол основания одной лопасти (рис. 3) равен:

$$\gamma = \frac{2\pi - \gamma_o}{n}, \quad (18)$$

где  $\gamma_o$  - сумма углов между лопастями, рад.

$$\gamma_o = \left( 1 - \frac{1}{D_u^2/(D-D_u)^2 + 1} \right) \cdot 2\pi, \quad (19)$$

где  $D, D_u$  - диаметр всей поверхности разброса и диаметр центральной части, соответственно, м.

Таким образом, из (18) можно определить величину угла основания лопасти. Так, если число лопастей 4, а диаметр потока равен 0,5 м, диаметр загрузки 3 м, то угол основания лопасти будет равен 1,5 рад.

**Определение длины и угла наклона лопасти.** Оптимальная длина рабочего органа и угол наклона лопасти в значительной степени влияют на эффективность работы загрузочного устройства. Оптимальное распределение сыпучего материала по лопасти и равномерная загрузка необходимой площади будет обеспечиваться при равномерном движении его по поверхности рабочего органа, т. е. начальная скорость движения материала по лопасти  $v_n$  должна быть равна конечной скорости движения сыпучего материала  $v_k$  до момента его падения с лопасти.

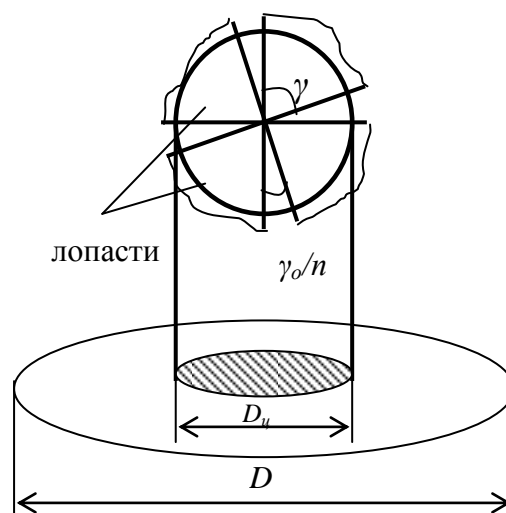


Рисунок 3 – Расчетная схема угла основания лопасти

Также угол должен принимать наименьшее значение по условию минимального занятия полезного пространства емкости. На рисунке 4. представлена схема к расчету длины лопасти.

$$\operatorname{tg}\beta = f + \frac{v_k^2 - v_n^2}{2ga}, \text{ рад.} \quad (20)$$

где  $a$  - проекция лопасти на ось  $x$ ,  
 $a = l_n \cos \beta$ .

Конечная скорость находится по формуле:

$$v_k = \sqrt{2gl_n \cos \beta (\operatorname{tg}\beta - f) + v_n^2}, \text{ м/с} \quad (21)$$

где  $l_n$  - длина лопасти, м.

Длина рабочего органа после некоторых преобразований находится по следующей формуле:

$$l_n = \frac{R}{\cos \beta} + \frac{v \sin \beta}{g} (\sqrt{2gH + v^2 \sin^3 \beta} - v \sin^2 \beta), \text{ м} \quad (22)$$

где  $R$  - радиус необходимой площади засыпки, м;

$v$  - скорость движения материала в потоке, м/с;

$H$  - высота падения сыпучего материала с лопасти, м.

Таким образом, необходимый угол наклона рабочего органа загрузочно-распределительного устройства определяется как  $\beta = \operatorname{arctg} f$ , и при  $f=0,35$  для зерновых материалов равен 0,35 рад. При загрузке мобильной емкости с размерами  $R=1,5$  м,  $H=3$  м, при угле  $\beta = 0,35$  рад, скорости потока  $v=0,5$  м/с, длина лопасти ( $l_n$ ) примет значение, равное 1,2 м.

**В третьей главе «Методика и результаты экспериментальных исследований»** приведены программа и методика экспериментальных исследований, описание опытной установки (рис. 5), характеристика исследуемых материалов, результаты и анализ экспериментальных исследований. В соответствии с задачами исследований программа включала выявление влияния конструктивно-режимных параметров загрузочно-распределительного устройства на его функциональные возможности.

В лабораторных условиях были проведены следующие эксперименты по определению влияния угла атаки, угла наклона лопасти, числа рабочих органов,

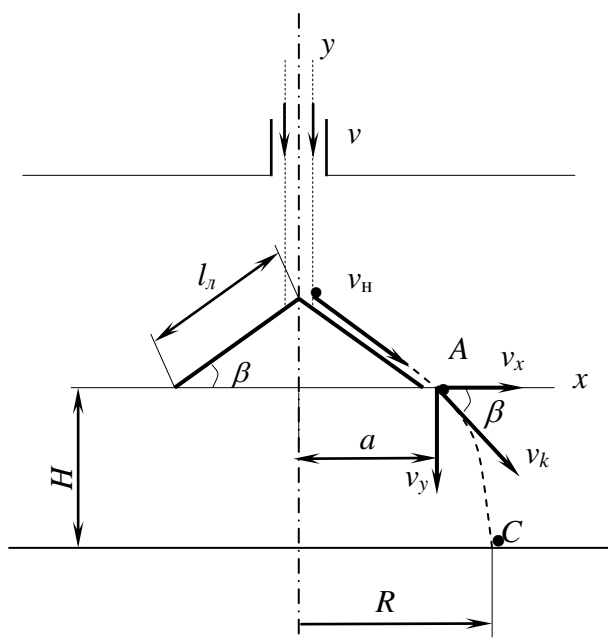


Рисунок 4 – Расчетная схема длины лопасти



Рисунок 5 – Общий вид экспериментального загрузочно-распределительного устройства: 1- бункер; 2- воронка бункера; 3- ось распределительного устройства; 4- ограничитель; 5- лопасти

диаметра загрузочной воронки, высоты подачи материала, шероховатости рабочей поверхности лопасти на диаметр разброса комбикорма.

Исследованиями установлены зависимости влияния угла наклона лопасти на диаметр разброса материала. Угол атаки лопасти составил  $20^\circ$ , число лопастей на оси изменялось от 3 до 8 шт. На трех, шести и восьми лопастях наблюдалось резкое падение диаметра разброса материала, поэтому оптимальным числом распределительных лопастей на валу загрузочно-распределительного устройства принято 4. Высота подачи материала составляла 600 мм.

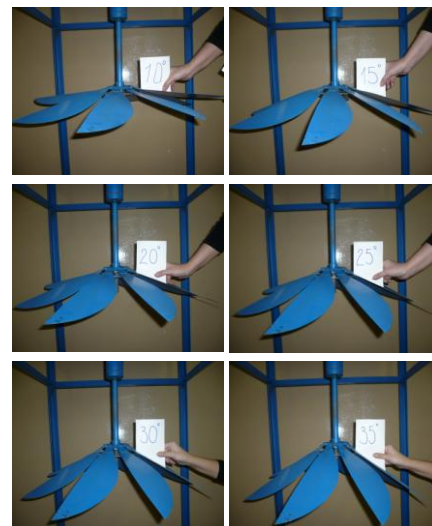
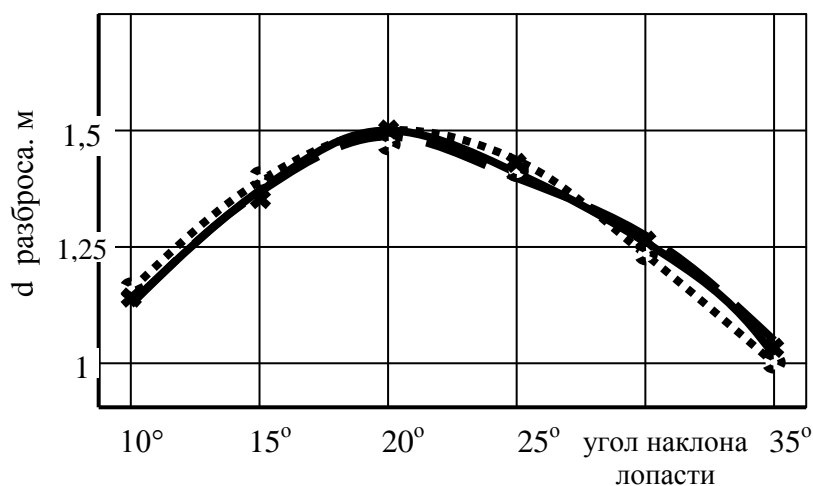


Рисунок 6 – Зависимости влияния угла наклона лопасти на диаметр разброса материала:

— мел; — отруби; ..... мясокостная мука

Как видно из рисунка 6, все кривые зависимостей совпали почти в одну линию, а оптимальным следует принять угол наклона лопасти, равный  $20^\circ$ .

Оценка влияния угла атаки лопасти на диаметр разброса материала позволила получить следующие результаты. При установке угла атаки лопастей на  $10^\circ$  ни один испытуемый материал при его выпуске не привел в движение ось с закрепленными на нем лопастями. Увеличение угла атаки лопасти до  $15^\circ$  позволило установить, что при выгрузке мела и мясокостной муки вращение вала не произошло, а при выпуске отрубей были получены зависимости, приведённые на рисунке 7. Увеличение выше указанного угла до  $20^\circ$  позволяет привести вал в движение на всех испытуемых материалах, а оптимальным следует принять угол атаки лопасти  $20^\circ$  (см. рис. 7). Оценка влияния угла атаки лопасти на диаметр разброса материала позволила получить следующие результаты. При установке угла атаки лопастей на  $10^\circ$  ни один испытуемый материал при его выпуске не привел в движение ось с закрепленными на нем лопастями. Увеличение угла атаки лопасти до  $15^\circ$  позволило установить, что при выгрузке мела и мясокостной муки вращение вала не произошло, а при выпуске отрубей были получены зависимости, приведённые на рисунке 7. Увеличение выше указанного угла до  $20^\circ$  позволяет привести вал в движение на всех испытуемых материалах, а оптимальным следует принять угол атаки лопасти  $20^\circ$  (см. рис. 7).

Определение влияния числа лопастей на диаметр разброса материала позволило получить следующие зависимости (рис. 8).

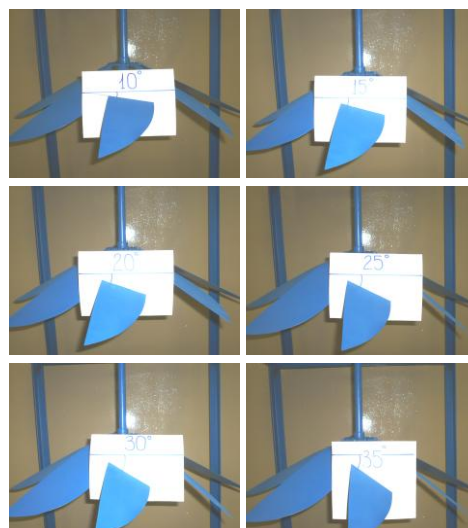
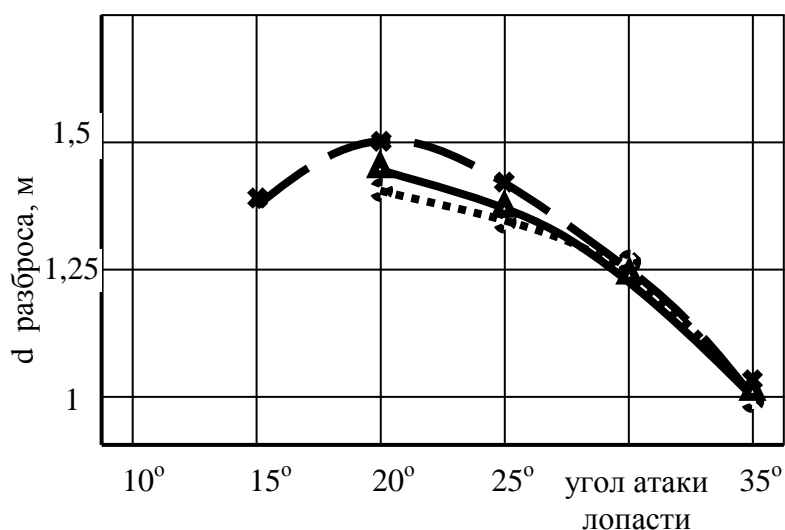


Рисунок 7 – Зависимости влияния угла атаки лопасти на диаметр разброса материала:

— мел; — отруби; ····· мясокостная мука

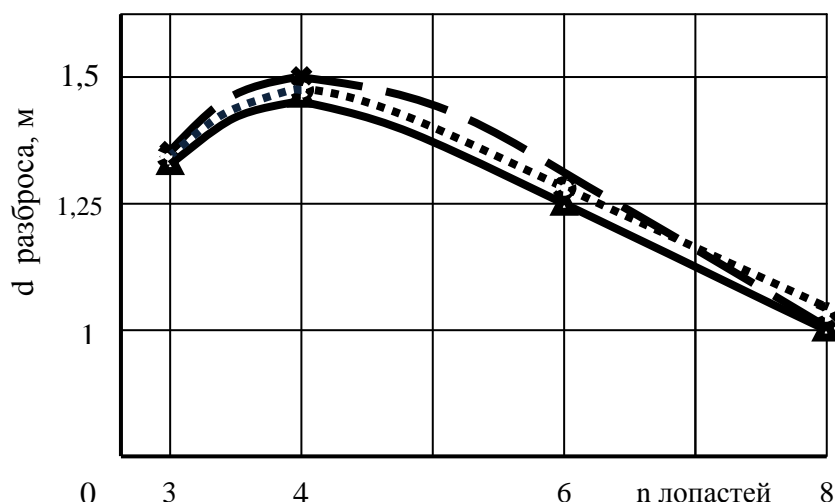


Рисунок 8 – Зависимости влияния числа лопастей на диаметр разброса материала:

— мел; — отруби; ····· мясокостная мука

Из графика видно, что при наличии трёх лопастей испытуемый материал распределялся на диаметр 1,25 м, так как при таком числе лопастей свободное пространство между ними достаточно большое, и частицы материала свободно проходят сквозь промежутки между лопастями. При наличии четырёх лопастей диаметр разброса увеличился до 1,5 м. Это обосновывается тем, что материал, поступая на лопасти, равномерно распределяется по ним и, получая импульс, отлетает на указанное выше расстояние. При наличии шести и восьми лопастей наблюдалось резкое падение диаметра разброса материала. Частицы материала стали задерживаться из-за того, что не успевали проходить сквозь промежутки между лопастями. Оптимальным числом распределительных лопастей на предлагаемом устройстве следует принять четыре.

Для определения влияния диаметра выходного отверстия воронки на диаметр разброса материала были выставлены следующие параметры установки: угол наклона лопасти 20°, угол атаки лопасти 20°, число лопастей на оси – 4 шт. Число испытуемых воронок составило четыре варианта: d1, d2, d3, d4 (150, 200, 250, 300 мм).

В процессе исследований получены следующие результаты (см. рис. 9.).

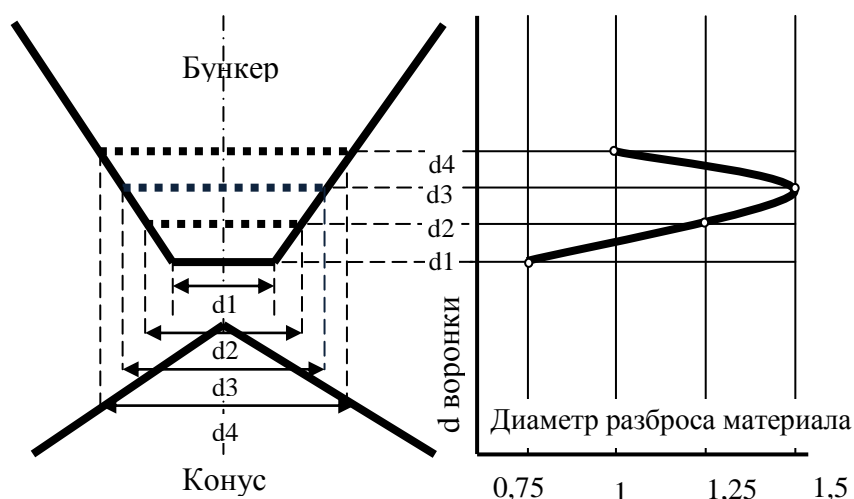


Рисунок 9 – Зависимости влияния диаметра выпускного отверстия на диаметр разброса материала

Максимальный диаметр разброса, равный 1,5 м, приходится на диаметр воронки  $d_3$ . Это обусловлено тем, что поток материала, попадая на рабочую поверхность лопасти, занимает 1/5 часть от ее размера. Далее при центробежном вращении материал распределяется со свободным скольжением по лопастям и отлетает на 1,5 м.

Одним из наиболее значимых показателей процесса загрузки емкостей различного назначения комбикормом и его компонентами является равномерность распределения сыпучего материала по сечению емкости. Графики поверхностей распределения сыпучего материала при загрузке компактной струей и с помощью загрузочно-распределительного устройства приведены на рисунках 10, 11.

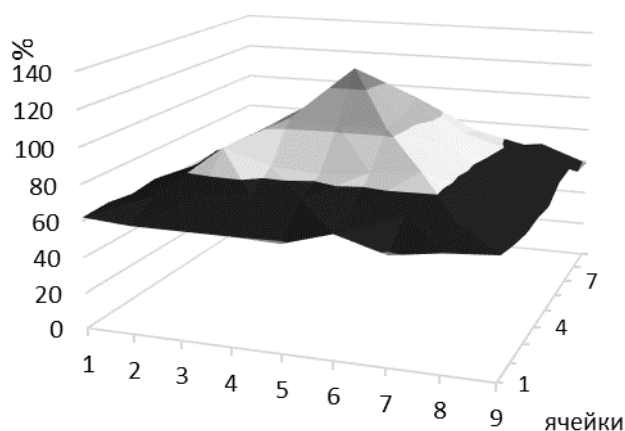


Рисунок 10 – График поверхности распределения сыпучего материала при загрузке компактной струей

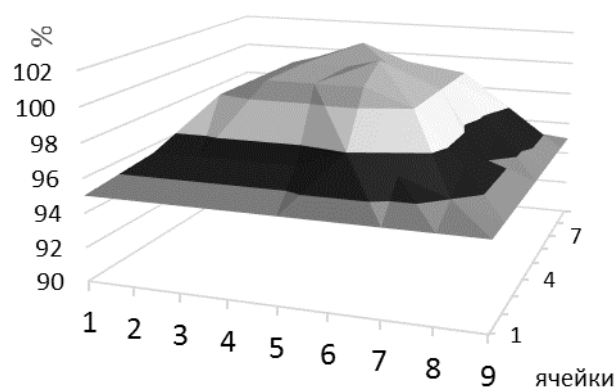


Рисунок 11 – График поверхности распределения сыпучего материала при загрузке с помощью загрузочно-распределительного устройства

Поскольку на технологический процесс загрузки комбикорма оказывают влияние многие факторы одновременно, то для выявления их взаимного влияния проведен многофакторный эксперимент.

За факторы, влияющие на диаметр разброса материала, примем основные конструктивные параметры загрузочно-распределительного устройства: угол атаки лопасти  $x_1$ , угол наклона лопасти  $x_2$  и число рабочих органов  $x_3$ .

Кодировка факторов проводилась по классическим методикам и представлена в таблице 1. На основании полученных данных при помощи программы

Statistica 7.0 for Windows для ПЭВМ построены графики поверхностей (рис.12-14).

Таблица 1 – Кодирование факторов и выбор интервалов их варьирования

Наименование	Значения		
Обозначение факторов	$x_1$	$x_2$	$x_3$
Наименование фактора	Угол атаки лопасти ( $\alpha$ ), °	Угол наклона лопасти ( $\beta$ ), °	Число рабочих органов ( $n$ ), шт.
Базовый уровень	20	20	6
Интервал варьирования	10	10	2
Верхний уровень фактора	30	30	8
Нижний уровень фактора	10	10	4
Функция отклика	Диаметр разброса материала, м		

Результаты экспериментальных исследований были обработаны при помощи программы Statistica 7.011 для ПЭВМ. Проверены однородности дисперсий, статистическая значимость коэффициентов регрессии и адекватности моделей. В результате расчетов было получено уравнение регрессии (в раскодированном виде).

$$d = 2,9839 - 0,081 \cdot \alpha + 0,0103 \cdot \alpha^2 - 0,0898 \cdot \beta + 0,0758 \cdot \beta^2 - 0,084 \cdot n - 0,0154 \cdot n^2 - 0,0006 \cdot \alpha \cdot \beta - 0,0006 \cdot \alpha \cdot n + 0,0081 \cdot \beta \cdot n. \quad (23)$$

Полученное уравнение регрессии (23) позволяет оценить влияние факторов на диаметр разброса материала загрузочно-распределительным устройством и оптимизировать их значения.

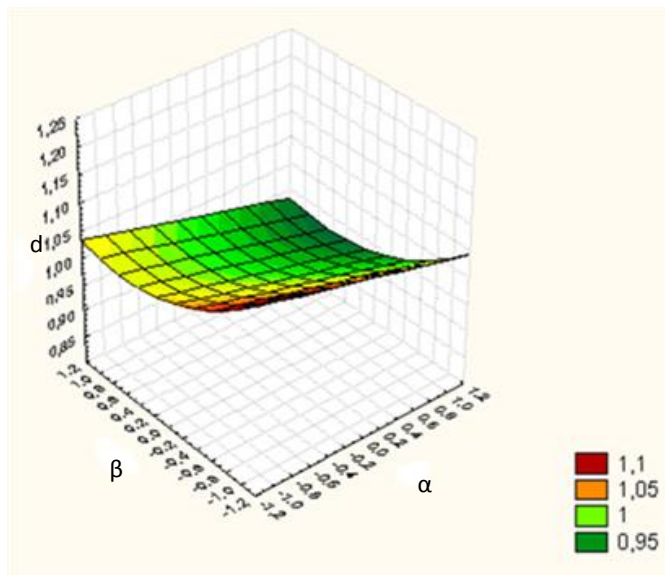


Рисунок 12 –Трехмерный график поверхности влияния угла атаки ( $\alpha$ ) и угла наклона ( $\beta$ ) лопастей на диаметр разброса материала

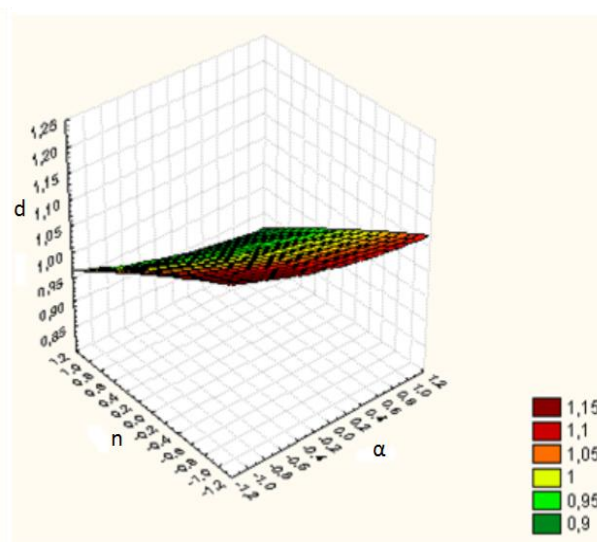


Рисунок 13 – Трехмерный график поверхности влияния угла атаки ( $\alpha$ ) и числа лопастей ( $n$ ) на диаметр разброса материала



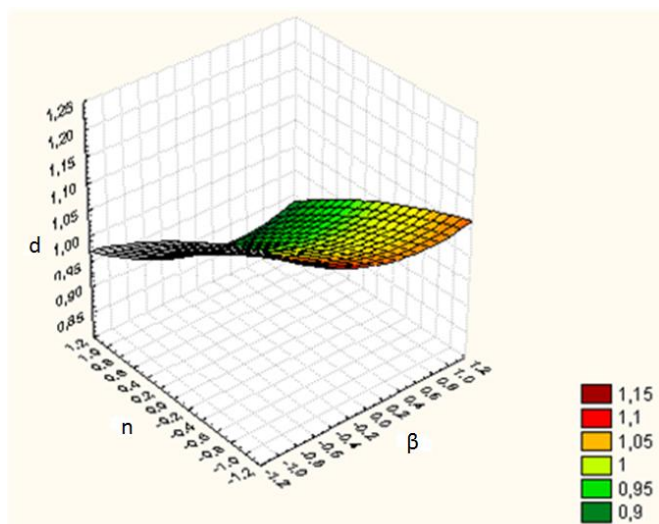


Рисунок 14 – Трехмерный график поверхности влияния угла наклона ( $\beta$ ) и числа лопастей ( $n$ ) на диаметр разброса материала

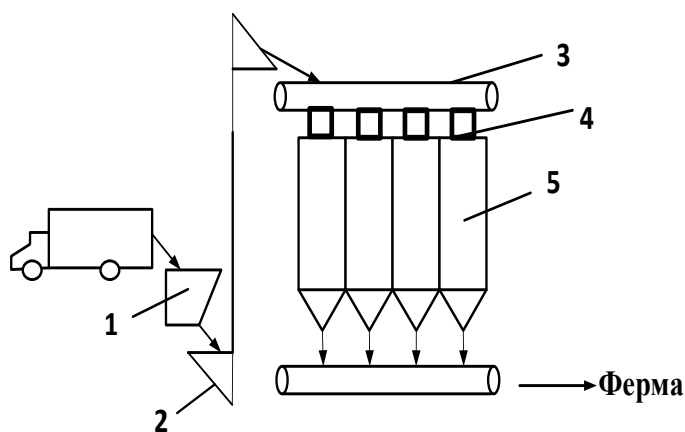


Рисунок 15 – Технологическая схема доставки комбикорма животным в условиях хозяйств:  
1 – приемный бункер с транспорта; 2 – нория;  
3 - транспортер; 4 – загрузочно-распределительные устройства; 5 – бункеры для готовой продукции

чение ее полезного объема на 8%, уменьшение слеживаемости и сегрегации, что способствует лучшему усвоению животными питательных веществ, содержащихся в комбикорме.

Определено место данной конструкции в транспортно-технологических схемах с комбикормом и его компонентами (рис. 15-16).

Величина единовременных капитальных вложений на внедрение предлагаемого загрузочно-распределительного устройства составила 60 тыс. руб. При внедрении предлагаемого устройства в ООО «Агролюкс» ОП «Самарский комбикормовый завод» экономия эксплуатационных расходов составила 186 руб./т, рентабельность производства увеличилась на 4 %. Расчет экономической эффективности использования бесприводного загрузочно-распределительного устройства проводился исходя из цен на 2014 г.

Степень влияния факторов на критерий оптимизации  $y$  (диаметр разброса материала) можно оценить по численному значению коэффициентов, характеризующих вклад каждого фактора в изменение характеристики состояния: угол атаки лопасти ( $\alpha=0,081$ ), угол наклона лопасти ( $\beta=0,898$ ), число рабочих органов ( $n=0,084$ ).

**В четвертой главе «Производственные испытания загрузочного устройства. Экономическая оценка результатов исследований»** приведены результаты производственных испытаний бесприводного загрузочно-распределительного устройства на загрузке мобильной емкости комбикормом в ООО «Агролюкс» ОП «Самарский комбикормовый завод» и рассчитана экономическая эффективность его применения.

Производственные испытания показали, что загрузочно-распределительное устройство с гравитационным приводом работоспособно на загрузке отрубей и комбикорма. При загрузке наблюдалось равномерное распределение материала по сечению емкости и увеличение

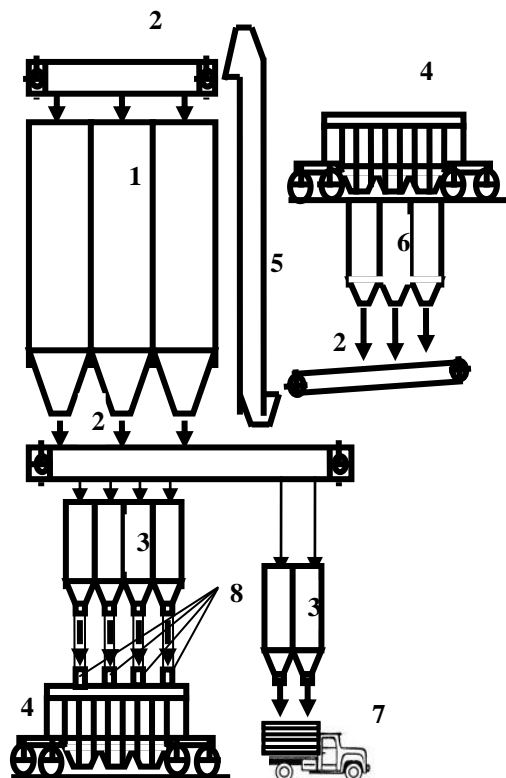


Рисунок 16 - Схема транспортно-технологических операций с компонентами комбикорма :  
 1 – аккумуляющие ёмкости (склад); 2 – ленточный транспортёр;  
 3 – отпускные бункеры; 4 – мобильная емкость; 5 – элеватор; 6 – приёмные бункера; 7 – автомобиль;  
 8 – предлагаемые загрузочно-распределительные устройства

разработанного устройства, позволяющая выявить основные параметры, влияющие на данный процесс, и оценить значимость этих параметров на каждом этапе. Процесс загрузки влияет на равномерность укладки частиц материала, степень сегрегации сыпучей массы, коэффициент использования объема хранилища, динамическое воздействие материала на нижние слои, целостность (повреждение) частиц сыпучей массы.

4. В результате теоретических исследований обоснованы основные параметры загрузочно-распределительного устройства: форма рабочего органа (лопасти), число лопастей, угол атаки лопасти, угол наклона лопасти, угол основания лопасти, длина лопасти. При загрузке емкости высотой 3 м, диаметром 3 м получены следующие параметры загрузочно-распределительного устройства: число лопастей – 4 шт., угол наклона и угол атаки рабочего органа –  $20^\circ$ , угол основания лопасти –  $86^\circ$ , длина рабочего органа – 1,2 м.

В результате экспериментальных исследований были получены следующие результаты функциональных возможностей конструкции: угол атаки лопасти составил  $20^\circ$ ; угол наклона лопасти –  $20^\circ$ ; число рабочих

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного анализа конструктивных схем существующих загрузочных устройств установлено, что при заполнении емкостей различного назначения компактной струей наблюдается слеживаемость, сегрегация комбикорма и его компонентов, снижается коэффициент использования полезного объема хранилищ, наблюдается слеживаемость, сегрегация комбикорма и его компонентов, что негативно влияет на усвояемость кормов животными.

2. Разработана конструкция бесприводного загрузочно-распределительного устройства, защищенная патентом на полезную модель №113515. Предлагаемое загрузочно-распределительное устройство обладает простотой и надежностью конструкции, универсальностью, отсутствием энергозатрат, обеспечивает равномерное распределение комбикорма по всему сечению загружаемой емкости, исключая тем самым слеживаемость, сегрегацию комбикорма и сохраняя его качество.

3. Разработана параметрическая модель функционирования емкости для хранения компонентов комбикорма с применением

лопастей на оси – 4 шт.

5. В результате проведения многофакторного эксперимента получили уравнение регрессии, адекватно описывающие зависимость диаметра разброса материала  $y$  от трех факторов: угла атаки лопасти  $\alpha$ , угла наклона лопасти  $\beta$ , числа рабочих органов  $n$ . Степень влияния факторов на критерий оптимизации  $y$  оценивалась по численному значению коэффициентов, характеризующих вклад каждого фактора в изменение характеристики состояния: угол атаки лопасти ( $\alpha=0,081$ ), угол наклона лопасти ( $\beta=0,898$ ), число рабочих органов ( $n=0,084$ ). Установлено, что результаты экспериментальных и теоретических исследований обладают высокой сходимостью.

6. Производственные испытания показали, что загрузочно-распределительное устройство с гравитационным приводом работоспособно на погрузке отрубей и комбикорма. При загрузке наблюдалось равномерное распределение материала по сечению емкости и увеличение ее полезного объема на 8%. Загрузочно-распределительное устройство пригодно для эксплуатации, является перспективной конструкцией и может служить основой для создания промышленного образца.

7. Производственные испытания показали наличие экономического эффекта от применения загрузочно-распределительного устройства на загрузке мобильной емкости за счет увеличения ее полезного объема на 8%. Экономия эксплуатационных расходов составила 186 руб./т, увеличение рентабельности производства на 4%.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах**

**Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ**

1. Варламов, А.В. Совершенствование процесса загрузки емкостей зерном и продуктами помола / А.В. Варламов, Н.Н. Мазько // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Спец. выпуск: «Проблемы железнодорожного транспорта на современном этапе развития». – Самара: СНЦ РАН, 2006. – С. 20–22.
2. Горюшинский, И.В. Повышение эффективности хранения зерновой продукции в бункерах / И.В. Горюшинский, Н.Н. Мазько // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. - №11. – С. 77–78.
3. Мазько, Н.Н. Результаты экспериментальных исследований бесприводного загрузочно-распределительного устройства для вагонов-хопперов / Н.Н. Мазько // Вестник транспорта Поволжья: научно-технический журнал № 2 (32). – Самара: СамГУПС, 2012. – С. 83–85.
4. Варламов, А.В. Улучшение эксплуатационных показателей вагонов-хопперов путем применения энергосберегающего загрузочно-распределительного устройства / А.В. Варламов, Н.Н. Мазько // Вестник транспорта Поволжья: научно-технический журнал № 1 (31). – Самара: СамГУПС, 2012. – С. 82–87.
5. Варламов, А.В. Применение нового энерго- и ресурсосберегающего оборудования в транспортно-складских комплексах для хранения и переработки сыпучих грузов / А.В. Варламов, Н.Х. Варламова, Н.Н. Мазько // Вестник транспорта Поволжья: научно-технический журнал № 3 (39). – Самара: СамГУПС, 2013. – С. 89–93.
6. Варламов, А.В. Конструкция бесприводного ресурсосберегающего загрузочно-распределительного устройства для компонентов комбикорма / А.В. Варламов, Н.Н. Мазько, А.А. Аверкеев // Известия ОГАУ. – 2014. – № 1.– С. 61–64.
7. Мазько, Н.Н. Результаты экспериментальных исследований бесприводного загрузочно-распределительного устройства для ёмкостей, применяемых в АПК / Н.Н. Мазько // Известия ОГАУ. – 2014. – №2. – С. 83–85.

### Патенты

8. Патент на полезную модель № 113515 RU, МПК В 65 G 65/32, В 65 D 88/54. Устройство для загрузки сыпучих материалов в бункер / А.В. Варламов, Н.Н. Мазько, И.В. Горюшинский; Заявлено 10.03.2011; Опубл. 20.02.2012.

### Другие издания

9. Мазько, Н.Н. К вопросу об исследованиях закономерностей истечения сыпучих материалов из бункеров / Н.Н. Мазько // Тезисы докл. XXX межвузовской науч. конф. студентов и аспирантов. – Самара: СамГАПС, 2003. – С. 154–155.

10. Мазько, Н.Н. Перспективные направления исследований вопросов функционирования емкостей для сыпучих материалов / Н.Н. Мазько // Дни студенческой науки: сб. науч. трудов студентов и аспирантов. – Выпуск 7. – Самара: СамГАПС, 2006. – С. 45–46.

11. Мазько, Н.Н. Классификация загрузочно-распределительных устройств / Н.Н. Мазько // Дни студенческой науки: сб. науч. трудов студентов и аспирантов. – Выпуск 7. – Самара: СамГАПС, 2006. – С. 46–47.

12. Горюшинский, И.В. Моделирование процессов функционирования емкостей для сыпучих материалов / И.В. Горюшинский, А.П. Бахарев, Н.Н. Мазько // Ресурсосбережение и инновации: проблемы и методы решения: сб. статей международной научно-практической конф. – Пенза: ПГУ, 2006. – С. 20–24.

13. Варламов, А.В. Эффективные способы заполнения кузовов транспортных средств сыпучими грузами / А.В. Варламов, Н.Н. Мазько // Труды всероссийской научно-практической конф. «Транспорт-2006». Часть 2. – Ростов-на-Дону, 2006. – С. 176–178.

14. Варламов, А.В. Параметрическая модель функционирования емкостей прирельсовых складов бункерного типа для зерновых грузов / А.В. Варламов, Н.Н. Мазько // Наука, инновации, образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России: материалы международной научно-технической конф. – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – С. 300–301.

15. Мазько, Н.Н. Анализ способов загрузки бункерных хранилищ прирельсовых складов бункерного типа зерновыми материалами / Н.Н. Мазько // Наука, инновации, образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России: материалы международной научно-технической конф. – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – С. 329–330.

16. Варламов, А.В. Обоснование конструктивно-технологических параметров бесприводного загрузочно-распределительного устройства для вагонов-хопперов / А.В. Варламов, Н.Н. Мазько // Управление. Логистика. Экономика: сб. науч. трудов. – Выпуск 3. – Самара: СамГУПС, 2008 – С. 31–34.

17. Варламов, А.В. Оценка качества загрузки емкости зерновыми грузами и продуктами помола / А.В. Варламов, Н.Н. Мазько // Актуальные проблемы развития транспортного комплекса: материалы V Всероссийской научно-практической конф. – Самара: СамГУПС, 2009. – С. 379–381.

18. Мазько, Н.Н. Математическая модель функционирования емкостей для сыпучих грузов / Н.Н. Мазько // Управление. Логистика. Экономика: сб. науч. трудов. – Выпуск 4. – Самара: СамГУПС, 2009 – С.184–186.

19. Мазько, Н.Н. Теоретическое обоснование конструкции и рабочего процесса загрузочно-го устройства для вагонов-хопперов / Н.Н. Мазько // Актуальные проблемы развития транспортного комплекса: материалы VI Всероссийской научно-практической конф. – Самара: СамГУПС, 2010. – С.170–172.

Подписано в печать 21 апреля 2015 г.

Формат 60×84 1/16. Усл. печ.л. 1,0. Печать оперативная.

Бумага офсетная. Заказ № \_\_\_\_. Тираж 100 экз.

Издательский центр ОГАУ

4460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18. Тел. (3535)77-61-43

Отпечатано в Издательском центре ОГАУ