

*На правах рукописи*



**МАКАРОВА НАТАЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНО-РОТОРНЫХ  
ДИСМЕМБРАТОРОВ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ  
ЖИДКИХ КОРМОВ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

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

**Барнаул 2015**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (ФГБОУ ВПО АлтГТУ)

**Научный руководитель -**

доктор технических наук, профессор  
**Ситников Александр Андреевич**

**Официальные оппоненты -**

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

**Бахарев Геннадий Филиппович,**  
кандидат технических наук, старший научный  
сотрудник, заведующий сектором технологиче-  
ского и технического обеспечения животноводст-  
ва, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Сибир-  
ский научно-исследовательский институт меха-  
низации и электрификации сельского хозяйства»  
(ФГБНУ СибИМЭ)

**Ведущая организация**

Федеральное государственное бюджетное обра-  
зовательное учреждение высшего профессио-  
нального образования «Новосибирский государ-  
ственный аграрный университет» (ФГБОУ ВПО  
НГАУ)

Защита состоится 24 ноября 2015 года, в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационно-  
го совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038 г. Барнаул, пр. Ленина, 46;  
тел./факс 8 (3852) 36-71-29; <http://www.altstu.ru>; e-mail: [ntsc@desert.secna.ru](mailto:ntsc@desert.secna.ru), [el-nis@inbox.ru](mailto:el-nis@inbox.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский  
государственный технический университет им. И.И. Ползунова» и на официальном  
сайте университета <http://www.altstu.ru/media/f/Dissertaciya-Makarova.pdf>

Автореферат разослан «24» сентября 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

 Куликова Лидия Васильевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одной из тенденций в развитии современного животноводства является создание машин для приготовления жидких кормов из зернового материала. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, в рационах сельскохозяйственных животных зерновые корма занимают более 50%. Такая большая доля объясняется большим содержанием в зерне протеина и высокой энергетической ценностью кормов из зерновых культур. Кроме того, зерно удобно хранить и транспортировать. При этом зерновые корма необходимо подготавливать к скармливанию. Наиболее эффективным считается приготовление жидкого корма в виде измельченного до мелкого помола и подогретого зерна. Такое приготовление кормов повышает усвояемость корма, снижает риск желудочно-кишечных отравлений из-за термической обработки корма. Также жидкий корм лучше подходит для автоматической раздачи и точного дозирования.

Среди устройств для приготовления жидких кормов особое место занимают дисмембраторы. Установки такого типа просты в изготовлении и использовании и имеют меньшую удельную стоимость по отношению к единице произведенной продукции. Но, и как любая инновация, дисмембраторы нуждаются в совершенствовании.

При такой распространенности дисмембраторов, существует множество решений конструктивного исполнения их рабочих органов. Работа исследователей по разработке модели рабочих органов дисмембратора, позволяющей готовить корма наилучшего качества, во многом опирается на конструкторскую интуицию из-за недостаточно разработанной теории работы таких конструкций.

Одним из перспективных путей повышения эффективности производства жидких кормов является изучение влияния конструктивных параметров рабочих органов дисмембраторов на качество получаемого корма и разработка на основе этих закономерностей более эффективных установок.

На основании вышеизложенного, исследования, направленные на повышение эффективности процесса приготовления жидких кормов путем оптимизации конструкции рабочих органов дисмембратора являются актуальными и имеют научный и практический интерес.

**Цель работы** - повышение эффективности процесса приготовления и повышение качества жидких кормовых смесей в центробежно-роторных дисмембраторах путем оптимизации их конструктивных параметров.

**Объект исследования** - технологический процесс измельчения фуражного зерна в жидкой среде в центробежно-роторном дисмембраторе.

**Предмет исследования** - влияние конструктивных параметров рабочих органов дисмембраторов на эффективность измельчения фуражного зерна в жидкой среде в центробежно-роторном дисмембраторе.

В соответствие с поставленной целью необходимо решить следующие **задачи исследования**:

1. Разработать методику моделирования функционирования рабочих органов дисмембратора для приготовления жидких кормов. Исследовать закономерности в поведении рабочей среды при взаимодействии с рабочими органами.

2. Разработать методику оптимизации рабочих органов дисмембратора для приготовления жидких кормов.

3. Экспериментально подтвердить эффективность оптимизированных рабочих органов дисмембратора.

4. Провести производственную проверку и дать технико-экономическую оценку результатов исследования.

**Методы исследования.** Компьютерное моделирование рабочих органов дисмембратора центробежно-роторного типа (в программе Ansys CFX), методика оптимизации конструктивных параметров рабочих органов с помощью нейронной сети (в среде MATLAB), методика проведения экспериментальных исследований. Предложенные оптимизированные рабочие органы универсального приготовителя жидких кормов испытывались в лабораторных условиях. Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментальной проверкой на кормоприготовительных установках. Погрешность опытов - не более 5%. Обработка результатов экспериментальных исследований осуществлялась на ПЭВМ с использованием пакетов программ Excel, ORIGIN 6.0.

#### **Научную новизну работы представляют:**

1. Компьютерное моделирование процесса приготовления жидкого корма в центробежно-роторном дисмембраторе.

2. Методика оптимизации конструктивных параметров рабочих органов дисмембратора для приготовления жидких кормов.

3. Полученные математические зависимости, характеризующие влияние конструктивных параметров рабочих органов центробежно-роторного дисмембратора (ширина ряда зубьев ротора; зазор между рядом зубьев статора и впадиной ротора, а также между рядом зубьев ротора и впадиной статора; количество рядов ротора; ширина зуба по внешнему краю; ширина впадины по внешнему краю; высота зуба; высота впадины; угол заточки зуба; зазор между статором и ротором) на модуль помола зерна, температуру смеси и производительность установки.

4. Новое техническое решение рабочих органов центробежно-роторного дисмембратора для приготовления жидких кормовых смесей.

**Достоверность** основных положений и выводов подтверждена результатами моделирования и экспериментальных исследований.

**Практическая значимость работы** состоит в разработке и исследовании устройства для приготовления жидких кормовых смесей, позволяющего получить кормовую смесь более высокого качества без увеличения энергоемкости. Результаты исследований позволят увеличить эффективность оборотования для приготовления жидких кормов.

**Практическая ценность** работы подтверждена патентом на полезную модель (RU №121756), патентом на промышленный образец (RU №87651), патентом на изобретение (RU №253165), свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ (RU №2012616867), результатами лабораторных исследований.

**Реализация результатов исследований.** Результаты научной работы используются в учебном процессе Алтайского государственного технического университета им. И.И.Ползунова, что подтверждено актом внедрения. Техническая документация на изготовление установки УПК/М-40 передана в ООО «Малое инновационное предприятие сельскохозяйственного машиностроения АлтГТУ».

**Апробация.** Основные положения работы и результаты исследований были доложены на 70-ой и 71-ой научно-технических конференциях студентов, аспирантов и ППС АлтГТУ (2012 – 2013 гг., г. Барнаул); на X Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (2013 г., г. Барнаул), XI Региональной научно-практической конференции молодых ученых Сибирского федерального округа «Актуальные проблемы развития АПК в работах молодых ученых Сибири» (2015 г., г. Новосибирск). Результаты диссертации докладывались на научных семинарах кафедр «Сельскохозяйственное машиностроение», «Автомобили и тракторы», «Автомобили и автомобильные хозяйства», «Наземные транспортно-технологические системы» (АлтГТУ, Барнаул) в 2012-2015 годах.

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы изложены в 9 научных работах, в том числе 2 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, получен 1 патент на полезную модель, 1 патент на изобретение, 1 патент на промышленную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Объем диссертации - 230 стр., в том числе 135 стр. основного текста, 49 рисунков, 13 таблиц; список литературы включает в себя 109 наименований, в том числе 3 на иностранном языке.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- методика компьютерного моделирования функционирования рабочих органов дисмембратора для приготовления жидких кормов, позволяющая

оценить модуль помола зерна, производительность установки и степень нагрева смеси;

- результаты компьютерного моделирования, позволяющие изучить физические процессы, происходящие во время работы установки;

- методика оптимизации рабочих органов дисмембратора для приготовления жидких кормов.

- результаты экспериментальных исследований по определению гранулометрического состава получаемой смеси, зависимости температуры смеси и потребляемой мощности от времени работы установки.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, авторам-предшественникам, соавторам, коллегам и многим другим лицам, у которых автор училась, и с кем ей приходилось сотрудничать и общаться в ходе выполнения и апробации данной работы!

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** кратко изложена актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость и основные научные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** «Состояние проблемы по производству жидких кормов и задачи исследования» включила в себя анализ зоотехнических требований к кормам для сельскохозяйственных животных, рассмотрение основных способов подготовки кормов к скармливанию и конструкций устройств, осуществляющих соответствующие технологические процессы. В результате установлено:

1. Перед отраслью животноводства стоит важнейшая задача модернизации. При этом в структуре себестоимости животноводческой продукции на корма приходится до 70%. Поэтому для развития любой отрасли животноводства критично развитие кормопроизводства. Инновации в данной области должны быть направлены на выполнение рекомендаций по эффективному кормлению сельскохозяйственных животных.

2. В структуре рационов сельскохозяйственных животных удельный вес зерна довольно высок. Так, для свиней он составляет от 60 до 100%.

3. В подготовке зерновых кормов важное место занимают измельчение и запаривание, позволяющие улучшить вкусовые качества и перевариваемость продукта. Считается, что жидкие корма имеют лучшую усвояемость, а также при их использовании легче проводить автоматизацию кормораздачи.

4. Среди существующих установок для измельчения зерна наиболее эффективными считаются дробилки ударного типа, так как напряжения, возникающие при динамическом нагружении, значительно выше, чем при статическом.

5. Особое место среди дробилок ударного типа занимают дисмембраторы. Так же они наилучшим образом подходят для совмещения технологических операций измельчения и запаривания и для производства жидких кормов.

6. Анализ исследований, посвященных обоснованию конструкций центробежно-роторных дисмембраторов для приготовления жидких кормов показал, что, хотя отдельные исследования были проведены, не разработано подходящей методики по расчету эффективных конструкций установок данного типа.

Научными основами теории резания, измельчения и процессов приготовления кормов являются труды академика В.П. Горячкина. Большой вклад в науку по измельчению зернового материала и приготовления кормов в целом внесли А.А. Артюшин, В.А. Елисеев, И.Ф. Василенко, Н.В. Сабликов, А.А. Зеленов, А.П. Макаров, Я.Н. Куприц, С.В. Мельников, В.А. Сысуев, В.Г. Коба, В.И. Пахомов, П.И. Леонтьев, П.А. Савиных, В.А. Зяблов, А.И. Завражных, Г.М. Кукта, Е.А. Маркарян, П.М. Рошин, Н.В. Суддеев, П.А. Кормщиков, В.Д. Денисов, В.И. Сыроватка, С.Д. Хусид, В.И. Земсков, В.А. Голиков, М.И. Тищенко, С.В. Золотарев, И.Я. Федоренко, Н.С. Сергеев, В.Р. Алешкин, И.К. Хлебников, В.П. Ожигов, С.М. Доценко, В.Ю. Фролов, Ю.Б. Курков, А.В. Бурмага, П.А. Патрин, У. К. Сабиев, Г.Ф. Бахарев и другие ученые. Процесс получения жидких кормовых смесей исследовали Н.В. Ньюшков, В.В. Старцева, В.В. Аксенов и др.

Анализ состояния научно-технической проблемы позволил сформулировать цель и задачи для ее решения.

**Во второй главе** «Моделирование работы дисмембратора» представлены результаты конечно-элементного моделирования процесса движения смеси зерна и воды через рабочие органы дисмембратора.

Учитывались явления турбулентности и теплопроводности. Расчет проводился динамическим (т.е. учитывался временной фактор), так как сложная геометрия рабочих органов приводит к нестационарности потока. Зерно моделировалось твердыми частицами с характерной плотность, теплопроводностью и пределом прочности. В основе математической модели лежит система нестационарных уравнений Навье-Стокса в их консервативной форме.

Для численного моделирования гидродинамических процессов в центробежно-роторном дисмембраторе использовался пакет прикладных программ ANSYS CFX.

На рисунке 1 показаны контурные диаграммы распределения давления внутри потока жидкости за 1 с. работы установки. На графиках отчетливо видны зоны с повышенным давлением и зоны разряжения. Зоны повышенного давления образуются в момент, когда поток жидкости наталкивается на движущийся зуб рабочего органа. В этот момент жидкость ведет себя как

сжимаемая и происходит скачок давления. Создаются условия для возникновения гидроудара. По сути, это классическое возникновение гидроудара при резком закрытии заслонки. Зоны разряжения - это зоны, создающиеся за движущимся зубом.

Также в момент столкновения потока с зубом происходит возрастание температуры потока. Это тоже следствие сжимания жидкости – уменьшается расстояние между молекулами жидкости и повышается кинетическая энергия. На рисунке 11 видно ступенчатое нарастание температуры от центра к периферии. Это логичный результат, так как при каждом прохождении ряда зубьев увеличивается количество столкновений потока с заслонками.

Если посмотреть на диаграммы скорости, представленные на рисунке 10, и сравнить с диаграммами давления, то картина прямо противоположная: скорость выше там, где давление ниже. Это объясняется тем, что после открытия заслонки создается зона пониженного (даже отрицательного давления) и поток жидкости «втягивается» в это пространство.

Поток жидкости втягивается по двум причинам. Первая – перепад давления между состояниями с закрытой и открытой заслонкой. Рисунок 12 поясняет вторую причину. Поток, ударяясь о преграду, турбулизируется и приобретает дополнительную энергию турбулентности. После открытия заслонки поток с добавочной скоростью устремляется в зону пониженного давления.

Таким образом, конструкция центробежно-роторного дисмембратора создает условия для явления гидроудара. Это явление благоприятно в случае размола зерна, так как позволяет дополнительно размягчить внешнюю жесткую оболочку зерна.

На рисунке 2 представлен результат моделирования воздействия на зерно ячменя давлений, создаваемых в установке. Как видно из рисунка, полного разрушения зерна не происходит, но оболочка зерна теряет целостность при некоторых уровнях давления.

Таким образом, создаваемый в установке гидроудар позволяет частично нарушить целостность зерна, что облегчает последующее разрезание режущими элементами (нужно прикладывать меньшую силу резания), а значит, уменьшает потребляемую установкой мощность.

Для оценки модуля помола зернового материала необходимо проследить путь частицы и посчитать количество столкновений зерна с режущими элементами дисмембратора. Маршрут частицы представлен на рисунке 3.

Таким образом, частица при своем движении в каналах роторного дисмембратора сталкивается с режущими поверхностями 3 раза. Будем считать, что каждый раз частица разрезается напополам. Считая эквивалентный диаметр зерна ячменя равным 4,2 мм. можно оценить модуль помола зернового материала, достигаемый данной установкой. Результаты приведены в таблице 1.



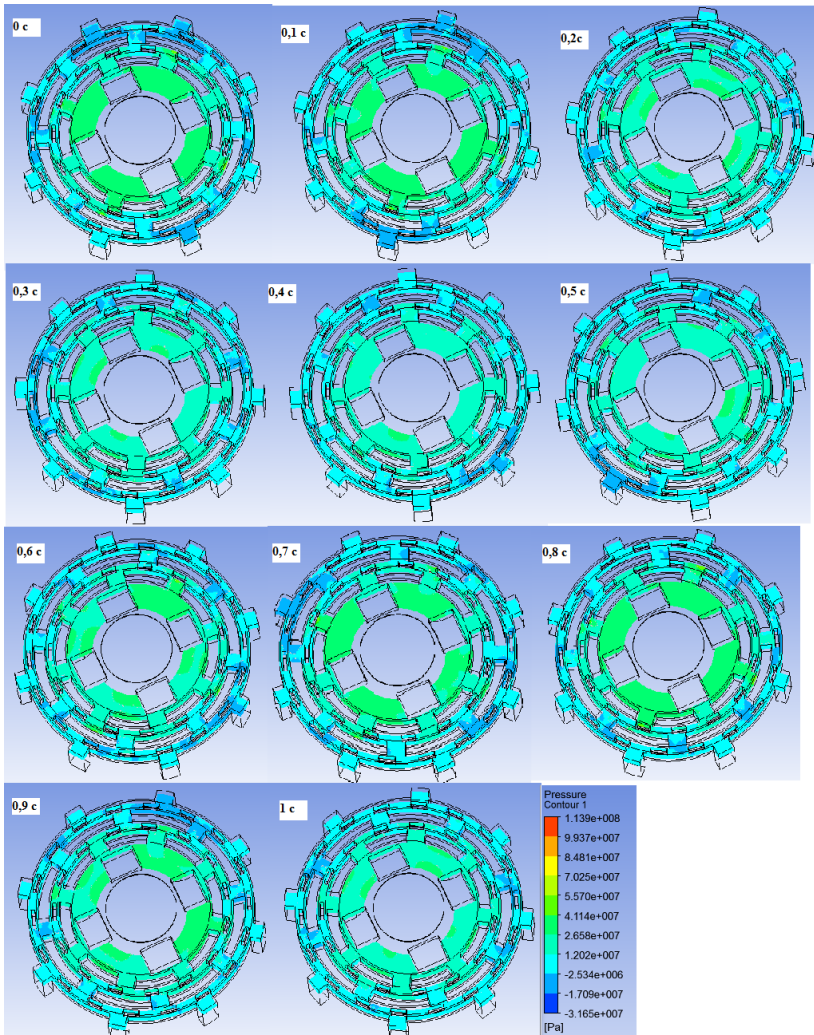


Рисунок 1 – Контурные диаграммы давления жидкости внутри дисембратора

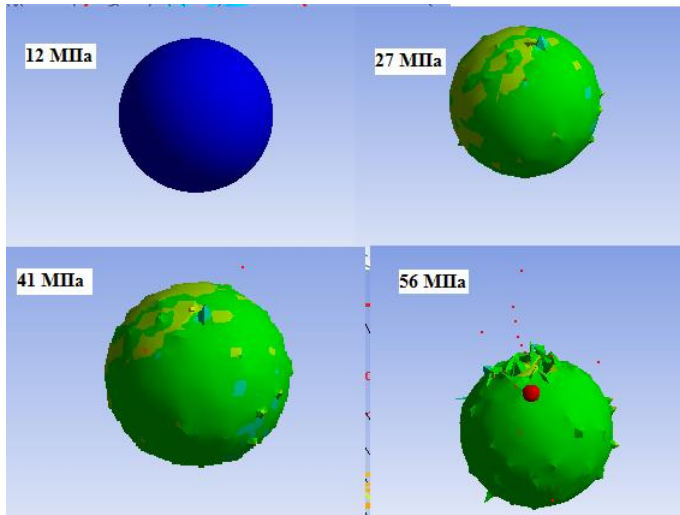


Рисунок 2 – Моделирование воздействия на зерно давлений, возникающих в зерновой смеси

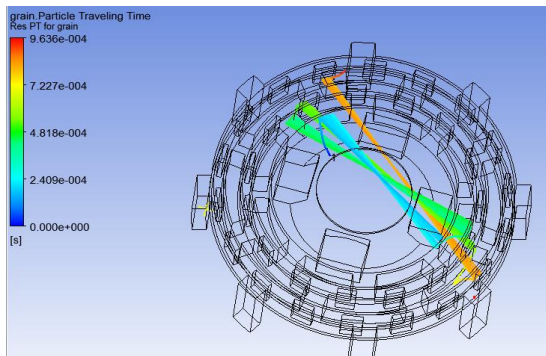


Рисунок 3 – Диаграмма времени движения частицы в каналах дисембратора

Таблица 1 – Определение модуля помола зерна

№ столкновения	Время столкновения	Модуль помола
1	$2,4 \cdot 10^{-4}$ с.	$4,2/2=2,1$ мм.
2	$4,8 \cdot 10^{-4}$ с.	$2,1/2=1,05$ мм.
3	$7,2 \cdot 10^{-4}$ с.	$1,05/2=0,5$ мм.

Итоговый модуль помола равен 0.5 мм.

Таким образом, во второй главе:

1. Разработана программа, позволяющая рассчитывать рациональные параметры рабочих органов дисмембратора для механоактивационной обработки органического сырья (Свидетельство о регистрации программы № 2012616867).

2. Разработана методика компьютерного моделирования функционирования рабочих органов дисмембратора для приготовления жидких кормов, позволяющая оценить модуль помола зерна, производительность установки и степень нагрева смеси.

3. При анализе результатов моделирования выявлены следующие закономерности в момент, когда поток жидкости наталкивается на движущийся зуб рабочего органа: образуются зоны повешенного давления, жидкость ведет себя как сжимаемая, и создаются условия для возникновения гидроудара, происходит возрастание температуры потока, вследствие уменьшения расстояния между молекулами жидкости и повышается кинетическая энергия.

4. Создаваемый в установке гидроудар позволяет частично нарушить целостность зерна, что уменьшает необходимую меньшую силу резания, а значит, уменьшает потребляемую установкой мощность.

5. Гидродинамический анализ работы установки УПК-40 выявил:

- модуль помола ячменя, достигаемый установкой, равен 0,5 мм, что на 15% отличается от данных, полученных экспериментально;
- производительность установки (массовый поток через поверхность рабочих органов) равна 25,6 кг/ч;
- загрузка рабочих органов происходит равномерно;
- смесь нагревается до 3,7°C, при этом рекомендуемый уровень нагрева смеси 40°C.

**В третьей главе** «Оптимизация геометрии рабочих органов дисмембратора при помощи нейронной сети» была проведена оптимизация геометрии рабочих органов дисмембратора. Оптимизация проводилась нейронной сетью. Для этого сначала была проведена параметризация ротора и статора и установлены целевые значения показателей модуля помола, температуры смеси и производительности установки.

Задача параметрической оптимизации была сформулирована следующим образом.

Основными выходными параметрами выберем следующие:

- средний диаметр частиц после помола ( $y_1$ , мм);
- температура смеси ( $y_2$ , °C).

Условия работоспособности следующие:

$$y_1=0.5\pm 0.3; \quad y_2=40\pm 5.$$

Перед скармливанием зерно рекомендовано измельчать, так как при этом увеличивается площадь взаимодействия с пищеварительными ферментами в желудках животных, а значит, повышается усвояемость корма. Опти-

мальным размером частиц в кормах для свиней следует считать 600-700 мкм. Содержание частиц с размером менее 1 мм должно составлять 75%. То есть эффективным считается мелкий помол корма (0,2-1 мм). При этом присутствие в корме пылевидных частиц диаметром меньше 0,2 мм крайне нежелательно, так как приводит к слишком быстрому прохождению корма по желудочно-кишечному тракту и увеличивает риск развития язв у свиней.

Оптимальной температурой смеси считается 40°C. Это температура организма свиньи. Если использовать не подогретый корм, то для начала пищеварительного процесса ему нужно будет нагреться в желудке животного, а значит, будет тратиться часть питательных веществ, получаемых животным. Понятно, что между приготовлением и скармливанием корм транспортируют от цеха до кормушки. За это время происходит охлаждение корма, поэтому нагревать его следует выше оптимальной температуры. Поэтому допустимым признан диапазон нагрева корма от 40°C до 60°C.

Управляемые параметры следующие:

- 1)  $L_r$  – ширина ряда зубьев ротора;
- 2)  $Z$  – зазор между рядом зубьев статора и впадиной ротора, а также между рядом зубьев ротора и впадиной статора;
- 3)  $K_r$  – количество рядов ротора;
- 4)  $A$  – ширина зуба по внешнему краю;
- 5)  $B$  – ширина впадины по внешнему краю;
- 6)  $H_z$  – высота зуба;
- 7)  $H_{вп}$  – высота впадины;
- 8)  $G$  – угол заточки зуба;
- 9)  $P$  – зазор между статором и ротором.

Далее были получены 100 наборов данных, необходимых для обучения нейронной сети. Данная задача решалась следующим образом: так как провести натуральных эксперимент на таком количестве вариантов установок не представляется возможным, проводился виртуальный эксперимент. Был разработан план проведения виртуального эксперимента, проведен эксперимент и получены результаты. Далее по этим результатам была построена регрессионная модель и получена обучающая выборка.

В итоге после обработки данных виртуального эксперимента получены следующие регрессионные зависимости:

1) Зависимость модуля помола от параметров рабочих органов дисембратора:

$$Y1 = 2.776 - 0.015L_r + 0.001Z - 0.46K_r + 0.019A + 0.017B - 0.023H_z - 0.015H_{вп} - 0.008G + 0.012P \quad (1)$$

2) Зависимость температуры смеси от параметров рабочих органов дисембратора:

$$Y2 = 28.276 + 0.016L_r - 0.117Z + 0.732K_r - 0.091A - 0.062B + 0.084H_z - 0.026H_{вп} - 0.051G + 0.032P \quad (2)$$

3) Зависимость производительности установки от параметров рабочих органов дисмембратора:

$$Y_3 = 1181 - 1.448L_r - 17.838Z - 168.938K_r - 1.981A - 6.706B + 6.756H_3 + 6.481H_{en} - 3.406G - 13.488P \quad (3)$$

Проверка значимости коэффициентов модели показала, что все факторы являются значимыми, а значит, выбор параметров был осуществлен верно.

Коэффициенты детерминированности моделей равны, соответственно, 0,92; 0,85 и 0,78. Значит, эти модели можно использовать для предсказания значений.

С помощью этих формул была получена обучающая выборка для нейронной сети. Работа с нейронной сетью осуществлялась в пакете Neural Networks Toolbox системы MATLAB.

На рисунке 4 представлена архитектура нейронной сети.

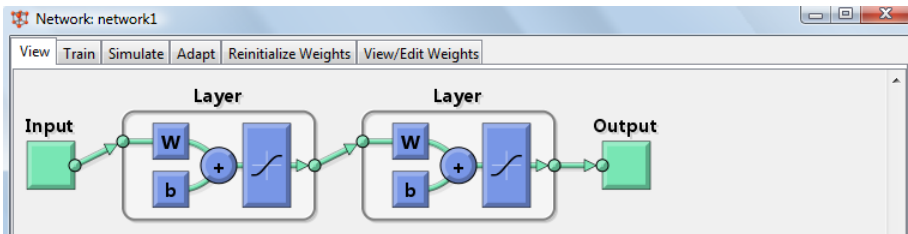


Рисунок 4 – Архитектура сети

На рисунке отражены входной вектор (Input), два скрытых слоя с функцией активацией в виде гиперболического тангенса и выходной вектор (Output).

После применения нейронной сети были получены параметры оптимизированной модели рабочих органов дисмембратора, позволяющие достичь заданных целевых параметров.

В четвертой главе «Экспериментальные исследования оптимизированных рабочих органов устройства для приготовления жидких кормов» проведены экспериментальные сравнения оптимизированной конструкции дисмембратора с прототипом: установкой «УПК-40».

Для исследования влияния конструктивных параметров рабочих органов был использован экспериментальный стенд. На стенд получен патент на полезную модель №121756.

Согласно рисунку 5 стенд содержит загрузочную емкость 1 для перерабатываемого материала и жидкости и механоактиватор, который выполнен в виде неподвижного корпуса 2 с входным 3 и выходным 4 патрубками. В не-

подвижном корпусе 2 соосно закреплены верхний 5 и нижний 6 горизонтальные диски, привод которых осуществляется от электродвигателя 7, связанного с блоком управления 8. Также стенд содержит раму 9 и термопреобразователь 10. Загрузочная емкость 1 посредством трубопроводов 13 и 14 соединена с входным 3 и выходным 4 патрубками неподвижного корпуса 2 механоактиватора. Сменная загрузочная емкость 1 размещена на кронштейне 15, смонтированном на раме 9. Неподвижный корпус 2 сменного механоактиватора закреплен на одной из сторон фланца 16, укрепленного на раме 9, а на другой стороне фланца 16 размещен сменный электродвигатель 7, связанный с частотным преобразователем (на чертеже не показан) блока управления 8, предназначенным для плавной и ступенчатой регулировки частоты вращения вала. Мощность сменных электродвигателей 7 может меняться в пределах от 1,5 до 30 кВт. При этом на каждом из трубопроводов 13 и 14 установлены датчик давления 17 и термопреобразователь 10.

Стенд работает следующим образом. Корм и вода в соотношении 1 к 2, помещается в сменную загрузочную емкость 1. За счет веса и разряжения, создаваемого вращающимся нижним 6 горизонтальным диском относительно неподвижного верхнего 5 горизонтального диска, через входной патрубок 3 жидкая суспензия поступает в неподвижный корпус 2 механоактиватора. В зазорах, то есть в рабочих зонах, между верхним 5 и нижним 6 горизонтальными дисками, за счет использования гидроударов и завихрений происходит измельчение сырья и его нагрев с получением мелкодисперсной легко усвояемой сельскохозяйственными животными фракции. Крепление сменных электродвигателей 7 на фланце 16 позволяет изменять марку и мощность электродвигателя привода установки в пределах от 1,5 до 30 кВт в зависимости от объемов перерабатываемого материала и жидкости, находящихся в сменной загрузочной емкости 1. Кроме того, блок управления 8 содержит частотный преобразователь (на чертеже не показан), с помощью которого можно плавно и ступенчато регулировать частоту вращения вала сменного электродвигателя 7. Два датчика давления 17 и два термопреобразователя 10, установленные на трубопроводах 13 и 14, дают возможность контролировать соответственно - давление и температуру. Использование показаний измерительных приборов и возможность варьирования параметрами стенда позволяет получать информацию для определения производительности по перерабатываемому материалу и жидкости, снимать характеристики работы привода на различных режимах работы в зависимости от нагрузки и объема приготовления гомогенизированных продуктов, определять теплофизические и гидравлические характеристики устройства, расход жидкости и двухфазной среды, определять скорости нагрева продукта с учетом полученного тепла и коэффициент полезного действия устройства, находить оптимальные режимы работы по производительности и энергозатратам с обеспечением требуемого гранулометрического состава корма.

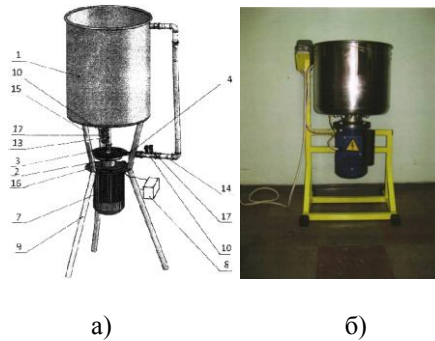


Рисунок 5 – Общий вид экспериментального стенда

На рисунке 6 представлены графики средних значений температуры в зависимости от времени.

Видно, что в целом график зависимости оптимизированной конструкции имеет более крутой подъем. Это свидетельствует о более быстром нагреве смеси. Данный результат объясняется больше шириной зубьев у оптимизированной конструкции по сравнению с прототипом. Смесь дольше трется о стенки ротора и статора, а значит и быстрее нагревается.

Был проведен гранулометрический анализ образцов смеси, взятый их обоих устройств, при достижении смеси заданной температуры.

На рисунке 7 представлен снимок зерновой смеси из установки прототипа, на рисунке 8 – диаграмма гранулометрического состава из прототипа.

На рисунке 9 представлен снимок зерновой смеси из оптимизированной установки, на рисунке 10 – диаграмма гранулометрического состава из оптимизированной установки.

В таблице 2 приведен пример правильного дробления сырья для жидкого корма.

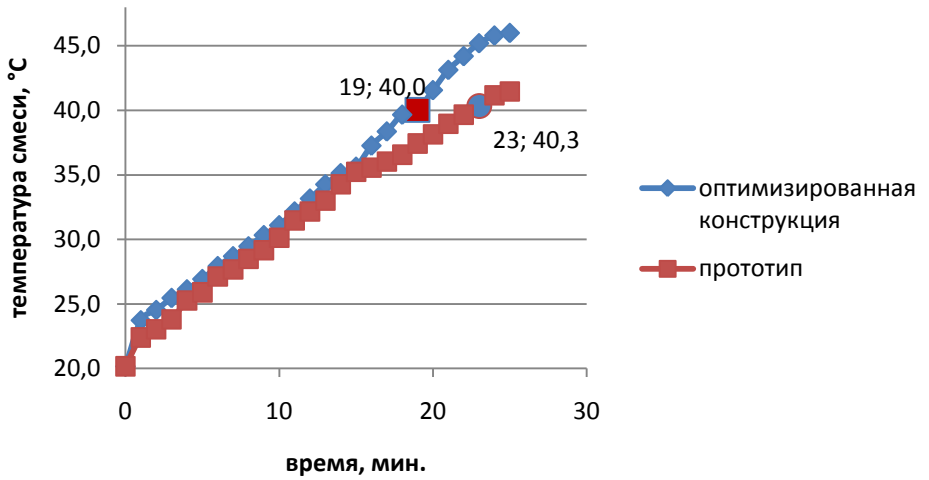


Рисунок 6 – Зависимость температуры смеси от времени протекания процесса

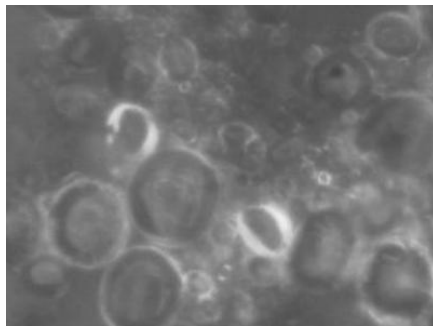


Рисунок 7 – Снимок зерновой смеси из УПК-40



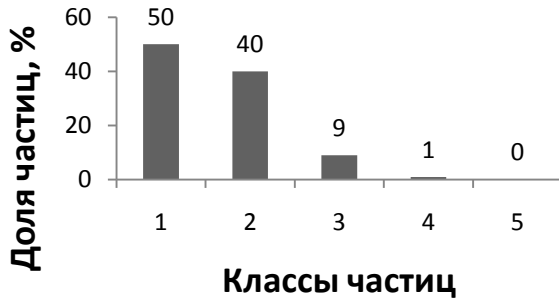


Рисунок 8 – Гранулометрический состав смеси из УПК-40

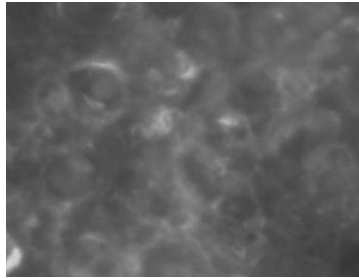


Рисунок 9 – Снимок зерновой смеси из оптимизированной установки

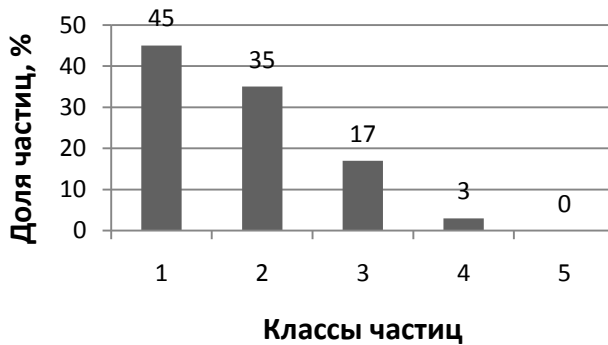


Рисунок 10 – Гранулометрический состав смеси из оптимизированной установки

Таблица 2 – Фракционный состав сырья для жидкого корма

Фракция, мм.	Процент, %
>2,8	0
>2<2,8	2
>1<2	21
>0,5<1	37
<0,5	40

Из анализа гистограмм видно, что образец оптимизированной конструкции по своему гранулометрическому составу практически полностью совпадает с рекомендуемым, в то время как образец прототипа имеет менее равномерный состав.

Так же важно отметить, что 40°С смесь в оптимизированной конструкции достигает на 19-ой минуте работы установки, а в прототипе – лишь на 23-ей.

Это означает, что оптимизированной конструкции для достижения целевых показателей нужно работать на 4 минуты меньше, то есть она имеет более высокую производительность по сравнению с прототипом.

**В пятой главе** «Производственные испытания и экономическая эффективность оптимизированной конструкции дисмембратора для приготовления жидких кормов» приведены результаты испытаний установки для приготовления кормов, разработанной на основе проведенных исследований, а также расчет эффективности инноваций - внедрения в производство разработанной установки, прототипа (установки УПК-40) и альтернативной конструкции («ФЕРМЕР-600»).

По результатам исследований был разработан промышленный образец кормоприготовительного агрегата под предложенной нами маркой УПК/М-40 (Патент на промышленный образец № 8765, Патент на изобретение №253165). За основу взят агрегат УПК-40, в котором рабочие органы заменены оптимизированными.

Устройство УПК/М-40 прошло испытания в ООО «Контрольно-Диагностический центр». В ходе испытаний были получены следующие результаты (в сравнении с установкой УПК-40):

1. Снижение расхода электроэнергии на 14%.
2. Снижение расхода воды при приготовлении кормовых смесей на 10%.
3. Снижение расхода зерновой смеси на 12%.
4. Снижение времени приготовления с 40 мин. до 30 мин.
5. Срок окупаемости установки – 10 мес.

Экономический эффект от внедрения инновации в производство составляет 600000 руб., что на 6% выше, чем у прототипа (установки УПК-40)

и почти в два раза больше соответствующего показателя у альтернативной разработки («ФЕРМЕР-600»).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Общие выводы

Проведенные исследования по совершенствованию центробежно-роторных дисмембраторов для приготовления жидких кормов позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана методика компьютерного моделирования функционирования рабочих органов дисмембратора для приготовления жидких кормов, позволяющая оценить модуль помола зерна, производительность установки и степень нагрева смеси. При анализе результатов моделирования выявлены следующие закономерности в момент, когда поток жидкости наталкивается на движущийся зуб рабочего органа: образуются зоны повешенного давления, жидкость ведет себя как сжимаемая, и создаются условия для возникновения гидроудара, происходит возрастание температуры потока, вследствие уменьшения расстояния между молекулами жидкости и повышается кинетическая энергия. Создаваемый в установке гидроудар позволяет частично нарушить целостность зерна, что уменьшает необходимую силу резания, а значит, уменьшает потребляемую установкой мощность.

2. Произведена параметризация ротора и статора, в результате которой получены параметры, позволяющие полностью описывать конструктивные параметры рабочих органов дисмембратора.

Разработана методика оптимизации рабочих органов дисмембратора для приготовления жидких кормов. С помощью разработанной методики получены параметры оптимизированной геометрии рабочих органов:

- 1) ширина ряда зубьев ротора  $L_r = 17$  мм;
- 2) зазор между рядом зубьев статора и впадиной ротора  $Z = 6.3$  мм;
- 3) количество рядов ротора  $K_r = 2$ ;
- 4) ширина зуба по внешнему краю  $A = 25$  мм;
- 5) ширина впадины по внешнему краю  $B = 30$  мм;
- 6) высота зуба  $H_z = 30$  мм;
- 7) высота впадины  $H_{вп} = 23$  мм;
- 8) угол заточки зуба  $G = 72^\circ$ ;
- 9) зазор между статором и ротором  $P = 0,25$  мм.

Получены регрессионные модели зависимости модуля помола зерна, температуры смеси и производительности установки от конструктивных параметров рабочих органов, позволяющие производить расчет различных конструкций рабочих органов дисмембратора в зависимости от практических нужд.

3. Проведено экспериментальное сравнение оптимизированной конструкции с прототипом (установкой УПК-40). В результате выявилось, что оптимизированная конструкция дисмембратора имеет следующие преимущества по сравнению со своим прототипом:

- смесь в оптимизированной конструкции нагревается до заданной температуры в 40°С в среднем на 4 минуты быстрее;

- гранулометрический состав смеси из оптимизированной установки более однороден и соответствует рекомендуемым параметрам – фракции от 0,2 мм до 1,5 мм составляют в совокупности более 90% пробы;

- график зависимости температуры смеси от времени протекания процесса показывает, что смесь в оптимизированной конструкции нагревается равномерно с течением времени;

- присутствие пылевой фракции в оптимизированной установке меньше 1%;

4. Разработан и изготовлен промышленный образец дисмембратора УПК/М– 40 (патенты №253165 и №87651), включающий в себя камеру измельчения, бак для загрузки и смешивания, Для автоматизации процесса установлена термopapa, которая позволяет отключать устройство при достижении заданной температуры автоматически. Расчетный экономический эффект от внедрения инновации в производство составляет 600000 руб., что на 6% выше, чем у прототипа (установки УПК-40) и почти в два раза больше соответствующего показателя у альтернативной разработки («ФЕРМЕР-600»). Срок окупаемости – 1 год 7 месяцев.

### **Рекомендации**

Результаты исследований, представленные в завершённом виде, позволяют проводить опытно-конструкторские работы при разработке центробежно-роторных дисмембраторов для приготовления жидких кормов и применяются в учебном процессе в вузах.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Данные исследования могут стать основой для разработки новых технологий при расширенном применении центробежно-роторных дисмембраторов в производстве новых видов жидких кормов в животноводстве и продуктов в перерабатывающей промышленности.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

*Статьи в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:*

1. Ситников, А. А. Исследование влияния конструктивных параметров рабочих органов центробежно-роторного дисмембратора на гранулометрический состав корма / А. А. Ситников, Ю. Н. Камышов, **Н. А. Макарова**, С. В. Почтер // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – №3. – С. 85-88.

2. Ситников, А. А. Численное моделирование течения жидкости в центробежно-роторном дисмембраторе / А. А. Ситников, **Н. А. Макарова**, Ю. Н. Камышов, С. В. Почтер, Е. Н. Нефедов // Ползуновский вестник. – 2012. – №1/1. – С. 263-268.

*Патенты, свидетельства:*

3. Патент на полезную модель № 121756. Рос. Федерация, МПК В02С7/00 Стенд для контроля и настройки устройства для приготовления гомогенизированных продуктов / Ситников А.А., Нефедов Е.Н., Дрюк В.А., Камышов Ю.Н., Почтер С.В., Салеев Ф.И., **Макарова Н.А.** Заяв.05.05.2012; Оpubл. 10.11.2012. - 4 с.

4. Свидетельство №2012616867 Российская Федерация. Расчет рациональных параметров рабочих органов дисмембратора для механоактивационной обработки сырья органического происхождения : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / Ситников А. А., **Макарова Н. А.**, Нефедов Е. Н., Камышов Ю. Н., Почтер С. В. ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» – № 2012614525, заявл. 04.06.2012 ; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 01.08.2012. – [1] с.

5. Патент на промышленный образец № 8765. Рос. Федерация, МКПО 15-03. Механоактиватор органического сырья / Ситников А.А., Нефедов Е.Н., Камышов Ю.Н., **Макарова Н.А.**, Почтер С.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» - № 2012502585, заявл.30.07.2012; Оpubл. 16.01.2014. - 7 с.

6. Патент на изобретение №2535165. Рос. Федерация, МПК В02С 13/00. Роторно-пульсационный аппарат / Нефедов Е.Н., Ситников А.А., Камышов Ю.Н., Почтер С.В., Нефедов К.Е., Салеев Ф.И., Сильченко И.А., Дрюк В.А., **Макарова Н.А.**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Алтайский

государственный технический университет им. И.И. Ползунова» - № 2013121725, заяв. 08.05.2013; опубли. 10.12.2014, Бюл. № 34. - 8 с.

*В других изданиях:*

7. Ситников, А. А. Исследование процесса разрушения зернобобовых культур и определение оптимальных параметров гидродинамического центробежно-роторного измельчителя / А. А. Ситников, Ю. Н. Камышов, С. В. Почтер, **Н. А. Макарова** // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы : материалы I всероссийской научно-технической конференции 23 – 25 ноября 2011 г. / под ред. А. Н. Площаднова / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2011. – С. 497-501.

8. **Макарова, Н. А.** Оптимизация конструктивных параметров центробежно-роторного дисмембратора для производства жидких кормов [Электронный ресурс] / **Н. А. Макарова** // Горизонты образования: научно-образовательный журнал АлтГТУ. – Электрон. дан. – Барнаул, 2015. – Вып. 17. – Приложение: 12-я Всероссийская научно-практическая конференция аспирантов, студентов и молодых ученых «Наука и молодежь – 2015». Секция «Наземные транспортные системы». – Режим доступа: [http://edu.secna.ru/media/f/transport\\_sistem\\_tez\\_2015.pdf](http://edu.secna.ru/media/f/transport_sistem_tez_2015.pdf). – Загл. с экрана.

9. **Макарова, Н. А.** Оптимизация конструктивных параметров центробежно-роторного дисмембратора для производства жидких кормов / **Н. А. Макарова**, Ю. Н. Камышов, А. А. Ситников // Актуальные проблемы развития АПК в работах молодых ученых Сибири : сборник научных трудов по материалам XI Региональной научно-практической конференции молодых ученых Сибирского федерального округа (г. Новосибирск, 28-30 апреля 2015 г.). – Новосибирск, 2015. – С. 94-97.