

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента **Башилова Алексея Михайловича**, доктора технических наук, профессора кафедры прикладной математики, информационных технологий и электротехники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», на диссертационную работу **Белова Александра Анатольевича** «Совершенствование технологии и сверхвысокочастотных установок для повышения кормовой ценности фуражного зерна», представленной к публичной защите на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

### **1. Актуальность темы**

Актуальность темы диссертации связана с улучшением кормовой ценности фуражного зерна при энергосберегающем применении электромагнитного поля сверхвысоких частот. В результате применения СВЧ технологий происходит изменение целого комплекса питательных свойств корма животных, улучшающих поедание, переваримость и усвоение. Из всего многообразия технологий и средств повышения кормовой ценности фуражного зерна СВЧ-технологии отличаются многофункциональностью воздействия на зерновое сырьё, путём изменения структуры (декстринизации) крахмала, денатурации белка, снижения уреазы (антипитательный фактор), обеззараживания и изменения физико-структурного состава (измельчение, шелушение). Основные задачи диссертационной работы направлены на существенное улучшение качественных характеристик (непрерывность и энергоэффективность) СВЧ технологий подготовки фуражного и обеспечение мирового лидерства российской СВЧ продукции. Данное научное направление соответствует стратегической программе, разработанной технологической платформой «СВЧ-технологии» по медицинскому, биотехнологическому и сельскохозяйственному применению, касающейся многофункциональной модульности, «точечного» воздействия и фокусности СВЧ установок.

### **2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Результаты диссертационной работы обобщены в заключении, состоящем из: семи основных выводов (связанных с выводами по пяти разделам), рекомендаций производству, предложений по совершенствованию и перспективе развития СВЧ-технологии.

1. На основе анализа существующих технологий и устройств для обработки зернофуража сформирован первый вывод о разработке микроволновых технологий и новых конструкционно-технологических схемах установок для

повышения кормовой ценности фуражного зерна при сниженных эксплуатационных затратах путём многократного термомеханического воздействия электромагнитным полем сверхвысокой частоты. Вывод достоверно обоснован фактологическим материалом, актуализирован и целенаправлен.

2. Второй вывод обобщает выводы второго теоретического раздела диссертации и свидетельствует о результатах разработанных математических моделей взаимодействия различных вариантов СВЧ технологий с непрерывно движущимся потоком фуражного зерна, позволяющих производить оценки рациональных конструктивно-технологических параметров передвижных резонаторов, согласовывать параметры электродинамической системы (напряжённость электрического поля, добротность и ёмкость резонатора) с режимами работы СВЧ установок, содержащих резонаторы разной конфигурации (цилиндрические, сферические и тороидальные). Вывод достоверен, обладает научной новизной.

3. В третьем выводе, на основании теоретических исследований математических моделей динамики эндогенного нагрева приведен, выявленный диапазон рабочей напряжённости электрического поля – 2-5 кВ/см, доза воздействия электромагнитного поля сверхвысоких частот 0,18-0,3 кВт·ч/кг, обеспечивается снижение активности уреазы до 0,15-0,2 ед. рН. Вывод достоверен, обладает научной новизной.

4. В четвертом выводе, по результатам третьего раздела диссертации, сформулированы три научно-методических принципа проектирования СВЧ установок по обеспечению высокой производительности, поточности технологического процесса обработки зернофуража, требуемой поглощаемой удельной мощности при термомеханическом воздействии на фуражное зерно. Вывод достоверен, обладает научной новизной, систематизирует научную проблему.

5. Пятый вывод основан на результатах экспериментальных исследований распределения электромагнитного поля в резонаторных камерах установок, согласно которым наибольшая концентрация его в центре дифракционных резонаторов, и минимальная - за штифтами резонаторов. В СВЧ энтолейторе в рабочей зоне напряжённость 1,58 кВ/см, за пределами – 0,32 кВ/см. Вывод достоверен, обладает научной новизной.

6. В шестом выводе определены: временной режим работы установки – 100-250 с, частота вращения диска – 85-200 об/мин, мощностной режим – 2-5 Вт/г, удельные энергетические затраты – 0,077 кВт·ч/кг, общая мощность установки – 5800 Вт, производительность – 75 кг/ч, влажность – 14-16%. Вывод достоверен, обладает практической значимостью.

7. Седьмой вывод содержит сведения о полученном продукте, факте проведения производственных испытаний, величины радиогерметичности установок – 350-500 мкВт/см<sup>2</sup> (при норме до 1000 мкВт/см<sup>2</sup>), годовой экономический эффект – 0,8-1,2 млн. руб. Вывод достоверен, обладает практической значимостью.

Основные положения и научные результаты, полученные лично автором, обладают научной новизной, подтверждены патентами.

В отношении рекомендаций производству следует отметить их целостность, системность и актуальность, обеспечение регулируемости и контролируемости основных технологических параметров для повышения кормовой ценности фуражного зерна.

В целом можно заключить, что обоснованность всех выводов диссертации достаточна, достоверна и они отражают основное её содержание.

### **3. Новизна и значимость для практики результатов диссертационной работы**

Новизну представляют:

- технологии термомеханического воздействия на фуражное зерно для повышения кормовой ценности в новых сверхвысокочастотных установках;
- математические модели физического процесса работы сверхвысокочастотных установок с оригинальными решениями в части конструкционно-технологических параметров новых рабочих органов;
- результаты теоретических исследований процесса функционирования разработанных установок.

Значимость для практики представляют:

- результаты экспериментальных исследований процесса термомеханического воздействия на фуражное зерно для повышения кормовой ценности;
- обоснованные конструкционно-технологические параметры: зависимости деформации от разрушающего усилия, влажности, температуры; результаты исследований химического состава, микробиологических и органолептических показателей, активности уреазы соевых бобов;
- разработанные и апробированные сверхвысокочастотные установки для повышения кормовой ценности фуражного зерна, результаты испытания установок в производственных условиях.

**4. Достоверность результатов исследований** обеспечена корректностью постановки и решения научных задач с использованием математических аппаратов электродинамики, теории электромагнитного поля и электрических цепей, а также графоаналитических методов, сходимостью теоретических и экспериментальных результатов исследований. Обработка экспериментальных данных выполнена с использованием современных компьютерных программ, трёхмерного моделирования конструктивного исполнения СВЧ установок в программе Компас-3D V15. В работе обосновываются методы расчёта и конструирования объёмных резонаторов по программе 3D электромагнитного проектирования CST STUDIO SUITE 2015.

## **5. Оценка содержания диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 308 страницах, содержит 171 рисунок и 39 таблиц, список литературы из 295 источников, из которых на иностранном языке – 15. Приложения размещены на 107 страницах и включают акты об использовании в учебном процессе, акты внедрения в производство, протоколы исследований активности уреазы, протоколы физико-химических и микробиологических исследований, протоколы измерений электромагнитных излучений вблизи установок, результаты моделирования электромагнитного поля в резонаторах, патенты, дипломы, грамоты, благодарственные письма автора по теме. Общий объем диссертации – 416 страниц.

Актуальность темы, цель и задачи исследований, объекты и предмет исследований, основные положения, выносимые на защиту приведены во введении.

В первом разделе «Состояние научной проблемы, цель и задачи исследований» представлены состояние ресурсов и объёмов фуражного зерна; анализ физико-химических и электрофизических характеристик зернофуража; представлен анализ технологий для микронизации зерна на основе которого разработана классификация технических средств для термомеханического воздействия; представлены задачи исследований.

Второй раздел «Теоретические исследования процесса термомеханического воздействия на фуражное зерно с использованием энергии электромагнитных излучений» содержит обоснование методологии теоретических исследований. Разработанные математические модели процесса термомеханического воздействия на фуражное зерно СВЧ-технологий, позволили исследовать динамику нагрева фуражного зерна с учётом изменения электрофизических параметров. Рассчитана напряжённость электрического поля СВЧ, при которой снижается микробиологическая обсеменённость фуражного зерна. Исследована картина распределения электрического поля в объёмных резонаторах при использовании программы CST Studio Suite 2015. Теоретически обоснован процесс функционирования СВЧ энтолейтора и его основного рабочего органа – резонатора. Проведен анализ радиогерметичности установки. Технологический процесс термомеханического воздействия на фуражное зерно в СВЧ дезинтеграторе и дисмембраторе объяснён с учётом измельчения зерна. Тороидальный и сферический резонаторы применены в радиоволновых установках при совмещении источников электромагнитных излучений различных рабочих частот, что характеризует новизну решений. Обоснован технологический процесс и технический результат комплексного воздействия электрофизических факторов на фуражное зерно при разработке СВЧ-индукционной установки.

Третий раздел «Методические аспекты исследования и разработанные СВЧ установки для термомеханического воздействия на фуражное зерно» содержит общий план исследований и современную контрольно-измерительную

аппаратуру. Описана методика определения физико-механических свойств зерна в условиях сдвигового нагружения. Приведено конструкционное исполнение СВЧ энтолейтора, представлены чертежи и фотофакты исполнения установки. Созданный полупроизводственный образец СВЧ-индукционной установки приведен на рисунках и фотографиях в реальном исполнении. Разработанные конструкции СВЧ-индукционной установки транспортёрного типа, СВЧ установки для измельчения и обеззараживания зерна на базе дезинтегратора и на базе дисмембратора, СВЧ установки для термообработки зерна в процессе шелушения, СВЧ установки со сферическими резонаторами, с движущимися источниками излучений. Радиоволновые установки в различном исполнении обоснованы с технологической и технической стороны.

Четвертый раздел «Экспериментальные исследования процесса термомеханического воздействия на фуражное зерно» содержит экспериментальные исследования при использовании СВЧ энтолейтора и СВЧ-индукционной установки для обеззараживания зерна, уничтожения живых вредителей и повышения кормовой ценности. Динамика нагрева фуражного зерна описывается эмпирическими выражениями, совпадающими с теоретическими. Исследована микробиологическая обсеменённость фуражного зерна, значения которой снижаются при обработке в электромагнитном поле сверхвысокой частоты до 500 тыс. КОЕ/г. Для комплексного учёта параметров разработаны номограммы зависимостей удельной мощности, дозы воздействия, микробиологической обсеменённости и продолжительности воздействия. В процессе исследования органолептических показателей контрольного и опытного образцов происходит разрыв оболочки, зёрна приобретают раздутый вид, цвет местами коричневатый, запах поджаренный, с ореховым оттенком.

Пятый раздел «Экономическая эффективность внедрения в производство СВЧ установок для термомеханического воздействия на фуражное зерно» содержит результаты технико-экономического расчёта применения СВЧ энтолейтора и СВЧ-индукционной установки в фермерских хозяйствах. Разработаны меры безопасности при эксплуатации СВЧ установок для термомеханического воздействия на фуражное зерно.

## **6. Подтверждение публикации основных результатов диссертации в научной печати и соответствие автореферата диссертации**

По диссертационной работе выполнено 62 печатных публикации, в том числе 16 из перечня ведущих периодических изданий, определённых ВАК РФ Министерства образования и науки Российской Федерации, 4 патента, 2 монографии. Диссертационная работа по количеству публикаций в рецензируемых изданиях отвечает нормативным документам. Автореферат по своему содержанию соответствует основным научным положениям диссертационной работы.

## **7. Замечания по работе**

1. Не ясно из результатов анализа физико-химических, микробиологических показателей, что является преобладающим при определении кормовой ценности фуражного зерна и, какова доля их положительного агротехнологического эффекта.

2. Не очень чётко определена роль и вклад соавторов творческого коллектива по разработке СВЧ технологий.

3. Имеются разные толкования наименований разработанных рабочих органов и не приведены сравнительные технико-технологические характеристики. Рассматривается десять СВЧ установок, но не приведен их энергетический анализ, не выявлены достоинства и недостатки, возможные области их применения.

4. Необходимо более точно определить влияние на результат обработки фуражного зерна механического и температурного воздействий, СВЧ и индукционного воздействия. Указать рабочие диапазоны и совместный эффект.

5. Как обеспечивается конечный результат технологического процесса, исходя из размеров фуражного зерна и его фракционного состава?

6. Запатентованы только устройства, хотя есть интересные данные по комплексному воздействию на зерно СВЧ технологий различного диапазона, индукционного нагрева, механических деформаций, которые могут давать дополнительные синергетические эффекты, а их можно патентовать как способы или технологии.

7. Экспериментально исследованы две разработанные СВЧ установки диэлектрического (энтолейтора) и индукционного нагрева, следовало бы, исходя из теоретических исследований, определить перспективы использования других разработанных автором вариантов.

8. Расчёт экономической эффективности произведен для двух установок СВЧ энтолейтора и СВЧ-индукционной установки, однако он сделан без учёта основного агротехнологического эффекта - повышения пищевой ценности фуражного зерна.

Текст диссертации изложен в научном стиле, с привлечением аналитических зависимостей, графиков, номограмм, рисунков, фотографий. Оформление диссертационной работы соответствует требованиям нормативно-технической документации. Поставленные задачи исследований выполнены и решены в запланированном объёме.

Несмотря на замечания, имеющие характер уточнений и пожеланий, диссертационная работа оценивается положительно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация Белова Александра Анатольевича является самостоятельной, завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании исследований автора решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор, Белов Александр Анатольевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве.

Официальный оппонент:

доктор технических наук,  
профессор



Башилов Алексей Михайлович



*Подпись Башилова А.М.  
заверю  
инспектор (Башилов А.М.)*

Место работы: кафедра прикладной математики, информационных технологий и электротехники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»; должность: профессор.

Адрес: Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993.

Факс: +7 499 158-29-77; Телефон: +7 499 158-92-09; Эл. почта: mai@mai.ru

E-mail: bashilov@inbox.ru

89261149284