

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента доктора технических наук, профессора **Башилова Алексея Михайловича** на диссертационную работу **Жданкина Георгия Валерьевича** на тему:

«Технология и оборудование сверхвысокочастотной обработки вторичного сырья животного происхождения», представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве в диссертационный совет Д 999.179.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

### **Актуальность темы диссертационных исследований**

Повышение эффективности переработки вторичного сырья животного происхождения путем развития теоретических и методологических основ проектирования и создания СВЧ установки непрерывно-поточного действия с соблюдением электромагнитной безопасности и с сохранением кормовой ценности при сниженных эксплуатационных затратах, *актуальна.*

### **Новизна исследования и полученных результатов**

Новизну научных исследований представляют:

- модель функционирования многогенераторных СВЧ установок непрерывно-поточного действия с нетрадиционными резонаторами и запердельными волноводами, обеспечивающими термообработку предварительно измельченного вторичного сырья в процессе обезвоживания, имеющими рациональные конструкционно-технологические параметры, новизна технических решений которых доказана 23 патентами на изобретения.

- аналитические зависимости для обоснования параметров электродинамической системы с нетрадиционными резонаторами, и математические выражения, описывающие динамику нагрева сырья при изменении электрофизических и физико-механических параметров в процессе воздействия ЭМП СВЧ;

- результаты вычисления и визуализации распределения электромагнитного поля в нетрадиционных резонаторах, позволившие выявить эффективные конфигурации резонаторов в соответствии с критериями проектирования и комплексно оценить основные параметры электродинамической системы «генератор–резонатор», а именно – собственную добротность резонатора и напряженность электрического поля.

- комплекс конструкционно-технологических параметров и режимов работы СВЧ установок с алгоритмом их согласования с учетом выявленных эмпирических зависимостей, регрессионных моделей и результатов исследований физико-механических, микробиологических и органолептических показателей, характеризующих кормовую ценность сырья.

- технология термообработки вторичного сырья животного происхождения и созданная СВЧ установка с комбинированным резонатором.

## **Обоснованность научных положений, выводов диссертации и достоверность**

Обоснованность научных положений, выводов и достоверность подтверждаются результатами теоретических и экспериментальных исследований с применением современной сертифицированной измерительной аппаратуры, а также выполненной проверкой адекватности результатов электродинамического моделирования электромагнитных полей.

Основные результаты научных исследований сформулированы в шести выводах.

**Первый вывод** о необходимости совершенствования методологических основ создания многогенераторной СВЧ установки непрерывно-поточного действия с магнетронами воздушного охлаждения с соблюдением норм электромагнитной безопасности аргументирован, достоверен.

**Второй вывод**, касающийся модели функционирования многогенераторных СВЧ установок непрерывно-поточного действия с нетрадиционными резонаторами, имеющими рациональные конструкционно-технологические параметры, обеспечивающими термообработку предварительно измельченного вторичного сырья в процессе обезвоживания, достоверен и новизна технических решений доказана 23 патентами на изобретения.

**Третий вывод** свидетельствует о возможности использования для согласования собственной добротности и объема резонатора с напряженностью электрического поля и скоростью нагрева сырья:

- аналитические зависимости, позволяющие обосновать параметры электродинамической системы с нетрадиционными резонаторами;

- математические выражения, описывающие динамику нагрева сырья при изменении электрофизических и физико-механических параметров в процессе воздействия ЭМП СВЧ. Вывод аргументирован, является достоверным и теоретически значимым.

**Четвертый вывод** об эффективных конструкционных исполнениях резонаторов выявленных путем комплексной оценки параметров электродинамической системы, а именно: напряженности электрического поля, собственной добротности и мощности потока излучений, полученные путем визуализации распределения электромагнитного поля в нетрадиционных резонаторах в программе CST Microwave Studio в режиме переходного процесса, аргументирован, информативен, достоверен и имеет теоретическую значимость.

**Пятый вывод**, свидетельствующий об эффективных технологических и режимных параметрах, предусмотренных в созданной СВЧ установке с комбинированным резонатором, информативен и достоверен, имеет практическое значение.

**Шестой вывод** свидетельствует о положительных результатах апробирования созданной СВЧ установки с комбинированным резонатором для термообработки и обеззараживания вторичного сырья животного происхождения с сохранением кормовой ценности. Вывод информативен и достоверен, представляет практическую значимость.

Перспективы дальнейшей разработки темы это проектирование СВЧ установок с модульными резонаторами, позволяющими расширить технологические процессы агропредприятий.

***В целом выводы и рекомендации содержат решение всех задач***, сформулированных в диссертации, новые теоретические положения, модели, методы и алгоритмы решения задач, позволившие выработать методологические основы создания сверхвысокочастотной установки и технологии термообработки вторичного сырья животного происхождения с сохранением кормовой ценности.

### **Значимость для науки и практики результатов исследований**

Теоретическую и практическую значимость представляют:

- методологические основы создания многогенераторных радиогерметичных СВЧ установок непрерывно-поточного действия с нетрадиционными резонаторами и рациональными конструкционно-технологическими параметрами, реализующие технологии термообработки вторичного сырья животного происхождения с сохранением кормовой ценности;
- аналитические зависимости, позволяющие обосновать параметры электродинамической системы с нетрадиционными резонаторами и получить уравнение динамики эндогенного нагрева сырья, с изменяющимися диэлектрическими и физико-механическими параметрами при термообработке;
- результаты исследования распределения электромагнитного поля в разработанных нетрадиционных резонаторах, позволившие выявить эффективные конструкционные исполнения, обеспечивающие высокую напряженность ЭП и высокую собственную добротность при работе СВЧ установок непрерывно-поточного действия с соблюдением электромагнитной безопасности;
- комплекс конструкционно-технологических параметров и режимы работы СВЧ установок, обоснованных с учетом выявленных эмпирических зависимостей, регрессионных моделей и результатов исследований физико-механических, микробиологических и органолептических показателей, характеризующих кормовую ценность сырья;
- разработанные трехмерные модели и технологические схемы многогенераторных СВЧ установок непрерывно-поточного действия с нетрадиционными резонаторами и магнетронами воздушного охлаждения для термообработки и обеззараживания вторичного сырья животного происхождения;
- созданная и апробированная в производственных условиях многогенераторная СВЧ установка непрерывно-поточного действия с комбинированным резонатором, обеспечивающим электромагнитную безопасность, высокую собственную добротность и высокую напряженность ЭП, достаточную для обеззараживания измельченного и обезвоженного вторичного сырья животного происхождения при их термообработке.

### **Оценка содержания диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Основное содержание работы изложена на 285 страницах машинописного текста, содержит 44 таблицы и 135

рисунков. Библиографический указатель содержит 255 ссылок.

**Введение** включает актуальность избранной темы, степень ее разработанности, цель исследования, научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, объект и предмет исследований, методологию и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов.

**В первом разделе** проведен аналитический обзор ресурсов и объемов сырья и их электрофизических характеристик, технологий и технических средств переработки вторичного сырья животного происхождения; анализ отечественных и зарубежных источников литературы, посвященных изучаемой проблеме; обоснованы цель научного исследования и задачи для ее достижения.

**Во втором разделе** представлена научно-методическая база исследований для решения комплекса взаимосвязанных задач, таких как:

- выявление эффективных конструкционных исполнений многогенераторных СВЧ установок непрерывно-поточного действия с наиболее приемлемыми конфигурациями резонаторов, обеспечивающих термообработку и обеззараживание сырья;
- согласование параметров электродинамической системы «генератор-резонатор-нагрузка» и электрофизических характеристик сырья с конструктивно-технологическими параметрами и режимами работы установок.

Предлагаются нетрадиционные резонаторы СВЧ установок, обеспечивающие равномерный диэлектрический нагрев и обеззараживание измельченного и обезвоженного сырья. Обоснованы основные критерии проектирования СВЧ установок непрерывно-поточного действия, такие как:

- высокая собственная добротность резонатора, возбуждаемого от нескольких магнетронов воздушного охлаждения, для достижения равномерного распределения электрического поля высокой напряженности;
- возможность вариации производительности установки для термообработки сырья разного состава и обеспечения электромагнитной безопасности.

Пользуясь методикой поиска собственных мод резонатора, при помощи программного обеспечения CST Studio 2017 и модулем Microwave Studio – системой параметрического моделирования трехмерных структур, проведены исследования напряженности электромагнитного поля, плотности тока, мощности потока излучений, собственной добротности разработанных резонаторов. Выявлены резонаторы оптимальные по геометрической конфигурации и размерам, по величине собственной добротности, напряженности электрического поля и равномерности распределения электрического поля. Эти результаты исследования легли в основу проектирования многогенераторных радиогерметичных СВЧ установок непрерывно-поточного действия для термообработки вторичного сырья животного происхождения.

Проведены теоретическое исследование распределения ЭМП в комбинированном резонаторе как наложение полей в полусферической и цилиндрической частях. Исследована ЭМП в кольцевом пространстве, предназначенном

для загрузки измельченного сырья в комбинированный резонатор, на предмет соблюдения электромагнитной безопасности.

С учетом изменения диэлектрических параметров, теплоемкости и плотности сырья в процессе нагрева в ЭМП СВЧ получено уравнение динамики нагрева вторичного сырья животного происхождения и приведены графики при разной напряженности электрического поля. Составлен алгоритм согласования конструктивных параметров резонатора и параметров электродинамической системы с критериями СВЧ установки. Он включает определение необходимой мощности электромагнитных излучений для снижения бактериальной обсемененности сырья.

Представленные результаты наглядны и хорошо согласуются между собой и с общефизическими представлениями.

**В третьем разделе** приведена методика проектирования установок. Описаны разработанные СВЧ установки с нетрадиционными резонаторами, рассмотрены операционно-технологические схемы термообработки и обеззараживания вторичного сырья животного происхождения. Представлена методика разработки основных узлов многогенераторных радиогерметичных СВЧ установок, где описаны возможности достижения непрерывно-поточного режима за счет транспортирования сырья через резонатор, за счет передвижных или вращающихся частей резонатора, а также с использованием заградительных волноводов для ограничения электромагнитных излучений.

Методология проектирования СВЧ установок непрерывно-поточного действия составлена с учетом критериев функционирования установок, вариацией конфигураций резонаторов с обоснованными конструктивно-технологическими параметрами, с учетом критериев оценки кормовой ценности продукта на основе алгоритма теоретических и экспериментальных исследований.

Разработанные и запатентованные сверхвысокочастотные установки в соответствии с конструктивными исполнениями резонаторов и содержания механизмов для предварительного измельчения и транспортирования сырья классифицированы. Они оценены по удельным энергетическим затратам на термообработку сырья и по основным критериям проектирования. Результаты наглядны и хорошо систематизированы.

**В четвертом разделе** приведены результаты исследования динамики нагрева сырья; регрессионные модели процесса термообработки сырья; результаты исследования распределения температурного поля по поверхности сырья; сравнительная технологическая схема производства белкового корма из вторичного сырья животного происхождения; технические характеристики созданной и апробированной в производственных условиях СВЧ установки с комбинированным резонатором; результаты оценки электромагнитной безопасности. Они согласуются с теоретическими результатами с достаточной доверительной вероятностью.

**В пятом разделе** представлены технико-экономические показатели внедрения сверхвысокочастотных установок для термообработки и обеззаражива-

ния вторичного сырья животного происхождения в фермерское хозяйство.

**В заключении** дается развернутая характеристика результатов диссертационных исследований в соответствии с поставленными задачами.

Основные результаты диссертации отражены в 71 научной работе. В том числе опубликовано 5 статей в изданиях, включенных в Web of Science, 22 статьи в журналах из перечня ВАК РФ, 23 патента на изобретения.

Уровень решаемой проблемы в соответствии поставленными задачами и содержание научной работы соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают основное содержание диссертации, характеризуют результаты проведенных исследований.

### **Замечания по работе**

1. Чем отличаются нетрадиционные резонаторы от традиционных, в диссертационной работе не дано чёткого определения принятого принципа классификации.

2. Чем обусловлено многообразие исследуемых конструктивных схем СВЧ резонаторов при одинаковых условиях предварительной подготовки исходного сырья путём измельчения и подсушивания.

3. Имеется ли связь между разнокачественностью животного сырья и правилом выбора адекватных ему оптимальных конструкционных параметров и режимов настройки работы комбинированного резонатора.

4. В разделах диссертации и автореферате существует несоответствие повторяющихся названий разработанных и исследуемых резонаторов.

5. В чём различие методологических основ создания СВЧ установок и методологических основ создания технологии термообработки, включённых в концепцию решения исследуемой проблемы.

6. Перспективы дальнейшей разработки представлены в обобщённом виде, не отмечены задачи разработки автоматизированной системы управления СВЧ установкой, оснащённой контрольно-измерительной аппаратурой. Отмеченные недостатки не снижают ценность выполненных исследований, теоретическую и практическую значимость диссертации.

Отмеченные недостатки не снижают ценность выполненных исследований, теоретическую и практическую значимость диссертации

## Заключение

Диссертационная работа **Жданкина Георгия Валерьевича** «Технология и оборудование сверхвысокочастотной обработки вторичного сырья животного происхождения», представляет самостоятельно выполненную законченную научно-квалификационную работу. В ней содержатся новые научно обоснованные технические и технологические решения проблемы по совершенствованию методологических основ конструкционно-технологического проектирования и создания СВЧ установки непрерывно-поточного действия для термообработки вторичного сырья животного происхождения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

По своей актуальности, научной новизне, практической значимости диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9 и 10 раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Правительством Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, в редакции Постановления от 01.10.2018 г. № 1168 с изменениями от 26.05.2020, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук,

а ее автор **Жданкин Георгий Валерьевич** заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве.

Официальный оппонент, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», институт информационных систем и технологий, профессор кафедры прикладной математики, информационных технологий и электротехники

Башилов Алексей Михайлович

Почтовый адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4.

Телефон 89261149284

Адрес электронной почты: bashilov@inbox.ru

14.10.2021 г.

*Доктор А.М. Башилова заверено*  
*Зам. зам. Председателя по работе с диссертантами*  
*И.И. Машов*