

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента доктора технических наук, профессора Попова Виталия Матвеевича на диссертационную работу **Жданкина Георгия Валерьевича** «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**

Концепция рассматриваемой работы направлена на решение проблемы «Разработка методологических основ создания сверхвысокочастотной установки и технологии термообработки вторичного сырья». Она предусматривает методику реализации критериев проектирования установок в конструкционных исполнениях объемных резонаторов и оценку режимов работы для их эффективного функционирования.

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

Новизну научных исследований представляют научно-методические основы разработки СВЧ установки непрерывно-поточного действия с обеспечением электромагнитной безопасности для термообработки вторичного сырья животного происхождения, включающие:

- методики выявления эффективных конструкционных исполнений нетрадиционных резонаторов путем оценки многокритериальных регрессионных моделей;
- обоснование электродинамических параметров и режимов работы установок.

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

Обоснованность и достоверность теоретических положений, выводов, заключения и рекомендаций диссертации подтверждаются экспериментальными исследованиями с применением современной сертифицированной измерительной аппаратуры, а также выполненной проверкой адекватности результатов электродинамического моделирования электромагнитных полей.

Проведенные испытания установки в производственных условиях расширяют результаты проверки рассмотренных критериев функционирования установки.

Основные результаты научных исследований сформулированы в шести выводах.

**Первый вывод** о необходимости совершенствования методологических основ создания радиогерметичной СВЧ установки непрерывно-поточного дей-



ствия с магнетронами воздушного охлаждения аргументирован, информативен, достоверен.

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

**Третий вывод** аргументирован, является достоверным и теоретически значимым. Вывод свидетельствует о возможности использования для согласования собственной добротности и объема резонатора с напряженностью электрического поля и скоростью нагрева сырья: аналитических зависимостей, позволяющих обосновать параметры электродинамической системы с нетрадиционными резонаторами; математических выражений, описывающих динамику нагрева сырья при изменении электрофизических и физико-механических параметров в процессе воздействия ЭМП СВЧ.

**Четвертый вывод**, касается выявления эффективных конструкционных исполнений нетрадиционных резонаторов, путем комплексной оценки параметров электродинамической системы, а именно: напряженности электрического поля, собственной добротности и радиогерметичности, полученных путем визуализации распределения электромагнитного поля в резонаторах в программе CST Microwave Studio в режиме переходного процесса. Вычислены и визуализированы распределения ЭМП в сферическом, цилиндрическом, тороидальном, шнековом, биконическом, тетраконическом, коаксиальном и комбинированном резонаторах. Вывод аргументирован, информативен, достоверен и имеет теоретическую значимость.

**Пятый вывод**, свидетельствующий об эффективных технологических и режимных параметрах, предусмотренных в созданной СВЧ установке с комбинированным резонатором, обеспечивающей сохранение кормовой ценности сырья при сниженных энергетических затратах. Вывод информативен и достоверен, имеет практическое значение.

**Шестой вывод** свидетельствует о положительных результатах проверки в производственных условиях созданной установки, обеспечивающей подачу измельченного и обезвоженного сырья в комбинированный резонатор, где происходит термообработка и обеззараживание при перемешивании и дозированной выгрузки вареных частиц белкового продукта. Вывод информативен и достоверен, представляет практическую значимость.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы содержат новые направления использования полученных результатов при разработке автоматизированной системы управления СВЧ установкой для расширенных технологических процессов 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.

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

Теоретическую и практическую значимость представляют:

- методологические основы создания СВЧ установки, реализующей технологию термообработки вторичного сырья животного происхождения для сохранения кормовой ценности;
- модель процесса функционирования многогенераторных СВЧ установок непрерывно-поточного действия с рациональными параметрами для термообработки сырья, отвечающая основным технологическим критериям;
- 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 ЭМП 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 конструктивно-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 3D модели и технологические схемы многогенераторных СВЧ установок с магнетронами воздушного охлаждения для термообработки и обеззараживания, предварительно измельченного и обезвоженного сырья в резонаторах;
- 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;
- результаты экспериментальных исследований, позволяющие разработать рекомендации по эксплуатации многогенераторной СВЧ установки непрерывно-поточного действия для термообработки вторичного сырья животного происхождения.

### **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 моделей СВЧ установок непрерывно-поточного действия с наиболее приемлемыми конструкциями объемных резонаторов, обеспечивающих термообработку и обеззараживание сырья; согласование параметров электродинамической системы «генератор-резонатор-нагрузка» и электрофизических характеристик сырья с конструкционно-технологическими параметрами и режимами работы установок.

Предлагаются установки непрерывно-поточного действия и микроволновая технология, предусматривающая термообработку и обеззараживание измельченного и обезвоженного сырья для повышения равномерности диэлектрического нагрева и снижения энергетических затрат. 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 ЭМП, плотности тока, собственной добротности разработанных резонаторов. По результатам исследований параметров электродинамической системы с разными нетрадиционными резонаторами, в том числе с комбинированным резонатором, выявлены особенности резонаторов, а именно: оптимальные по геометрической конфигурации и размерам, по величине КПД (собственной добротности), напряженности электрического поля и равномерности термообработки сырья. Эти результаты исследования учтены при проектировании СВЧ установок непрерывно-поточного действия для термообработки сырья.

На основе систематизации формул для определения собственной добротности стандартных резонаторов выведены для многих нетрадиционных резона-



торов сложного конструкционного исполнения аналитические выражения через объем и площадь поверхности резонатора с учетом скин-слоя. Проведена оценка соответствия каждого разработанного резонатора оптимальным критериям путем расчета наименьших отклонений.

Теоретическое исследование распределения ЭМП в комбинированном резонаторе проведено отдельно в полусферической части и в цилиндрической части резонатора, что не в полной мере отражает картину распределения ЭМП.

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 конструкционных 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 и частные методики исследований. Описаны разработанные СВЧ установки с нетрадиционными резонаторами, предусмотрены операционно-технологические схемы термообработки и обеззараживания предварительно измельченного сырья. 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 конструкционно-технологическими параметрами, с учетом критериев оценки кормовой ценности продукта на основе алгоритма теоретических и экспериментальных исследований.

Приведен анализ 10 разработанных запатентованных конструкционных исполнений СВЧ установок. Они сгруппированы с учетом конструкции объемных резонаторов и содержания механизмов для предварительного измельчения сырья, и 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 СВЧ установки с комбинированным резонатором; результаты оценки электромагнитной безопасности. Они согласуются с теоретическими результатами с достаточной достоверностью.

**В пятом разделе** представлены результаты экономической оценки применения установок в фермерских хозяйствах по методу приведенных затрат.

**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. Компьютерное моделирование по программе CST Studio 2017 автору позволило анализировать пространственное распределение электромагнитного поля, потоков мощности, но не привел тепловые характеристики, т.е. распределение температуры в сырье при сложной геометрии объемных резонаторов. Не оценил эффективную площадь отражения, не оптимизировал расположение излучателей.

2. Вторичное сырье относится гетерогенным неоднородным смесям: жидкость и отходы разной мясной продукции. Не ясно, почему при определении диэлектрической проницаемости, сырье представили как двухфазную смесь.

3. Во многих конструкционных исполнениях использованы перфорированные узлы, но при этом не оценена, как влияет площадь живого сечения отверстий на соблюдение электромагнитной безопасности.

4. Не ясно, если предлагается несколько излучателей в одном резонаторе, то, как общую мощность вычисляли? Известно, что напряженность электрического поля в этом случае вычисляется по принципу суперпозиции.

5. Не ясно, возможно ли в десятки раз увеличить производительность, и какая конструкция резонатора в этом случае эффективнее, и как расположить магнетроны?

6. Следовало бы усилить доказательную базу, что именно комбинирован-



ный резонатор реализует все основные критерии проектирования СВЧ установок.

Отмеченные недостатки не снижают общего благоприятного впечатления от выполненного огромного объема работы.

### 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 и развитию теоретических и методологических основ конструктивно-технологического проектирования и создания СВЧ установки непрерывно-поточного действия с магнетронами воздушного охлаждения 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 по специальности 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве профессор, заведующий кафедрой «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет».

Попов Виталий Матвеевич

14.10.2021

Почтовый адрес:  
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 75

Телефон 89066035564  
Адрес электронной почты: ntc-es@mail.ru.

