

*На правах рукописи*



**Жданкин Георгий Валерьевич**

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ  
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКИ ВТОРИЧНОГО  
СЫРЬЯ ЖИВОТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование  
в сельском хозяйстве

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

Мичуринск-научоград РФ  
2021

Работа выполнена в государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (ГБОУ ВО НГИЭУ)

**Научный консультант:** доктор технических наук, профессор  
**Сторчевой Владимир Федорович**

**Официальные оппоненты:** **Попов Виталий Матвеевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», кафедра «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов», заведующий

**Башилов Алексей Михайлович**, доктор технических наук, профессор, Институт информационных систем и технологий ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кафедра прикладной математики, информационных технологий и электротехники, профессор

**Сошников Александр Андреевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технологический университет», кафедра электрификации и теоретических основ электротехники, профессор

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия»

Защита состоится 11 ноября 2021 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 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» по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101, корпус 1, зал заседаний диссертационных советов, тел./факс (47545)3-88-13, доб. 3-82, e-mail: dissov@mgaу.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет» и на сайте [www.mgaу.ru](http://www.mgaу.ru), с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации [www.vak.ed.gov.ru](http://www.vak.ed.gov.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные и скрепленные гербовой печатью организации, с указанием индекса, почтового адреса, телефона, электронной почты и сайта организации, фамилии, имени, отчества лица, подготовившего отзыв, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Михеев Николай Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В соответствии со стратегией развития перерабатывающей промышленности РФ и Федеральной научно-технической программой развития сельского хозяйства на 2017-2025 годы, утвержденной от 25.08.2017 г. № 996, предусматривающих решение задач импортозамещения белковых добавок за счет повышения эффективности технологии переработки вторичного сырья, разработка научно-обоснованной технологии и технических средств, для сохранения кормовой ценности, *актуальна.*

При убойе птиц и животных с последующей их переработкой накапливаются непищевые отходы, отличающиеся высоким содержанием влаги (65-75%), направляемые в вакуумные котлы, где путем парового гидролиза, стерилизации и дальнейшей сушки вырабатывают мясокостную муку. Из-за длительности контакта сырья с высокотемпературным теплоносителем снижается качество продукта, к тому же энергозатраты (30 кВт·ч/т) и расход пара (1200 кг/т) достаточно высокие. Поэтому предлагаются технологии и технические средства термообработки вторичного сырья животного происхождения в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) для сохранения кормовой ценности при сниженных эксплуатационных затратах. *Важность развития исследований эффектов СВЧ нагрева в России подтверждается принятием 17 декабря 2012 года стратегической программы исследований «СВЧ технологии», определяющей развитие промышленных установок технологического нагрева.*

**Научная проблема** заключается в разработке и развитии теоретических и методологических основ конструктивно-технологического проектирования и создания СВЧ установки непрерывно-поточного действия с маломощными магнетронами с соблюдением электромагнитной безопасности для термообработки вторичного сырья животного происхождения.

**Степень разработанности темы.** В мире разрабатывают преимущественно СВЧ установки периодического действия мощностью 25-50 кВт, содержащие магнетроны с водяным охлаждением и сложные средства защиты от отраженных волн. Научные основы воздействия ЭМП на диэлектрический материал, в том числе на сельскохозяйственное сырье, заложены в трудах: Атабекова Г.И., Архангельского Ю.С., Баскакова С.И., Башилова А.Н., Барсукова С.Н., Бородин И.Ф., Васильева А.Н., Вендина С.В., Гинзбурга А.С., Диденко А.Н., Дробахина О.О., Заболотного П.И., Кисунько Г.В., Коломейцева В.А., Лыкова А.В., Нетушила А.В., Неймана М.С., Никольского О.К., Попова В.М., Рогова И.А., Стребкова Д.С., Сошникова А.А., Цугленок Н.В. и др. Имеется опыт по разработке рабочих камер СВЧ установок для термообработки с.-х. сырья в научной школе ГБОУ ВО «НГИЭУ», руководимой Новиковой Г.В.

На основе анализа выполненных ранее исследований по разработке и внедрению микроволновых технологий для термообработки с.-х. сырья отмечаем, что установки обладают высокими эксплуатационными затратами из-за периодического режима работы, из-за высокой влажности сырья и их размеров, не согласованных с глубиной проникновения волн, а в установках непрерывно-поточного действия задача обеспечения радиогерметичности остается *нерешенной* из-за имеющихся прорезей для передвижения сырья через резонатор.

**Цель работы** – обоснование технологии и оборудования сверхвысокочастотной обработки вторичного сырья животного происхождения путем совершенствования конструкции многогенераторной установки непрерывно-поточного действия, основанной на принципах проектирования СВЧ установок, и технологии термообработки сырья с сохранением кормовой ценности при сниженных эксплуатационных затратах.

**Основные научные задачи:**

1. Разработать методологические основы создания СВЧ установки, реализующей технологию термообработки вторичного сырья животного происхождения, для сохранения кормовой ценности при сниженных эксплуатационных затратах.

2. Разработать модель процесса функционирования многогенераторных СВЧ установок непрерывно-поточного действия с рациональными конструкционно-технологическими параметрами для термообработки и обеззараживания влажного многокомпонентного сырья, отвечающую основным технологическим критериям проектирования СВЧ оборудования.

3. Вывести аналитические зависимости, позволяющие обосновать параметры электродинамической системы (ЭД) с нетрадиционными резонаторами и получить уравнение динамики эндогенного нагрева сырья при изменении диэлектрических и физико-механических параметров в процессе термообработки.

4. Разработать конструкционно-технологические схемы СВЧ установок с нетрадиционными резонаторами для термообработки вторичного сырья животного происхождения, и исследовать распределение ЭМП в резонаторах для выявления эффективных конструктивных исполнений, обеспечивающих высокую напряженность ЭП и высокую собственную добротность при работе установок непрерывно-поточного действия с соблюдением электромагнитной безопасности.

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

6. Разработать техническое задание для создания СВЧ установки, обеспечивающей термообработку и обеззараживание вторичного сырья животного происхождения. Создать и апробировать в производственных условиях СВЧ установку непрерывно-поточного действия с комбинированным резонатором, обеспечивающим электромагнитную безопасность и оценить технико-экономическую эффективность внедрения СВЧ установок.

**Концепция решения проблемы** включает разработку методологических основ создания СВЧ установки и технологии термообработки вторичного сырья для сохранения кормовой ценности, предусматривающих методику реализацию критериев проектирования СВЧ установок в конструктивных исполнениях объемных резонаторов и оценку режимов работы для их эффективного функционирования.

**Объект исследований:** процесс термообработки с обеззараживанием вторичного сырья животного происхождения в установках непрерывно-поточного действия с нетрадиционными резонаторами с высокой собственной добротностью и напряженностью электрического поля, обеспечивающими электромагнитную безопасность.

**Предмет исследований:** параметры электродинамической системы «генератор-резонатор» и закономерности динамики эндогенного нагрева измельченного

сырья при изменении диэлектрических и физико-механических параметров в процессе термообработки в электрическом поле разной напряженности с выявлением эффективных режимов работы установки.

**Научную новизну 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 и обоснование ЭД параметров и режимов работы установки.

**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 ЭД 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 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 3D модели и технологические схемы многогенераторных СВЧ установок с маломощными магнетронами для термообработки и обеззараживания предварительно измельченного сырья в резонаторах, новизна технических решений которых защищена патентами РФ;

– 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 измельченных и обезвоженных непищевых отходов убоя животных и птиц при их термообработке;

– результаты экспериментальных исследований, позволяющих разработать рекомендации по эксплуатации и техническое задание для создания многогенераторной СВЧ установки непрерывно-поточного действия с комбинированным резонатором и электронным блоком в шкафу управления.

**Методология и методы исследования.** В основу методологии положены теория ЭМП, законы термодинамики и математического анализа, результаты ма-

тематического и физического моделирования. Моделирование ЭМП в нетрадиционных резонаторах и вычисление напряженности ЭП, собственной добротности, плотности тока проводили в программе трехмерного компьютерного моделирования CST Studio Suite 2017 и ее подпрограмме CST Microwave Studio. Путем комплексных экспериментальных исследований с применением современной сертифицированной измерительной аппаратуры и с помощью созданной установки выявлены эффективные режимы работы СВЧ установки с комбинированным резонатором через регрессионные модели в программах Statistic 12.0, Excel 10.0.

***Положения, выносимые на защиту:***

1. Методологические основы создания СВЧ установки, реализующей технологию термообработки вторичного сырья животного происхождения для сохранения кормовой ценности при сниженных эксплуатационных затратах.

2. Модель процесса функционирования многогенераторных СВЧ установок непрерывно-поточного действия с рациональными конструкционно-технологическими параметрами для термообработки и обеззараживания сырья, отвечающую основным технологическим критериям проектирования СВЧ оборудования.

3. Аналитические зависимости, позволяющие обосновать параметры ЭД системы с нетрадиционными резонаторами и получить уравнение динамики эндогенного нагрева сырья с изменяющимися диэлектрическими и физико-механическими параметрами при термообработке.

4. Конструкционно-технологические схемы СВЧ установок с нетрадиционными резонаторами для термообработки вторичного сырья животного происхождения и результаты исследования распределения ЭМП в резонаторах для выявления эффективных конструкционных исполнений, обеспечивающих высокую напряженность ЭП и высокую собственную добротность при работе установок непрерывно-поточного действия с соблюдением электромагнитной безопасности.

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

6. Техническое задание для создания СВЧ установки, обеспечивающей термообработку и обеззараживание вторичного сырья животного происхождения. Созданная и апробированная в производственных условиях СВЧ установка непрерывно-поточного действия с комбинированным резонатором, обеспечивающим соблюдение электромагнитной безопасности. Оценка технико-экономической эффективности внедрения СВЧ установок в фермерское хозяйство.

***Степень достоверности*** основных положений и выводов подтверждена сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований технологического процесса термообработки сырья; актами апробации в производственных условиях технологии и СВЧ установки; результатами замеров мощности потока излучений СВЧ установки и исследований кормовой ценности продукта. Достоверность разработанных новых технических решений подтверждена экспертизой ФГБУ ФИПС, выдавшей 23 патента на изобретения.

***Реализация результатов исследований.*** Исследования выполнялись в соответствии с планами НИР ФГБОУ ВО «Нижегородская ГСХА» на основании договора с

республиканским учредительным предприятием «Научно-практический центр национальной академии наук Белоруссии по механизации сельского хозяйства» (РУП «НПЦ НАН Белоруссии») от 20.04.2017 г. и НИР ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», номер государственной регистрации 121021800049-6 (2015-2021 гг.). Изготовленный образец прошел испытание в Нижегородской области в ООО «Ардатовский птицекомбинат» и в АО «Линдовская». Результаты исследований доведены до стадии практического применения и приняты МСХ и продовольственных ресурсов Нижегородской области, реализуются на базе созданного совместно с НГИЭУ малом инновационном предприятии – ООО «НГИЭИ-ЭНЕРГО», имеющим ОКВЭД – научные исследования и разработки в области естественных и технических наук, по адресу: Нижегородская область, Княгининский р-н.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на международных научно-практических конференциях и используются в учебном процессе следующих вузов: Нижегородский ГИЭУ, 2017-2021 гг.; Нижегородская ГСХА, 2015-2019 гг.; РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2017-2021 гг.; Марийский ГУ, 2017-2019 гг.; Казанский ГАУ, 2016-2018 гг.; Костромская ГСХА; Пермский ГАУ; Ульяновский ГАУ, Вятская ГСХА; Академия технологии и управления, г. Новочебоксарск, 2015-2016 гг.; Чувашский ГПУ им. И.Я. Яковлева, 2016-2019 гг. Результаты были отмечены дипломами «Золотая осень 2016, 2018», «Агро Русь 2017».

**Личный вклад автора.** Постановка проблемы, формулировка цели и задач исследований, разработка методологии проектирования установок и конструктивных исполнений резонаторов, теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию рациональных параметров установок, составление заявок на изобретения, подготовка публикаций, определение энергетических и технико-экономических показателей работы установок выполнены автором при содействии научного консультанта.

**Публикации.** Основные положения диссертации изложены 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. Издана монография, объемом 18,56 п.л. Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 55 п.л., из них авторских – 20 п.л.

**Соответствие паспорту специальности.** Тема диссертации соответствует пунктам «Исследования влияния электрических и магнитных воздействий на свойства продуктов, материалов и биологических объектов в растениеводстве и животноводстве», «Обоснование и исследование методов и средств электротехнологий для малоотходных, безотходных и экологически чистых технологических процессов сельскохозяйственного сырья».

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, общих выводов и рекомендаций, списка литературы из 250 наименований, 9 приложений. Основное содержание работы изложено на 285 страницах, включая 135 рисунков, 44 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана краткая характеристика состояния и оценка актуальности исследуемой проблемы; сформулированы научная цель и задачи; определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость; описаны предмет и

объект исследования, основные положения, выносимые на защиту, даны сведения о реализации и об апробации результатов исследования.

**В первом разделе** «Состояние научной проблемы, цель и задачи исследований» проведен аналитический обзор ресурсов и объемов сырья и их электрофизических характеристик, технологий и технических средств переработки вторичного сырья животного происхождения, в том числе с использованием энергии ЭМП СВЧ. Развитие исследований, направленных на изучение и обоснование процессов, происходящих в ЭМП СВЧ при термообработке сырья, создание научных принципов проектирования СВЧ установок, а также проведение математического моделирования электромагнитных полей было осуществлено благодаря работам ученых, указанных в общей характеристике работы. В области разработки технологического оборудования предприятий мясной промышленности, и исследования процессов и аппаратов пищевых технологий проанализированы работы: Болтенкова И.М., Бредихина С.А., Горбатова В.М., Дергунова А.А., Ивашова В.И., Пелеева А.И., Курочкина А.А. и др. На основе анализа работ по теме диссертации сформулированы цель научного исследования и задачи для ее достижения.

**Во втором разделе** «Теоретическое обоснование электродинамических параметров СВЧ установок с нетрадиционными резонаторами для термообработки сырья» 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 ЭД системы «генератор-резонатор-нагрузка» и электрофизических характеристик сырья с конструктивно-технологическими параметрами и режимами работы установок. Для термообработки и обеззараживания вторичного сырья предлагаются микроволновая технология и установки непрерывно-поточного действия. Причем из-за малой глубины проникновения сантиметровых волн в сырье (1,5-2 см), технологический процесс предусматривает предварительное и дополнительное *измельчение сырья*, позволяющее повысить равномерность диэлектрического нагрева, а для снижения энергетических затрат на термообработку – *обезвоживание сырья*.

Разработаны разные нетрадиционные конфигурации объемных резонаторов (рисунок 1), предназначенные для термообработки и обеззараживания сырья в процессе обезвоживания и измельчения. Комбинированные резонаторы рассчитаны на термообработку и обеззараживание сырья предварительно обезвоженного и измельченного. Основные *критерии проектирования* следующие:

- непрерывно-поточный режим термообработки и обеззараживания сырья;
- высокая собственная добротность резонатора, возбуждаемого от нескольких маломощных магнетронов и обеспечивающих равномерное распределение электрического поля высокой напряженности для достижения бактерицидного эффекта;
- вариация производительности установки и свободного демонтажа узлов;
- электромагнитная безопасность и универсальность рабочей камеры для термообработки сырья разного состава.

**Исследование распределения электрического поля в резонаторах разной конструкции.** Для увеличения числа возбуждаемых в заданном диапазоне видов колебаний в резонаторе, позволяющих увеличить равномерность нагрева сырья, и избежать перехода СВЧ энергии из одного волновода в другой, применяли три маломощных магнетронов с размещением по периметру цилиндрического резонато-



ра со сдвигом на 120 градусов. Тогда выход энергии от каждого излучателя окажется в области узлов магнитного поля тех колебаний, которые возбуждаются соседним излучателем. 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 (рисунок 2). Результаты исследования параметров электродинамической системы с комбинированным резонатором приведены на рисунке 2, с другими конструкционными исполнениями резонаторов – на рисунке 3. Исследования показывают, что векторы напряженности ЭП собственных мод нетрадиционных резонаторов в соответствии с графической визуализацией и текстовой информацией не распределены равномерно по всей рабочей области. Амплитудные значения напряженности ЭП в наибольшей степени концентрируются по месту расположения излучателя в резонаторах. Проанализированы особенности резонаторов, которые учтены при проектировании СВЧ установок непрерывно-поточного действия для термообработки влажного сырья.

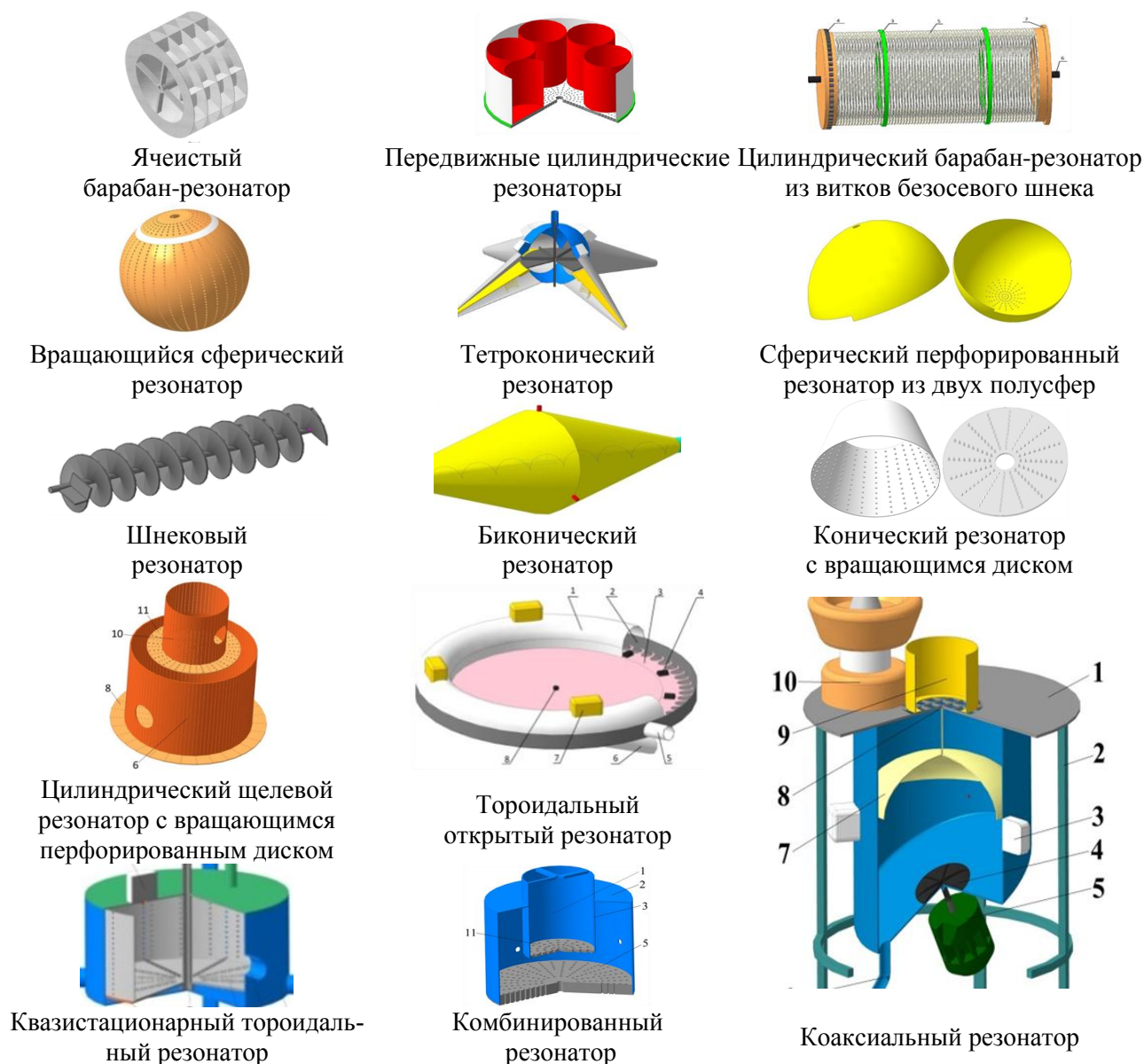


Рисунок 1 – Конфигурации разработанных резонаторов для термообработки сырья

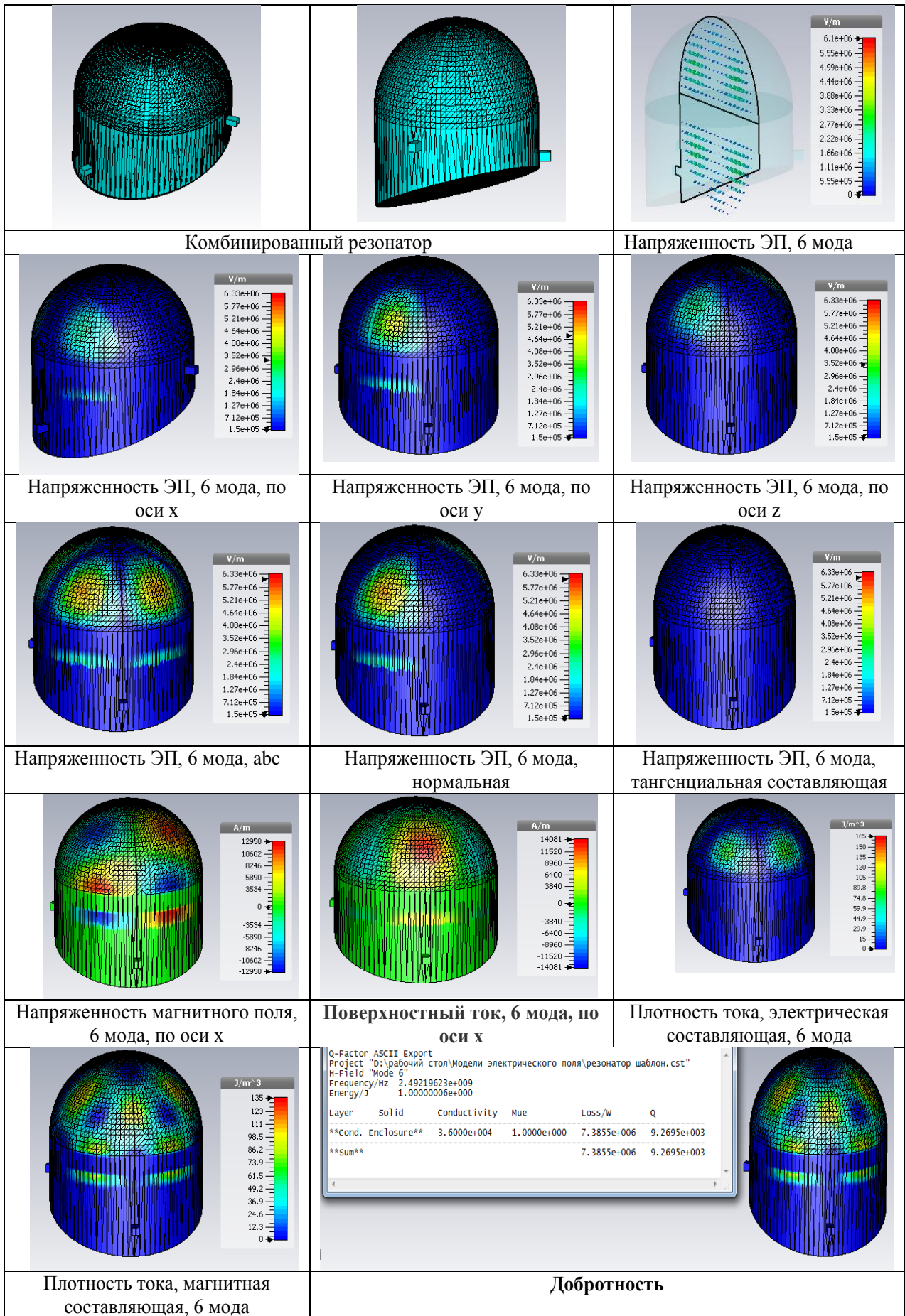


Рисунок 2 – Распределение электромагнитного поля, плотности тока, собственной добротности в комбинированном резонаторе

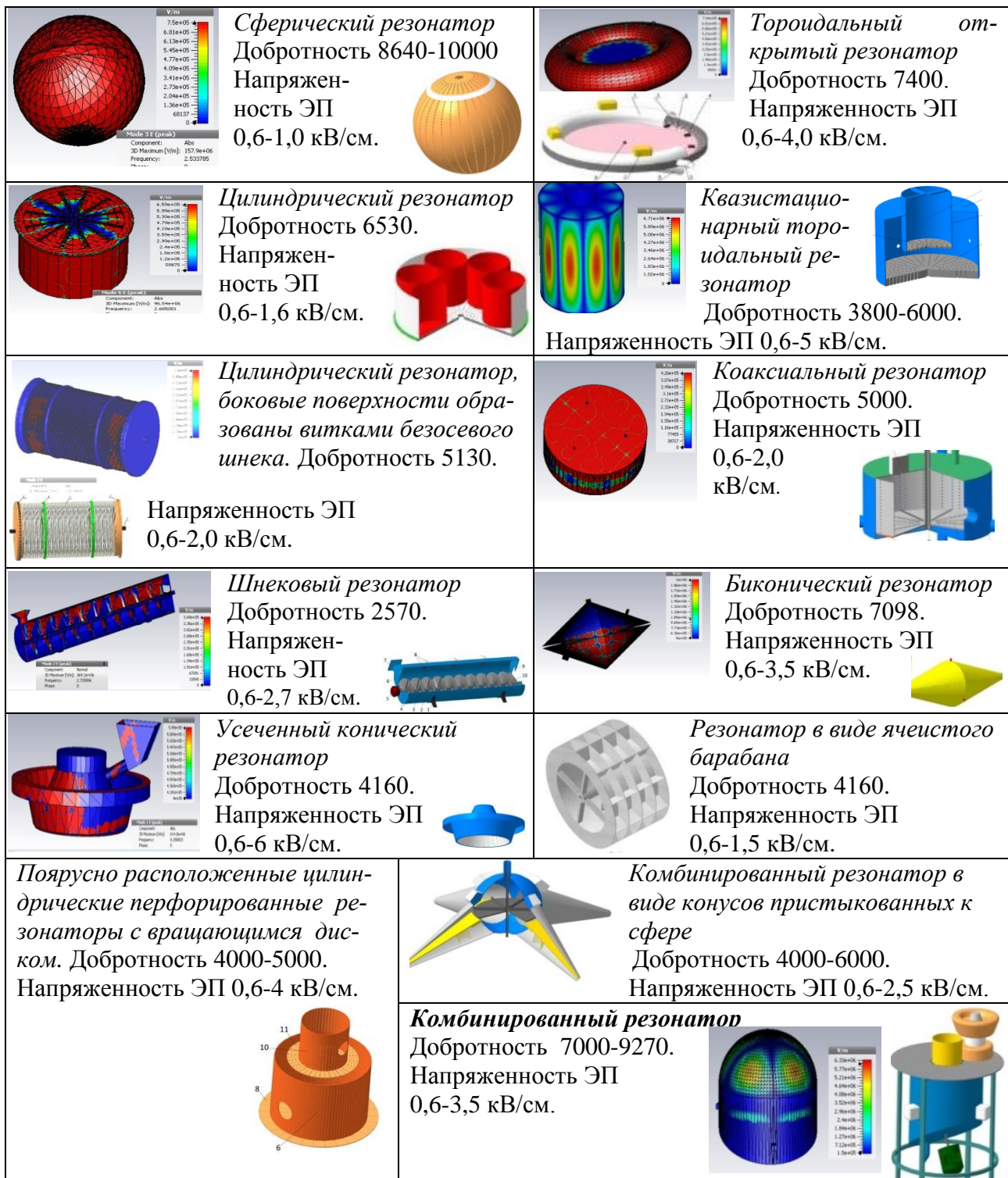


Рисунок 3 – Электродинамические параметры резонаторов различной конфигурации

При проектировании объемных резонаторов следует учесть взаимное влияние электромагнитных и тепловых процессов, что дает возможность решить задачу синтеза резонаторов оптимальных по геометрической конфигурации и размерам, по величине КПД (собственной добротности), напряженности ЭП и равномерности термообработки сырья. Основным колебанием *цилиндрического резонатора* является тип  $E_{010}$ , особенностью которого является то, что резонансная частота не зависит от длины резонатора. *Тороидальный резонатор* имеет множе-

ство резонансных частот, а эквивалентен колебательному контуру – лишь на одной резонансной частоте. Характерным признаком его является то, что энергия электрического и магнитного полей концентрируются в различных частях объема резонатора и в нем возбуждаются колебания с низшей резонансной частотой как в колебательном контуре с сосредоточенными постоянными. *Сферический резонатор* обладает самой высокой добротностью. Характерной особенностью *биконического резонатора* является наличие в резонансном объеме областей с резко выраженным экспоненциальным законом изменения ЭМП. Наличие областей с таким распределением поля позволяет удалить часть поверхности и тем самым реализовать открытую резонансную систему. Биконические резонаторы по сравнению с цилиндрическим резонатором исключают вырождение паразитных типов колебаний.

*Систематизация формул для определения собственной добротности стандартных резонаторов* убеждает, что для многих резонаторов сложного конструкционного исполнения не существует простых аналитических зависимостей, справедливых в широкой полосе частот. Поэтому собственную добротность нетрадиционных резонаторов, наряду с исследованием в программе CST Studio 2017, рассчитывали как удвоенное отношение объема, в котором запасается энергия ЭМП, к объему, в котором она расходуется, с учетом скин-слоя ( $\Delta$ ).

Результаты исследования основных ЭД параметров (напряженность ЭП и собственная добротность) разработанных резонаторов разных нетрадиционных исполнений (рисунок 3) показывают, что термообработку и обеззараживание сырья производительностью 30-40 кг/ч может обеспечить СВЧ установка с 3-4 магнетронами. Вычислены значения собственной добротности резонаторов: сферических, тороидальных, цилиндрических, биконических, тетроконических, коаксиальных, комбинированных и др. Значения собственной добротности резонаторов, вычисленные в программе и через конструкционные параметры (его объем и площадь поверхности, пользуясь программой Mathcad 15), при равном их объеме с достаточной вероятностью совпадают. Максимальной собственной добротностью (8000-10000) обладает сферический резонатор, где напряженность ЭП с тремя магнетронами достигает 0,6-1,0 кВ/см; далее биконический резонатор (7098), где напряженность ЭП 0,6-3,5 кВ/см; собственная добротность цилиндрических резонаторов (перфорированных, щелевых) не превышает 6530, в них напряженность ЭП равна 0,6-1,6 кВ/см; в тетроконических и тороидальных резонаторах с собственной добротностью 4000-6000 можно возбудить ЭП напряженностью до 3,5 кВ/см; в изготовленном комбинированном резонаторе с собственной добротностью 9270 напряженность ЭП составляет 0,6-3,5 кВ/см.

Применяя из разработанных нетрадиционных резонаторов отдельные узлы, удовлетворяющие критериям проектирования, предложены три установки с комбинированными резонаторами для термообработки и обеззараживания сырья, предварительно обезвоженного и измельченного. Это *комбинированный резонатор в виде конусов, пристыкованных к сфере* (1); *поперечно расположенные цилиндрические перфорированные резонаторы* (2); *резонатор, образованный полусферой и с цилиндром* (3), (изготовленный и испытанный образец) (рисунок 4). Собственная добротность последнего комбинированного резонатора с регулируемой высотой, вычисленная через конструкционные параметры, составляет 6910-7800, а в программе CST Studio 2017 – 9270. Напряженность ЭП равна 0,6-3,5 кВ/см.

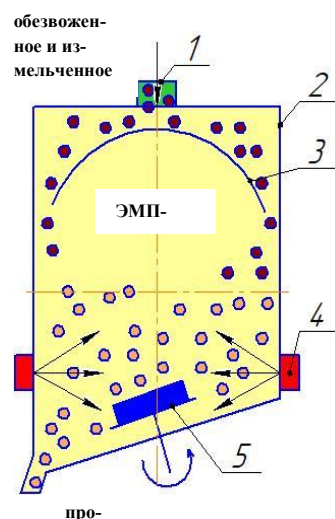


Рисунок 4 – Схема технологического процесса воздействия ЭМП СВЧ в комбинированном резонаторе:

- 1 – узел подачи измельченного и обезвоженного сырья;  
 2 – цилиндрический резонатор с наклонным и полусферическим основаниями;  
 3 – полусферическое основание; 4 – магнетроны; 5 – диск диэлектрический

Проведена *оценка соответствия каждого резонатора* оптимальным критериям путем расчета наименьших отклонений. Оценка отклонения от оптимального значения критериев для каждого резонатора показывает, что из 14 нетрадиционных резонаторов наименьшее отклонение от оптимального значения по четырем критериям имеют *три* вышеуказанные СВЧ установки с комбинированными резонаторами. Из трех конструктивных исполнений (таблица 1) по этим же критериям наибольшую эффективность можно достичь при цилиндрическом исполнении *резонатора, имеющего наклонное и полусферическое основания* (№ 3), с наименьшим отклонением 1,075.

Таблица 1 – Результаты оценки СВЧ установок для термообработки вторичного сырья животного происхождения по четырем критериям

Номер критерия	Номер установки			Оптимальное значение
	1	2	3	
	Значение критерия			
1. Собственная добротность резонатора, $\times 10^3$	7	5	8	10
2. Напряженность ЭП, кВ/см	0,6	1,0	0,9	1,0
3. Степень равномерности нагрева сырья, отн. ед.	0,7	0,7	1,0	1,0
4. Плотность мощности излучений, мкВт/см <sup>2</sup> (без экранирующего корпуса)	100	300	50	10
Отклонение	2,5	7,45	1,075	

*Распределение ЭП в комбинированном резонаторе.* При воздействии ЭМП СВЧ на многокомпонентное влажное сырье появляются температурные напряжения, поэтому необходимо разрабатывать адекватные модели с учетом мощности излучателей и их месторасположение в резонаторе; скорости передвижения сырья через резонатор; изменения объема, электрофизических и теплофизических параметров сырья в процессе воздействия ЭМП СВЧ; потерь потока излучений через щель и отверстия; собственной добротности резонатора. По мето-

дике С.И. Баскакова исследовали отдельно составляющие вектора поля колебаний типа  $E_{010}$  в резонаторах *цилиндрического* и *сферического исполнений*. Далее с учетом суперпозиции полей определили общую картину распределения ЭП в комбинированном резонаторе. Распространение колебаний ЭП в *цилиндрическом* резонаторе описывается уравнения Гельмгольца:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} + q^2 \cdot E_z = 0, \quad (1)$$

где  $r$  – радиальное распространение волны в цилиндре, радиусом  $R_1$ ;  $E_z$  – распространяющаяся напряженность ЭП по оси  $z$ ;  $q$  – поперечное волновое число;  $r, \varphi, z$  – цилиндрическая система координат.

С учетом граничных условий в области стенок резонатора, обусловленных с полусферическим его основанием, уравнение решали методом разделения переменных.

Тогда при  $r = x$ , уравнение будет:

$$\frac{d^2 R_1}{dx^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{dR_1}{dx} + \left(1 - \frac{m^2}{x^2}\right) \cdot R_1 = 0. \quad (2)$$

Это линейное дифференциальное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами решается как функция Бесселя –  $J_m(x)$  и Неймана –  $N_m(x)$ .

$$R_1(x) = C_1 \cdot J_m(x) + C_2 \cdot N_m(x),$$

где  $C_1, C_2$  – постоянные величины.

Составляющие вектора поля колебаний в цилиндрическом резонаторе с полусферическим основанием:

$$\dot{E}_z = \left(\frac{v_{mn}}{2 \cdot R_1}\right)^2 \cdot C \cdot J_m \cdot \left(\frac{v_{mn} \cdot r}{2 \cdot R_1}\right) \cdot \cos(m \cdot \varphi) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot p \cdot z}{l + R_2}\right), \quad (3)$$

где  $v_{mn}$  –  $n$ -й корень функции Бесселя  $J_m(x)$ ;  $R_2$  – радиус полусферы.

Особенностью этого колебания является то, что резонансная частота не зависит от длины цилиндрической части комбинированного резонатора ( $l$ ). Энергия, запасенная колебаниями типа  $E_{010}$  в комбинированном резонаторе, вычисляется по формуле:

$$W^{E_{010}} = 0,423 \cdot \varepsilon_a \cdot E_{\max}^2 \cdot a^2 \cdot (l + R_2). \quad (4)$$

По методикам Никольского В.В., Зайко Ю.Н., Диденко А.Н. определены возможные типы электромагнитных колебаний в *сферическом* резонаторе с помощью уравнений Максвелла с учетом граничных условий. Для реализации СВЧ установки на практике необходимо обеспечить электрическую прочность объемных резонаторов с учетом *особенностей цилиндрического и сферического резонаторов*. Цилиндрический резонатор с колебаниями типа  $E_{010}$  обладает аксиально-симметричным электромагнитным полем и собственная частота резонатора не зависит от его объема, а по сравнению с резонаторами других типов имеет наибольшую энергетическую эффективность. Основные электродинамические характеристики системы – это резонансная длина волны, собственная добротность и напряженность ЭП. Например, определена максимальная напряженность ЭП при отношении объема сырья к объему резонатора менее 0,1 по формуле А.Н. Диденко, зная собственную добротность комбинированного резонатора 6910 и мощность генераторов 2400 Вт:

$$E_{\varphi}^{max} = \sqrt{P_{ген} \cdot Q} \cdot 12,6 \left[ \sqrt{Ом} \right] \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \lambda}{V_{рез}}} = \sqrt{2400 \cdot 6910} \cdot 12,6 \cdot \sqrt{\frac{3,14 \cdot 0,1224}{3,048 \cdot 10^{-2}}} = 1,82 \text{ кВ/см.} \quad (5)$$

При такой напряженности электрическая прочность комбинированного резонатора соблюдается. Чтобы не нарушать устойчивую работу генератора и генерацию всей мощности в резонаторе, необходимо возбудить один из высших типов колебаний, например  $H_{01p}$ . Распределение ЭМП в *полусферической части комбинированного резонатора* по трем составляющим описывается по формуле А.Н. Диденко:

$$\begin{cases} E_{\varphi} = \frac{A \cdot \sin \theta}{\sqrt{r}} J_{3/2} \cdot (k \cdot r), & H_r = i \cdot \frac{2 \cdot A \cdot \cos \theta}{Z_0 \cdot k \cdot r^{3/2}} \cdot J_{3/2} \cdot (k \cdot r), \\ H_{\theta} = -i \cdot \frac{2 \cdot A \cdot \sin \theta}{Z_0 \cdot k \cdot r^{3/2}} \cdot [k \cdot r \cdot J_{1/2} \cdot (k \cdot r) - J_{3/2} \cdot (k \cdot r)], \end{cases} \quad (6)$$

где  $k = 2 \pi / \lambda_0$  – волновое число среды, заполняющий резонатор;  $J_{1/2}$  и  $J_{3/2}$  – функции Бесселя;  $A$  – параметр, учитывающий напряженность ЭМП;  $Z_0$  – сопротивление, учитывающее емкость и индуктивность резонатора;  $r$  – радиус от центра сферы до точки исследования;  $\theta = 0 \dots 2\pi$  – изменение угла до точки исследования.

Радиус полусферы  $R_2$  и резонансная длина волны  $\lambda_0$  колебаний  $H_{101}$  связаны формулой  $\lambda_0 \cdot n / 2 = 1,398 \cdot R_2$ , где  $n$  – кратность длины волны.

При  $n = 5$ ,  $R_2 = 12,24 \cdot 2,5 / (1,398 \cdot 2,5) = 17,51$  см.

Изготовлена полусфера с диаметром 35 см толщиной 2 мм, цилиндрическая часть резонатора изготовлена из алюминия толщиной 5 мм, удельной проводимостью  $35 \cdot 10^6$  См/м. Для практических расчетов собственной добротности ( $Q$ ) комбинированного резонатора высотой  $(l + R_2)$  воспользовались формулой А.Н. Диденко с учетом полусферического основания цилиндрического резонатора:

$$Q = \frac{k_k \cdot 3,51 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{R_2}{\lambda_0} \right)^3}{1,488 + 2 \cdot \left( \frac{R_2}{l + R_2} \right)^3} = \frac{(0,8 \dots 1,1) \cdot 3,51 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{17,5}{12,24} \right)^3}{1,488 + 2 \cdot \left( \frac{17,5}{60} \right)^3} = 5355 \dots 7363, \quad (7)$$

где  $k_k$  – коэффициент, учитывающий, из какого ферромагнитного материала изготовлен комбинированный резонатор (алюминий, латунь и др.);  $l$  – высота цилиндрической части резонатора.

Напряженность ЭП в *полусферической части* можно определить с учетом граничных условий по методике Диденко А.Н. через запасенную энергию комбинированного резонатора:

$$W = \frac{\epsilon_0}{2} \cdot \int_0^R \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} E_{\varphi}^2(r, \theta) \cdot r^2 \cdot dr \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi. \quad (8)$$

$$E_{\varphi}(r, \theta) = \sqrt{P_{ген} \cdot Q} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot Z_0 \cdot \lambda_0}{r}} \cdot \frac{\sin \theta}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot J_{1/2}(\mu_{1/2})} \cdot J_{3/2} \left( \frac{\mu_{3/2} \cdot r}{R_2} \right). \quad (9)$$

где  $\mu_{3/2} = 4,493$  – корень  $J_{3/2}(x)$ . Максимальное значение напряженности ЭП будет в плоскости ( $\theta = \pi / 2$ ), при  $r = 0,463 \cdot R_2$ .

Если  $\theta = \pi / 2$ , то

$$E_{\varphi}(r, \pi / 2) = \sqrt{P_{ген} \cdot Q} \cdot 20,4 \cdot 10^{-1} \cdot (\lambda_0 \cdot r)^{-1/2} \cdot J_{3/2} \left( \frac{\mu_{3/2} \cdot r}{R_2} \right), \quad (10)$$

где 20,4 имеет размерность (Ом<sup>1/2</sup>). Подставляя все значения получим:

$$E_{\varphi}(r, \pi/2) = \sqrt{2400 \cdot (5355 \dots 6910) \cdot 20,4 \cdot (12,24 \cdot 0,463 \cdot 17,51)^{-1/2}} \cdot \left( \frac{4,4934}{17,51} \cdot 0,463 \cdot 17,51 \right) = 1527,6 \dots 1628,2 \text{ В/см.} \quad (11)$$

Эта формула пригодна для инженерной оценки напряженности ЭП на уровне стыка полусферы и цилиндра, где напряженность ЭП в пределах 1,5-1,6 кВ/см. Чем больше диаметр ( $2R_2$ ) сферического резонатора, тем больше его собственная добротность  $Q = 2R_2 / 3 \cdot \Delta$ , где  $\Delta$  – толщина поверхностного слоя (скин-слоя), зависящая от удельной проводимости ферромагнитного материала изготовленного резонатора.

Решение задачи электродинамики связано с нахождением электромагнитного поля, возбуждаемого системой из ( $k$ ) излучателей. Сложение волн, приходящих из нескольких источников, проводили с учетом фазовых соотношений между ними. В разработанном комбинированном резонаторе возбуждается ЭМП СВЧ, но для загрузки сырья через патрубков в объемный резонатор предусмотрена кольцевая щель между цилиндром и соосно расположенной полусферой (рисунок 5), поэтому необходимо минимизировать возможные потери энергии за счет излучения с учетом размеров частиц сырья, попадающего в резонатор. Поэтому пусть точка наблюдения находится в зоне загрузки сырья; считаем, что волна, возбуждаемая каждым излучателем – сферическая. Решаем задачу об излучении электромагнитных волн из кольцевого отверстия между цилиндрическим корпусом и полусферой с площадью:  $S = \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2)$ , где  $R_1$  – радиус цилиндра;  $R_2$  – радиус полусферы.

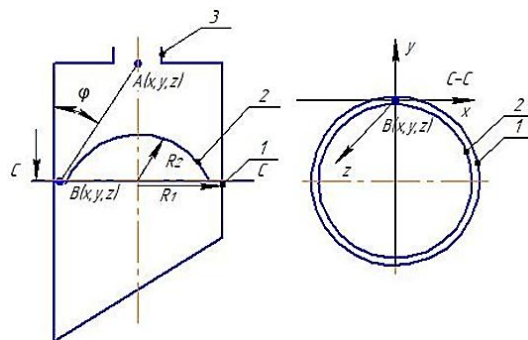


Рисунок 5 – Схема для расчета вектора напряженности ЭП в пространстве между полусферой и отверстием для подачи сырья, распространяющегося за счет излучения электромагнитных волн из кольцевого отверстия

Рассмотрим поле, существующее в пространстве на расстоянии от верхнего основания цилиндра, большем по сравнению с длиной волны  $\lambda = 12,24$  см, так и с поперечными размерами кольцевого пространства (2-4 см), (рисунки 4, 5). В точке наблюдения ( $A$ ) из формулы Кирхгофа, представленной в учебном пособии Есипок А.В., составляющую вектора напряженности электрического поля  $E_y$  можно определить с учетом площади кольцевой щели:

$$\dot{E}_y(A) = -\frac{1}{4 \cdot \pi} \int_S \left[ \frac{e^{-j\beta \cdot r}}{r} \cdot \frac{\partial \dot{E}_y}{\partial z} - \dot{E}_y \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{e^{-j\beta \cdot r}}{r} \right) \right] \cdot \partial [\pi \cdot (R_1^2 - R_2^2)]. \quad (12)$$

где  $r$  – расстояние между точкой наблюдения ( $A$ ) и средней точкой ( $B$ ) поперечного размера кольцевого пространства;  $\beta$  – фазовая постоянная волн,  $\beta = \omega \cdot \sqrt{\epsilon_o \cdot \mu_o} = 51,28$ .



Для интегрирования по площади ( $S$ ) кольцевого отверстия обозначим координатами  $x, y, z$  точку ( $B$ ) на кольцевом отверстии, а координаты точки наблюдения  $A$  ( $X, Y, Z$ ). Тогда расстояние между точками  $A$  и  $B$  определим по формуле:  $r = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}$ . Производные, из выражения (12):

$$\frac{\partial \dot{E}_y}{\partial z} \text{ при } z=0} = f \cdot \beta \cdot \dot{E}_0, \quad \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{e^{-j\beta \cdot r}}{r} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{e^{-j\beta \cdot r}}{r} \right) \cdot \frac{\partial r}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{e^{-j\beta \cdot r}}{r} \right) \cdot \frac{\partial r}{\partial z}. \quad (13)$$

Если учесть, что  $\frac{\partial r}{\partial z} = Z \cdot r = \cos \varphi$ , то из выражения (13) вытекает

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{e^{-j\beta \cdot r}}{r} \right) = -\left( \frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \cdot e^{-j\beta \cdot r}, \quad (14)$$

где  $\varphi$  – угол между нормалью к отверстию и отрезком  $AB$ .

Тогда составляющая вектора напряженности ЭП в точке наблюдения  $A$  (в загрузочном патрубке):

$$\dot{E}_y(A) = \frac{E_0}{4 \cdot \pi} \int_S \left[ j\beta \cdot \frac{e^{-j\beta \cdot r}}{r} \cdot (1 + \cos \varphi) + \frac{\cos \varphi}{r^2} \cdot e^{-j\beta \cdot r} \right] \cdot \partial [\pi \cdot (R_1^2 - R_2^2)]. \quad (15)$$

С учетом площади кольцевого пространства, интегрируем уравнение (15).

Обозначим  $G = j\beta \cdot \frac{e^{-j\beta \cdot r}}{r} \cdot (1 + \cos \varphi) + \frac{\cos \varphi}{r^2} \cdot e^{-j\beta \cdot r}$ . Для вычисления  $\dot{E}_y(A)$  составим двойной интеграл:

$$\int_0^{2\pi} \int_{R_2}^{R_1} G \cdot R \cdot \partial R \cdot \partial \theta = \int_0^{2\pi} \frac{G \cdot R^2}{2} \cdot \partial \theta = G \cdot (R_1^2 - R_2^2) \cdot \pi = G \cdot S, \quad (16)$$

где  $R = R_1 - R_2$  – ширина щели;  $\theta = 0 \dots 2\pi$  – изменение угла по периметру кольцевой щели.

В процессе попадания сырья на полусферу площадь кольцевого пространства меняется. Распределение напряженности ЭП в пространстве над сферическим резонатором тоже будет меняться:

$$\dot{E}_y(A) = \frac{E_0}{4} \cdot G \cdot (R_1^2 - R_2^2). \quad (17)$$

где  $E_0$  – напряженность ЭП после интерференции волн от источников одинаковой величины мощности излучений.

Мощность потока излучений при напряженности 1,5-1,6 кВ/см через загрузочное отверстие составляет 10-50 мкВт/см<sup>2</sup>.

**Исследование динамики нагрева многокомпонентного сырья в электромагнитном поле сверхвысокой частоты.** Удельные диэлектрические потери, следовательно, и количество теплоты, выделяемое в единице объема сырья, зависят от частоты и квадрата напряженности ЭП, от фактора диэлектрических потерь и теплофизических свойств сырья. Разнообразие форм связи влаги в сырье и их неоднородность обуславливают нелинейную зависимость диэлектрических характеристик от температуры и влажности сырья. С учетом изменения диэлектрических параметров, теплоемкости и плотности сырья в процессе нагрева в ЭМП СВЧ определяли уравнение динамики нагрева вторичного сырья животного происхождения, например, для крови убойных животных:

$$T^{1,88} = 0,105 \cdot 10^{-5} \cdot E^2 \cdot \tau + 162,58. \quad (18)$$

Графики, полученные на основании данного уравнения (18) при разной напряженности ЭП, приведены на рисунке 6.

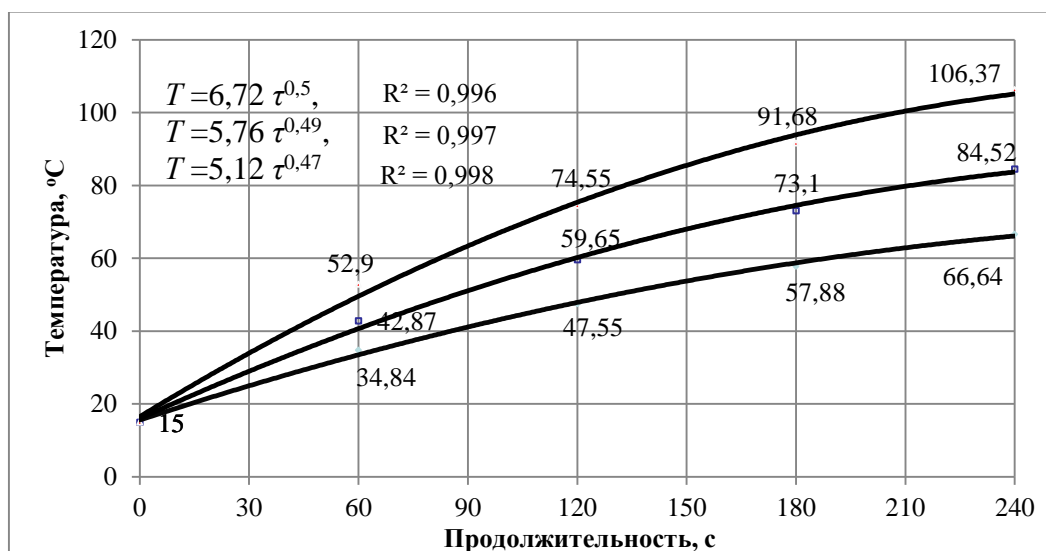


Рисунок 6 – Динамика нагрева непищевых отходов убоя животных (кровь) при напряженностях электрического поля: 1 – 0,6 кВ/см; 2 – 1,0 кВ/см; 3 – 1,5 кВ/см

Теоретические значения динамики диэлектрического нагрева непищевых отходов показывают, что при напряженности ЭП 1,5 кВ/м сырье нагревается до 100-105°C за 4 мин. Разработан алгоритм согласования конструкционных параметров резонатора и параметров ЭД системы с технологическими критериями СВЧ установки для термообработки вторичного сырья животного происхождения. Он включает определение необходимой мощности электромагнитных излучений для снижения бактериальной обсемененности сырья, например, в два раза с 1 млн. КОЕ/г до ПДУ (500 тыс. КОЕ/г), содержащего бактерии коли ( $k = 2400-2500 \text{ мкВт}\cdot\text{с}/\text{см}^2$ ) при производительности установки  $Q = 36 \text{ кг/ч}$  ( $10 \text{ см}^3/\text{с}$ ) и КПД = 0,75, по формуле Соколова В.Ф. По методике Ю.В. Корчагина определяли критическую напряженность ЭП в резонаторе, при которой прекращается жизнедеятельность микроорганизмов. По методике Ю.Н. Пчельникова вычисляли объем резонатора, обеспечивающего критическую напряженность ЭП для необходимой мощности СВЧ генератора. В объеме резонатора 17-28 л с тремя источниками СВЧ энергии, мощностью 2400 Вт, собственной добротностью не менее 6000, можно возбудить ЭП напряженностью 1,2-1,5 кВ/см.

**В третьем разделе** «Методологические аспекты исследования и разработки СВЧ установок для термообработки вторичного сырья животного происхождения» 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.

Методика разработки основных узлов многогенераторных радиогерметичных СВЧ установок, состоящих из маломощных магнетронов с воздушным охлаждением, приведена на рисунке 7.

Непрерывный режим работы СВЧ установки можно обеспечить за счет транспортирования сырья через резонатор, за счет передвижных или вращающихся частей резонатора, но с использованием заградительных волноводов для ограничения электромагнитных излучений. В зависимости от консистенции сырья транспор-

тирующим механизмом может быть: диск, шнек, ротор, барабан, вибратор, насос и т.п. В случае использования свободно подвешенной полусферы как часть резонатора, на выпуклую поверхность которой падает влажное измельченное сырье, перемещение его через ЭМП происходит без транспортирующих механизмов, следовательно, термообработка происходит при сниженных эксплуатационных затратах. Биконический резонатор обеспечивает радиогерметичность установки без экранирующего корпуса и запредельных волноводов из-за имеющегося критического сечения на вершинах конусов, от которого волны отражаются в обратную сторону. В случае согласования размеров прорезей с критическим сечением для сантиметровых волн при подаче сырья и выгрузки продукта через вершины биконуса обеспечивается радиогерметичность СВЧ установки. Методология проектирования СВЧ установок для термообработки вторичного сырья приведена на рисунке 8.

МНОГОГЕНЕРАТОРНЫЕ РАДИОГЕРМЕТИЧНЫЕ СВЧ УСТАНОВКИ, состоящие из								
<b>ИСТОЧНИКОВ ЭМИ – МАГНЕТРОНОВ</b> с воздушным охлаждением, излучатели направлены в один <b>РЕЗОНАТОР</b> или каждый <b>РЕЗОНАТОР</b> с индивидуальным излучателем								
По конструкционному исполнению резонаторы выполнены								
сферические	тороидальные	цилиндрические	конические	комбинированные	биконические			
эллипсоидные	коаксиальные	призматические	шнековые		в виде астры			
должны содержать					без запредельных волноводов			
запредельные волноводы								
<b>РЕЗОНАТОРЫ</b> могут быть выполнены из: неферромагнитного или диэлектрического материалов								
стационарные			передвижные			вращающиеся		
с перфорацией	без перфорации	щелевые	с перфорацией	без перфорации	щелевые	с перфорацией	без перфорации	щелевые
Механизмы, транспортирующие сырье через резонатор - это								
терочные диски	шнеки	роторы	вибраторы	ячеистые барабаны	ленточные транспортеры	насос	самотеком	
<b>КОМБИНИРОВАННЫЙ РЕЗОНАТОР</b>				<b>БИКОНИЧЕСКИЙ</b>  без запредельного волновода				
КОНУС	соединить с							
ТЕТРОКОНУС	С ПОЛУСФЕРОЙ или СО СФЕРОЙ							
<b>СЫРЬЕ</b>								
измельченное высокой влажности			измельченное обезвоженное			жиросодержащее		
продукт – вязкая масса			продукт – рассыпчатая масса			продукт - вытопленный жир и шквара		

Рисунок 7 – Методика разработки основных узлов СВЧ установки

Методология предусматривает реализацию критериев функционирования установок вариацией конфигураций объемных резонаторов с обоснованными конструктивно-технологическими параметрами с учетом критериев оценки кормовой ценности продукта путем использования алгоритма теоретических и экспериментальных исследований.

Проведен анализ разработанных конструкционных исполнений СВЧ установок непрерывно-поточного действия для термообработки и обеззараживания вторичного сырья животного происхождения. При этом установки сгруппировали с учетом конструкции объемных резонаторов и содержания механизмов для предварительного измельчения сырья, а оценивали их по удельным энергетическим затратам на термообработку сырья в процессе обезвоживания и соответствия их основным критериям проектирования. Это возможность обеспечения высокой собственной добротности резонатора и напряженности ЭП, достаточной для обеззараживания сырья при сохранении кормовой ценности и электромагнитной безопасности.

## Методология проектирования СВЧ установок непрерывно-поточного действия

### Критерии функционирования установок:

- непрерывность технологического процесса;
- высокая собственная добротность резонатора;
- высокая напряженность электрического поля;
- сочетание воздействия ЭМП СВЧ с процессами дополнительного измельчения;
- радиогерметичность резонатора;
- универсальность установки для широкого класса сырья;
- равномерность распределения ЭП в резонаторе и в сырье;
- варьирование производительности установки;
- использования маломощных магнетронов с воздушным охлаждением.
- возможность обеспечения санитарной обработки установки.

### Критерии оценки кормовой ценности белкового продукта:

- снижение микробиологической обсемененности продукта;
- снижение эксплуатационных затрат на технологический процесс;
- улучшение органолептических показателей белкового продукта.

### Алгоритм теоретических и экспериментальных исследований

- рассмотреть элементы теории распределения волн в резонаторе с сырьем;
- исследовать распределения ЭМП в объемных резонаторах разной конфигурации;
- определить собственную и нагруженную добротности резонаторов;
- выявить математические выражения, описывающие динамику эндогенного нагрева сырья при изменении их электрофизических параметров;
- получить регрессионные зависимости для оптимизации технологических параметров установок для термообработки вторичного сырья;
- оценить радиогерметичность СВЧ установок и экономическую эффективность внедрения их в фермерское хозяйство.

### Конфигурации нетрадиционных резонаторов

Разработать СВЧ установки с нетрадиционными резонаторами: передвижными цилиндрическими (2629259, 2661372); тороидальным резонатором (2629159); сферическими (2636155, 2660906); коническими (2694179); резонатором между двумя сферами (2629221); в виде ячеистого барабана (2671714); коаксиальным резонатором (2671710); в виде без осевого винтового шнека (2671712); биконическим резонатором (2729151); тетроконическими резонаторами (2690482); с комбинированным резонатором (2729153).

Рисунок 8 – Методология проектирования СВЧ установок для термообработки вторичного сырья животного происхождения

**1. СВЧ установка непрерывно-поточного действия со сферическими резонаторами для термообработки и обеззараживания предварительно измельченного жиродержащего сырья** (патент 2636155). Установка (рисунок 9) содержит полусферический экранирующий корпус, по периферии окружности которого жестко установлены нижние перфорированные полусферы, состыкованные с верхними полусферами, образуя перфорированные сферические резонаторы, куда направлены излучатели от генераторов, установленных на крышку корпуса, глубина которой равна радиусу полусферы. Через центр основания крышки в рабочую камеру направлен измельчающий механизм волчка, вокруг которого внутри крышки установлены электрогазоразрядные лампы, запитанные от генераторов килогерцовой частоты. При этом по центру полусферического корпуса установлен ферромагнитный диск так, что его край находится внутри сферических резонаторов, где на стыке полусфер имеется прорез размером больше, чем толщина диска с радиально направляющими и сырьем.

**Преимущества:** радиогерметичность обеспечивают заперделные волноводы; высокая собственная добротность сферических резонаторов; термообработка и обеззараживание *предварительно измельченного сырья* за счет комплексного воздействия ЭМП килогерцовой и сверхвысокой частоты; удельные энергетические затраты 0,124 кВт·ч/кг.

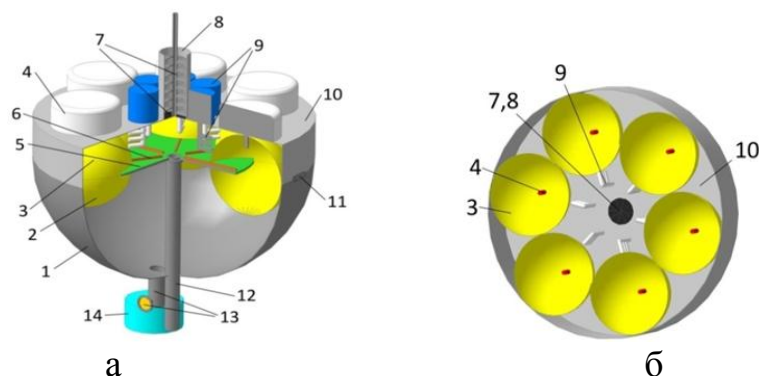


Рисунок 9 – СВЧ установка со сферическими резонаторами:

а) общий вид; б) расположение полусфер:

1 – экранирующий корпус; 2, 3 – нижние и верхние полусферы; 4 – СВЧ генераторы; 5 – диск; 6 – направляющие из ферромагнитного материала; 7 – измельчающий механизм; 8 – приемный патрубок; 9 – источники энергии килогерцовой частоты с электрогазоразрядными лампами; 10 – крышка корпуса; 11 – шарнирные петли; 12 – вал привода диска; 13 – сливной патрубок с вентилем; 14 – шестеренчатый насос

**2. Многоярусная СВЧ установка непрерывно-поточного действия с цилиндрическими резонаторами для термообработки и обеззараживания в процессе обезвоживания предварительно измельченного влажного сырья (патент 2661372).** Установка содержит поярусно расположенные цилиндрические экранирующие корпуса 2, 5, 9 (рисунок 10).

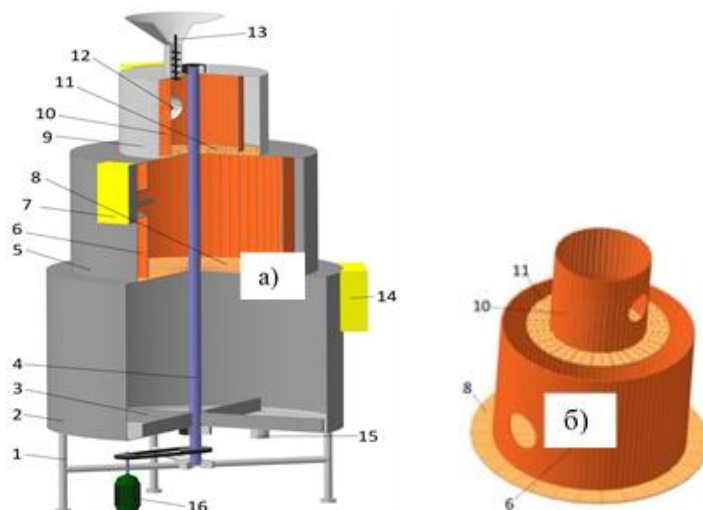


Рисунок 10 – Многоярусная СВЧ установка с цилиндрическими резонаторами:

а) общий вид; б) ярусные цилиндрические резонаторы; 1 – стол; 2 – экранирующий корпус-резонатор нижнего яруса; 3 – перемешивающий механизм; 4 – диэлектрический вал; 5 – корпус второго яруса; 6, 10 – резонаторы соответствующих ярусов; 7, 14 – СВЧ генераторы; 8 – вращающийся перфорированный диск; 9 – корпус первого яруса; 10 – резонатор первого яруса; 11 – вращающийся диск в виде терки; 12 – излучатель первого яруса; 13 – измельчитель с нагнетательным шнеком; 15 – выгрузной патрубок; 16 – электродвигатель

Внутри корпусов соосно установлены цилиндрические перфорированные резонаторы 2, 6, 10 с разными диаметрами. Основания резонаторов выполнены в виде *тёрочных дисков* 8, 11 с разными диаметрами, закрепленных на валу 4, который вращается от электродвигателя 16. Поверхность стола служит нижним основанием резонатора 6 нижнего яруса, а над поверхностью расположен перемешивающий механизм.

вающий механизм 3, закрепленный на валу 4. На боковой поверхности каждого корпуса установлены СВЧ генераторы 7, 12, 14. На верхнем основании корпуса 9 первого яруса установлен *измельчающий механизм* 13 с нагнетательным шнеком и загрузочной емкостью.

*Преимущества:* ярусное обезвоживание предварительно *измельченного сырья* за счет центробежной силы; равномерная термообработка и обеззараживание при разных дозах воздействия по ярусам в процессе дополнительного *измельчения и обезвоживания*; удельные энергетические затраты 0,12-0,137 кВт·ч/кг.

**3. СВЧ установка непрерывно-поточного действия с шнековым резонатором для термообработки и обеззараживания предварительно измельченного сырья** (патент 2679203). СВЧ установка (рисунок 11) содержит экранирующий корпус, выполненный из двух половинок 2, 6. Внутри нижней части корпуса 2 расположен шнек 3. На винтовых поверхностях шнека имеются направляющие 4. На верхней части корпуса 6 расположены загрузочный патрубок 7 с *измельчителем* и СВЧ генераторы 8. Патрубок установлен с одной торцевой стороны корпуса 2, а с другого торца – выгрузной люк 9. Перфорированный лоток 10 расположен на шнеке со стороны выгрузного люка.

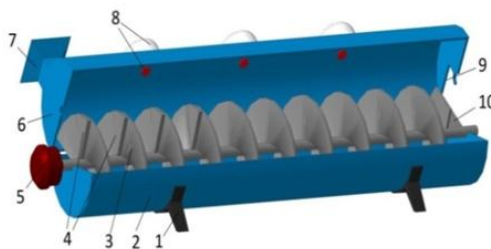


Рисунок 11 – СВЧ установка со шнековым резонатором:

- 1 – стойка; 2 – нижняя часть корпуса; 3 – шнек; 4 – направляющие пластины;  
5 – электропривод; 6 – верхняя часть корпуса; 7 – загрузочный патрубок; 8 – СВЧ генератор;  
9 – люк для выгрузки продукции; 10 – перфорированный лоток

*Преимущества:* равномерный нагрев с соблюдением скважности технологического процесса, равной 0,5, для выравнивания давления и температуры в сырье; *дополнительное измельчение* в процессе термообработки; удельные энергетические затраты 0,15-0,166 кВт·ч/кг.

**4. СВЧ установка непрерывно-поточного действия с цилиндрическими резонаторами в виде безосевого винтового шнека для термообработки и обеззараживания в процессе измельчения и обезвоживания сырья** (патент 2671712). Установка содержит рабочую камеру с механизмом фиксации и регулирования ее угла наклона (рисунок 12). Рабочая камера представлена в виде экранирующего корпуса, внутри которого по поперечному сечению параллельно установлены вращающиеся цилиндрические резонаторы, удерживаемые на диэлектрических осях и ободках, прикрепленных к корпусу с внутренней стороны. Боковые поверхности резонаторов образованы витками безосевых шнеков так, что сечение витков представлено как *лезвия ножа*. Со стороны диэлектрических оснований резонаторов на корпус установлены СВЧ генераторы. Патрубок для загрузки *не измельченного* сырья пристыкован к диэлектрическому основанию первого резонатора, под которым на дне корпуса имеется мелкоячеистый фильтр, а под последним резонатором дно корпуса перфорировано, куда пристыкован выгрузной патрубок.

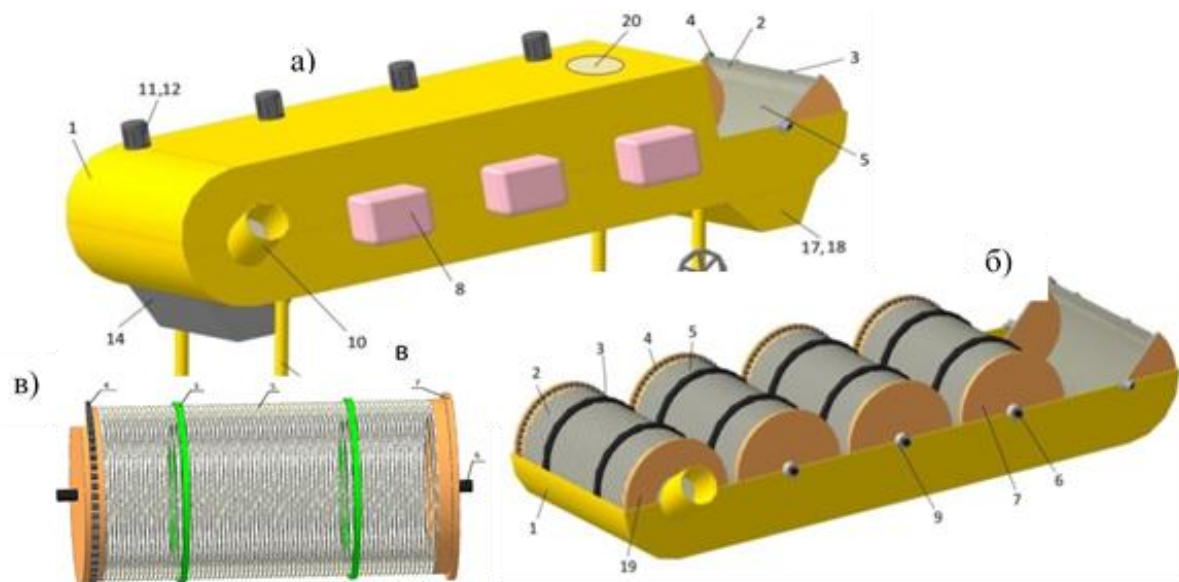


Рисунок 12 – СВЧ установка с цилиндрическими резонаторами в виде винтового шнека:  
 а) общий вид; б) резонаторы в корпусе; в) цилиндрический резонатор;  
 1 – экранирующий корпус; 2 – цилиндрический резонатор; 3 – диэлектрические ободки;  
 4 – венец, опоясывающий резонатор; 5 – боковая поверхность резонатора, образованная из витков безосевого шнека; 6 – диэлектрическая ось; 7 – диэлектрическое основание резонатора;  
 8 – СВЧ генераторы; 9 – диэлектрические подшипники; 10 – патрубок для подачи сырья;  
 11 – ведущая шестерня; 12 – электродвигатели для вращения резонаторов; 13 – виток шнека в виде лезвия ножа; 14 – мелкоячеистый фильтр; 15 – механизм для фиксации и изменения угла наклона рабочей камеры; 16 – каркас; 17 – перфорация; 18 – патрубок для выгрузки продукта; 19 – диэлектрическое основание первого резонатора с отверстием для подачи сырья; 20 – смотровое окно

*Преимущества:* вариативность производительности установки; тонкое измельчение и обезвоживание сырья в процессе термообработки и транспортировки; удельные энергетические затраты 0,145-0,165 кВт·ч/кг.

**5. СВЧ установка непрерывно-поточного действия с ячеистыми барабанами для термообработки и обеззараживания предварительно измельченного сырья** (патент 2671714). Установка (рисунок 13) содержит внутри экранирующего корпуса 4 неферромагнитные пустотелые ячеистые барабаны 1 с продольными неферромагнитными отсеками 9. Они имеют поперечные радиопрозрачные ячейки 8 шириной не более двух глубин проникновения волны. Размеры отсеков согласованы с длиной волны. Под барабанами имеется ванна 3, обеспечивающая полное погружение отсеков. К ванне пристыкован *измельчитель* 2. У боковой поверхности барабанов, ниже их горизонтальной оси, на валу 12 установлены радиопрозрачные скребковые валки 6 так, что их пластинчатые скребки 7 погружены в соответствующие радиопрозрачные ячейки. Вращения барабанов и валков направлены навстречу друг другу. Под валками установлена выгрузная емкость 5, а вдоль боковой поверхности корпуса 4 – генераторы 11 так, что излучатели направлены в отсеки, выполняющие функции объемных резонаторов. На корпусе предусмотрены вытяжные вентиляторы 10 и люк.

*Преимущества:* возможность создания высокой напряженности ЭП в отсеках; равномерная термообработка и обеззараживание предварительно *измельченного сырья* при перемещении в ячейках; удельные энергетические затраты 0,15-0,16 кВт·ч/кг.

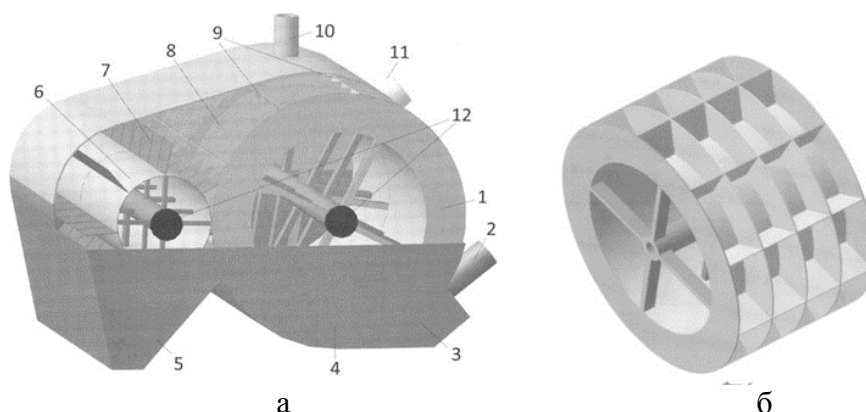


Рисунок 13 – СВЧ установка с ячеистыми барабанами:

а) общий вид в разрезе; б) ячеистый барабан;

- 1 – ячеистые барабаны; 2 – измельчитель; 3 – ванна для вязкого сырья;  
 4 – экранирующий корпус; 5 – выгрузная емкость; 6 – радиопрозрачные скребковые валки;  
 7 – пластинчатый скребок из фторопласта; 8 – ячейки из фторопласта;  
 9 – отсеки из неферромагнитного материала; 10 – вытяжные вентиляторы;  
 11 – СВЧ генераторы; 12 – валы для электропривода барабанов и валков

**6. СВЧ установка непрерывно-поточного действия с коаксиальным резонатором для термообработки сырья** (патент 2671710). Установка (рисунок 14) содержит цилиндрический экранирующий корпус 2, внутри которого соосно расположен неферромагнитный цилиндр 4, выполненный в виде *терки*. Он жестко установлен на диск 6, образуя ротор. Диск с цилиндром вращается с помощью электродвигателя. Корпус 2 прикреплен к амортизационным пружинам. Цилиндр и вал 7 образуют коаксиальный резонатор, куда направлены излучатели от генераторов.

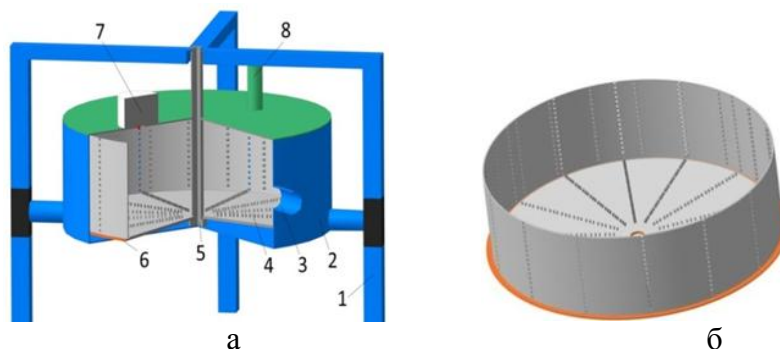


Рисунок 14 – СВЧ установка с коаксиальным резонатором:

а) общий вид; б) перфорированный резонатор;

- 1 – монтажная стойка; 2 – экранирующий корпус; 3 – выгрузной патрубком;  
 4 – цилиндр в виде терки; 5 – вал; 6 – диск; 7 – СВЧ генераторы; 8 – патрубок для приема сырья

Через приемный патрубок 8 предварительно измельченное сырье попадает в резонатор. Патрубок 3 предназначен для присоединения пневмотранспортера. Под основанием корпуса установлен шатунный механизм. Измельченное до определенных размеров сырье проходит через боковую поверхность резонатора 4, накапливается в узком кольцевом пространстве, откуда через выгрузной патрубок 3 транспортируется за счет вытяжного вентилятора в циклон-разгрузитель.

*Преимущества:* возможность создания высокой напряженности ЭП для обеззараживания и термообработки при тонком *измельчении сырья*; обеспечение электромагнитной безопасности; удельные энергетические затраты 0,14-0,15 кВт·ч/кг.



**7. Многомодульная СВЧ установка непрерывно-поточного действия с коническими резонаторами для обезвоживания и термообработки предварительно измельченного сырья** (патент 2694179). Установка содержит экранирующий корпус 1, внутри которого расположены рабочие камеры 2 (рисунок 15), состоящие из двух частей. Верхняя часть камеры представлена как соосно состыкованные периметрами большого и малого диаметров усеченные конические корпуса. Во внутреннем усеченном коническом корпусе к образующей пристыкована усеченная коническая часть резонатора 11, выполненная в виде терки с внутренней насечкой, а также установлен измельчающий механизм 10, расположенный на крышке корпуса. В нижней части рабочей камеры соосно расположены тарелка 14 и поддон 15 в виде усеченных конусов, установленных на вал электродвигателя 8.

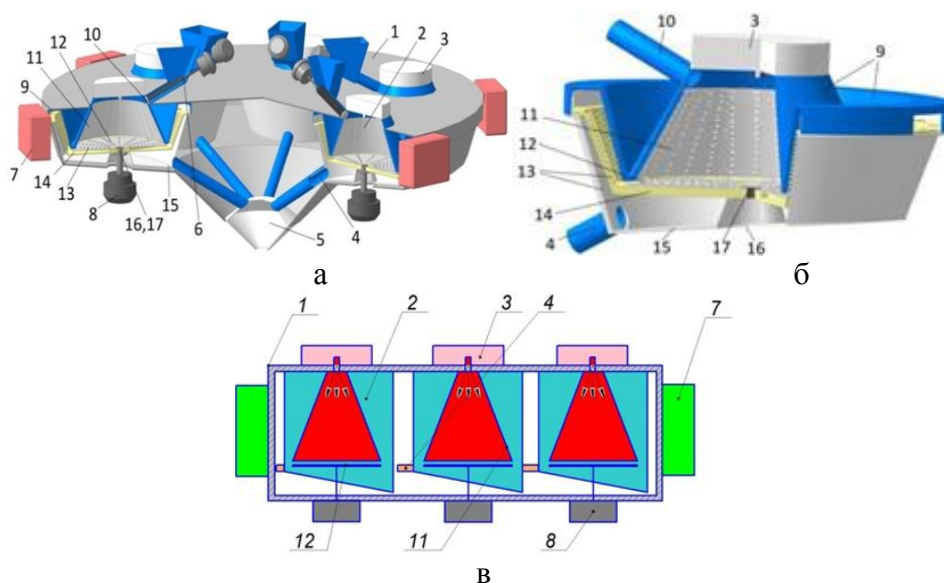


Рисунок 15 – Многомодульная СВЧ установка с коническими резонаторами:

а) общий вид; б) рабочий модуль; в) технологическая схема;

- 1 – экранирующий корпус; 2 – рабочие камеры; 3 – СВЧ генераторы; 4 – сливные патрубки;
- 5 – емкость для жидкой фракции; 6 – измельчители; 7 – емкости для твердой фракции;
- 8 – электродвигатели; 9 – верхняя часть рабочей камеры; 10 – измельчающий механизм;
- 11 – конические части резонаторов; 12 – дисковые части резонаторов;
- 13 – нижняя часть рабочей камеры; 14 – коническая тарелка; 15 – поддон конический;
- 16 – отверстие для фиксатора тарелки и диска; 17 – отверстие для вала

Образующая тарелки имеет прорези, а к кольцевому основанию неферромагнитного поддона, расположенного под наклоном, пристыкован сливной патрубок 4. В центре имеется подставка в виде усеченного цилиндра, где горизонтально установлена диэлектрическая тарелка с ребрами жесткости. В тарелку поставлена и закреплена с помощью зажимного винта дисковая терка 12 как основание конического резонатора. Сливные патрубки направлены к центру корпуса, где расположена емкость 5 для приема жидкой фракции, а емкости 7 для твердой фракции пристыкованы к образующей корпуса с наружной стороны в тех местах, где на верхних краях поддонов имеются отверстия. *Преимущества:* вариативность производительности установки, *измельчение и обезвоживание* сырья при термообработке с обеспечением электромагнитной безопасности за счет запердельных волноводов и усеченных конических резонаторов; удельные энергетические затраты 0,112-0,16 кВт·ч/кг при производительности установки 70-100 кг/ч.

**8. СВЧ установка непрерывно-поточного действия с биконическим резонатором для термообработки и обеззараживания предварительно измельченного сырья** (патент 2729151). СВЧ установка (рисунок 16) с биконическим резонатором обеспечивает радиогерметичность и высокую напряженность ЭП. По данным О.О. Дробахина соответствующим выбором угла при вершине конуса можно сформировать электромагнитное поле, сконцентрированное в требуемой части резонатора. Внутри биконического резонатора соосно по центральной его оси установлен цилиндрический диэлектрический корпус с винтовым диэлектрическим шнеком.

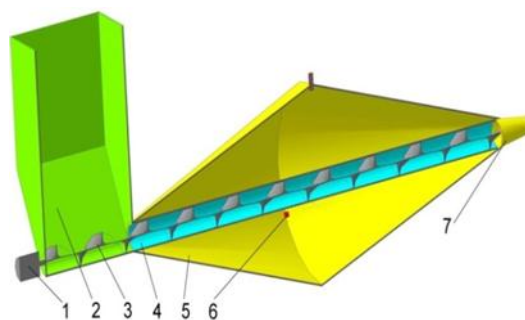


Рисунок 16 – СВЧ установка с биконическим резонатором и шнеком:

- 1 – мотор-редуктор для привода шнека; 2 – загрузочная емкость для измельченного сырья; 3 – винтовой шнек; 4 – цилиндрический корпус шнека; 5 – биконический резонатор; 6 – магнетроны; 7 – выгрузное отверстие на вершине конуса

Отверстие на одной вершине кругового конуса 5 и конец корпуса шнека пристыкованы к нижнему основанию загрузочной емкости. Магнетроны установлены по периметру стыка оснований круговых конусов со сдвигом на 120 градусов. При вращении шнека спиралевидные ребра проталкивают предварительно *измельченное* сырье внутри корпуса. Перемещаясь через биконический резонатор сырье подвергается воздействию ЭП высокой напряженности.

*Преимущества:* радиогерметичность установки; равномерный нагрев сырья при передвижении диэлектрическим винтовым шнеком; *измельчение* сырья; удельные энергетические затраты 0,15-0,16 кВт·ч/кг.

**9. СВЧ установка непрерывно-поточного действия с комбинированным резонатором в виде конусов, пристыкованных к сфере, для термообработки и обеззараживания предварительно измельченного сырья** (патент 2690482) (рисунок 17). Установка разработана с учетом достоинств биконического резонатора: обеспечения высокой напряженности ЭП и радиогерметичности.

Рабочая камера представлена в виде конических резонаторов 3, круглые основания которых, состыкованы со сферическим корпусом. В верхней части полусферы установлен загрузочный патрубок 1. К нижней полусфере корпуса равномерно по периметру пристыкованы конические резонаторы. Оси конических резонаторов являются продолжением радиальных осей сферического корпуса. Внутри корпуса соосно установлен вращающийся диск 8, на котором имеются направляющие лопатки, а под диском – толкатели 10. Лопатки расположены по радиальным осям диска. Толкатели, соприкасаясь с упорными элементами 7, обеспечивают вибрацию диэлектрического лотка 4. На вершинах конических резонаторов имеются выгрузные отверстия 5. Для сохранения радиогерметичности установки диаметр выгрузного отверстия не превышает четверти длины волны. Диаметр

сферического корпуса и конструкционные параметры конических резонаторов согласованы с длиной волны. Сырье падает на вращающийся диэлектрический диск и с помощью направляющих лопастей за счет центробежной силы сбрасывается на лотки 4. В рабочей камере возбуждается ЭМП СВЧ, где сырье при передвижении по диску 8 и лоткам подвергается термообработке и обеззараживанию.

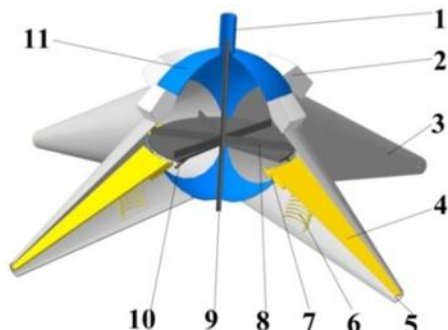


Рисунок 17 – СВЧ установка с тетроконическими резонаторами:

- 1 – загрузочный патрубок; 2 – СВЧ генератор; 3 – конические резонаторы;
- 4 – диэлектрический направляющий лоток; 5 – выгрузное отверстие;
- 6 – пружина с радиопоглощающим покрытием; 7 – упорный элемент;
- 8 – диэлектрический диск с направляющими лопатками; 9 – вал электропривода;
- 10 – диэлектрический толкатель; 11 – сферический корпус

*Преимущества:* радиогерметичность за счет тетроконических резонаторов; высокая собственная добротность сферического корпуса; удельные энергетические затраты 0,11-0,13 кВт·ч/кг.

**10. СВЧ установка непрерывно-поточного действия с комбинированным резонатором, образованным полусферой и с цилиндром для термообработки и обеззараживания предварительно измельченного и обезвоженного сырья** (патенты 2729153, 26937737). Разработанная и *изготовленная* установка (рисунок 18) состоит из измельчающего и центрифугирующего устройств, комбинированного резонатора с магнетронами, экранирующего корпуса. Верхняя часть комбинированного резонатора представлена полусферой, центральная часть – образующей цилиндра, а нижняя часть – наклонным конусом. На дне резонатора расположен диэлектрический диск и выгрузной патрубок с шаровым краном. Измельченное сырье влажностью до 65% попадает в центрифугу 10, далее твердая фракция падает на поверхность полусферы 7, свободно подвешенной с центральной точки.

Диаметр полусферы 7 меньше, чем диаметр цилиндра. Между ними имеется кольцевой зазор, через который твердая фракция сырья после центрифугирования падает на полусферу, при колебании которой сырье соскальзывает с его поверхности и попадает в комбинированный резонатор. Регулированием высоты подвеса полусферы можно изменить объем резонатора. Ширина кольцевого зазора, предназначенного для загрузки сырья в комбинированный резонатор, и диаметр неферромагнитного патрубка с шаровым краном для выгрузки продукта, не превышают четверти длины волны. Магнетроны установлены со сдвигом на 120 градусов с наружной стороны боковой поверхности резонатора. Твердая фракция сырья подвергается в резонаторе воздействию ЭМП СВЧ, варится, обеззараживается в процессе перемешивания с помощью диэлектрического диска 4. Выгружается через патрубок с шаровым краном 6.

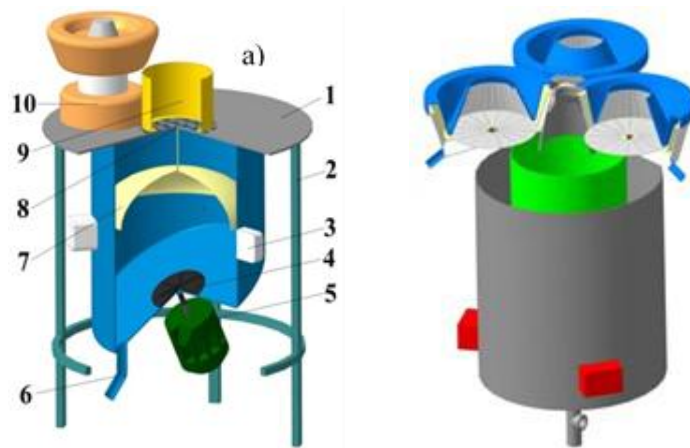


Рисунок 18 – СВЧ установка с комбинированным резонатором:

а) общий вид установки в разрезе; б) расположение отдельных узлов установки;

1 – стол; 2 – монтажный каркас; 3 – магнетроны на поверхности цилиндра; 4 – диэлектрический диск с направляющей пластиной; 5 – электродвигатель; 6 – шаровой кран; 7 – полусферическая часть комбинированного резонатора; 8 – съемная переключательная на направляющей трубе; 9 – приемная емкость для твердой фракции; 10 – центрифуга

*Преимущества:* обеспечение непрерывного процесса измельчения, обезвоживания сырья с воздействием ЭМП СВЧ в комбинированном резонаторе, обладающим достаточно высокой собственной добротностью и высокой напряженностью ЭП; отсутствие механизма, транспортирующего обезвоженное сырье в резонатор; удельные энергетические затраты без учета мощности измельчителя и центрифуги 0,11-0,13 кВт·ч/кг, при производительности установки 30-40 кг/ч.

Итак, в нетрадиционных резонаторах в процессе термообработки предварительно измельченного сырья происходит его обезвоживание, и удельные энергетические затраты составляют 0,14-0,17 кВт·ч/кг, при производительности 35-40 кг/ч. Комбинированные резонаторы обеспечивают термообработку предварительно измельченного и обезвоженного сырья при удельных энергетических затратах 0,11-0,13 кВт·ч/кг.

**Раздел четвертый** «Экспериментальные исследования процессов термообработки вторичного сырья животного происхождения воздействием ЭМП СВЧ» содержит: результаты исследования динамики нагрева сырья (рисунок 19); регрессионные модели; результаты исследования распределения температурного поля по поверхности сырья; сравнительную технологическую схему производства белкового корма из вторичного сырья животного происхождения; технические характеристики созданной и апробированной СВЧ установки с комбинированным резонатором; результаты оценки электромагнитной безопасности.

Эмпирические выражения, описывающие динамику нагрева печени и почек при разных удельных мощностях генератора: 8 Вт/г, 5 Вт/г, 2 Вт/г, соответственно:

$$T = 54,49 \ln(\tau) + 19,64; T = 37,85 \ln(\tau) + 19,91; T = 24,74 \ln(\tau) + 15,88. \quad (19)$$

В результате исследований изменения общего микробного числа (ОМЧ) в непищевых отходах животного происхождения в зависимости от температуры нагрева в ЭМП СВЧ при разной исходной обсемененности: 2,1 млн. КОЕ/г; 1,3 млн. КОЕ/г, получены эмпирические выражения:

$$\text{ОМЧ} = 2,246 \cdot e^{-0,022 \cdot T}; \quad \text{ОМЧ} = 1,277 \cdot e^{-0,017 \cdot T}. \quad (20)$$

При температуре в сырье 75-105 °С бактериальная обсемененность снижается ниже предельно допустимого уровня 500 тыс. КОЕ/г.

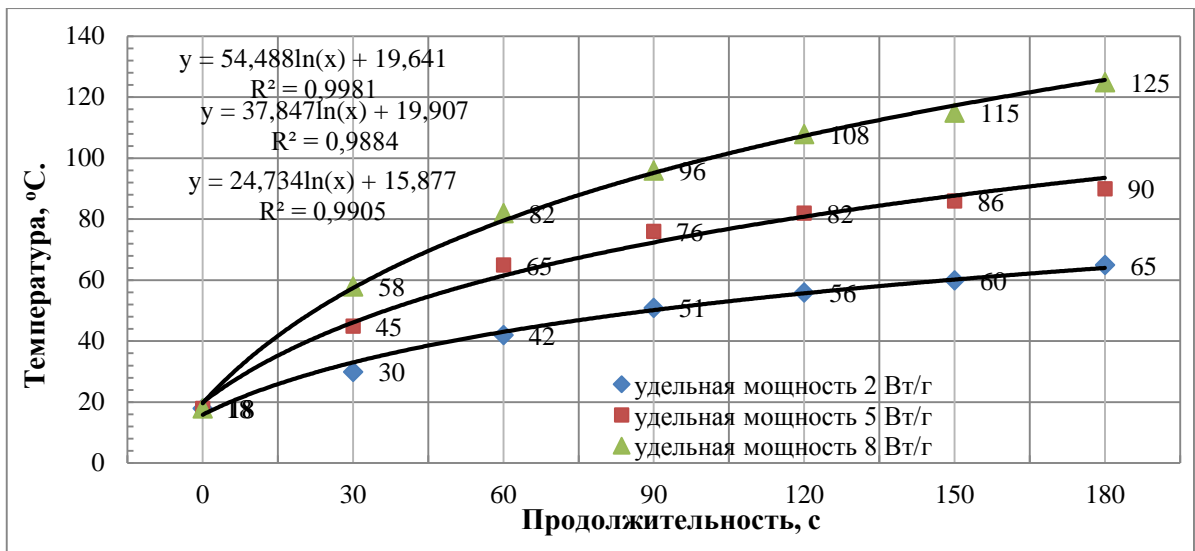
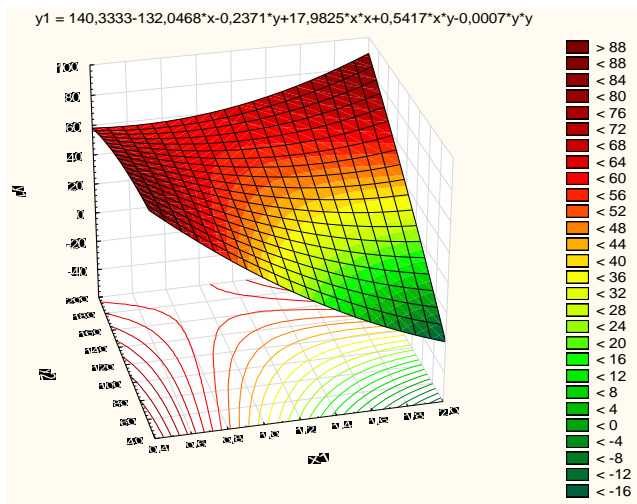
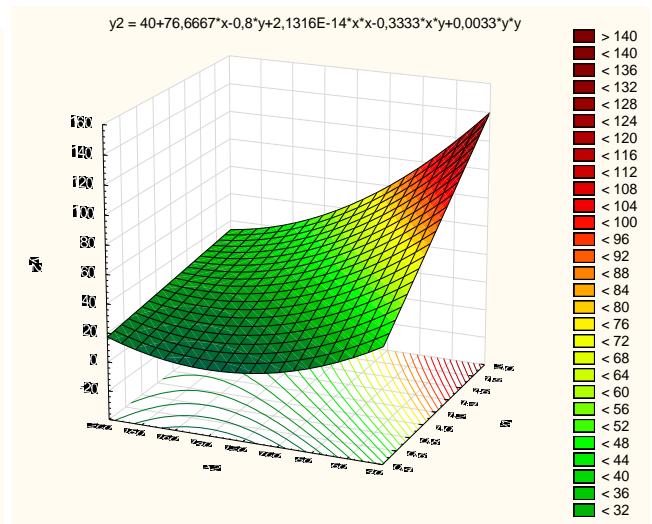


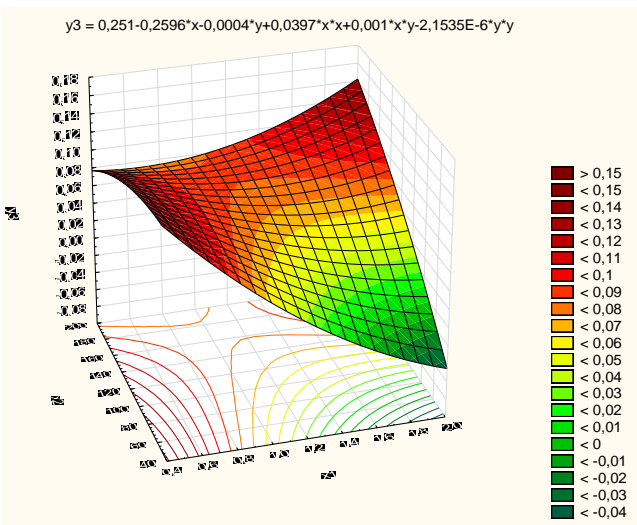
Рисунок 19 – Динамика эндогенного нагрева печени и почек при разных удельных мощностях: 2 Вт/г, 5 Вт/г, 8 Вт/г



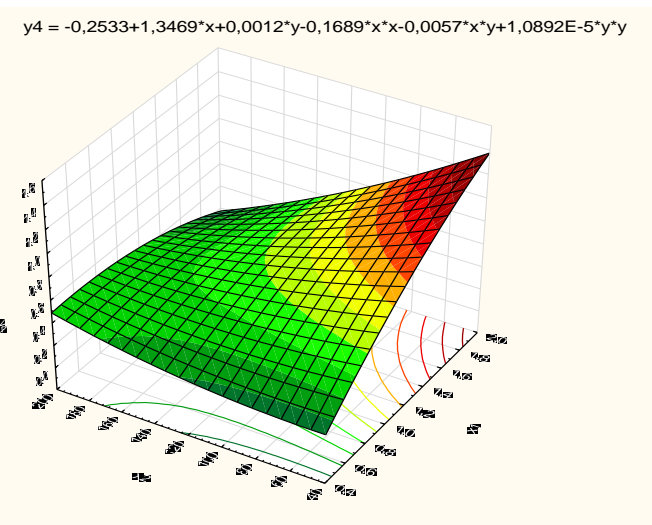
а



б



в



г

Рисунок 20 – Двумерные сечения в изолиниях и поверхности откликов трехфакторных моделей при трех СВЧ генераторах:

а) температура, °С; б) производительность, кг/ч; в) удельные энергетические затраты, кВт·ч/кг; г) бактериальная обсемененность, КОЕ/г·10<sup>3</sup>

Получены *регрессионные зависимости*, позволяющие оценить влияние технологических параметров на производительность установки, удельные энергетические затраты и микробиологические показатели продукта. Для этого воспользовались матрицей планирования 3-х факторного активного эксперимента типа  $2^3$  и построили поверхности откликов (рисунок 20). В качестве варьируемых факторов, влияющих на процесс термообработки и обеззараживания сырья, выбраны: масса загрузки предварительно измельченного сырья в резонатор  $M$ , кг ( $x_1$ ); продолжительность воздействия ЭМП СВЧ на сырье  $\tau$ , с ( $x_2$ ); количество СВЧ генераторов  $n$ , шт. ( $x_3$ ).

Пределы изменения варьируемых факторов принимались равными:

$$(x_1) - 0,6 \leq M \leq 1,8 \text{ кг}; \quad (x_2) - 60 \leq \tau \leq 180 \text{ с}; \quad (x_3) - 1 \leq n \leq 5 \text{ шт.}$$

Критериями оптимизации режимных параметров установки являются:

$Y_1$  – температура ( $T$ , °C);  $Y_2$  – производительность СВЧ установки ( $Q$ , кг/ч);

$Y_3$  – удельные энергетические затраты на технологический процесс ( $W$ , кВт·ч/кг);

$Y_4$  – общее микробное число в продукте (ОМЧ, КОЕ/г).

Регрессионные модели процесса термообработки сырья при  $x_3 = 0$ :

$$T = 140,33 - 132,1 \cdot x_1 - 0,237 \cdot x_2 + 17,98 \cdot x_1^2 + 0,542 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,0007 \cdot x_2^2;$$

$$Q = 40 + 76,67 \cdot x_1 - 0,8 \cdot x_2 - 14 \cdot x_1^2 - 0,33 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0033 \cdot x_2^2;$$

$$W = 0,251 - 0,26 \cdot x_1 - 0,00044 \cdot x_2 + 0,0397 \cdot x_1^2 + 0,001 \cdot x_1 \cdot x_2;$$

$$\text{ОМЧ} = - (0,25 + 1,35 \cdot x_1 + 0,0012 \cdot x_2 - 0,17 \cdot x_1^2 + 0,0058 \cdot x_1 \cdot x_2) \cdot 10^3. \quad (21)$$

Из анализа уравнений выявлены такие режимы работы установки, которые обеспечивают минимум удельных энергетических затрат на производство белкового корма из непищевых отходов животного происхождения и снижение микробиологической обсемененности продукта до ПДУ (ниже 500 тыс. КОЕ/г). При соблюдении рациональных режимов (масса единовременной загрузки измельченного и обезвоженного сырья в резонатор – 1,2 кг; продолжительность воздействия – 120-150 с; количество СВЧ генераторов – 3 шт.) общее микробное число в продукте снижается с 1,3 млн. до 0,5 млн. КОЕ/г, при температуре нагрева 75-105°C. При этом производительность установки составляет 30-40 кг/ч, удельные энергетические затраты – 0,15-0,2 кВт·ч/кг. Результаты исследования распределения температурного поля по продукту при воздействии ЭМП СВЧ на обезвоженные отходы убоя свиней при мощности 3,5 Вт/г приведены на рисунке 21.

Проведены исследования физико-химических показателей вареного корма опытного и контрольного образцов. Сырьем для производства вареного корма служила смесь из измельчённых внутренностей птицы. В базовом варианте сырье варили с помощью автоклава, а опытным вариантом – в СВЧ установке с комбинированным резонатором в эффективном режиме. Опытный образец соответствует требованиям нормативно-технической документации обработанного белкового корма. Термообработка вторичного сырья оказывает минимальное воздействие на качество белка, что увеличивает переваримость протеина. При этом аминокислоты не разрушаются, крахмал желатинизируется, что увеличивает степень его усвояемости. Жиры равномерно распределяются по объему продукта, перевариваемость пищевых волокон возрастает. Зависимость снижения общего микробного числа от приращения температуры сырья разной исходной обсемененности при напряженности ЭП 0,8-1,2 кВ/см приведена на рисунке 22. Эмпирические зависимости, описывающие изменение ОМЧ от приращения температуры нагрева сырья:

$$\begin{aligned} \text{ОМЧ}_{\text{исх } 2,1} &= -9 \cdot 10^{-5} T^2 - 0,012T + 2,23 \text{ КОЕ/г}; \\ \text{ОМЧ}_{\text{исх } 1,3} &= -0,0001T^2 - 0,0014T + 1,34 \text{ КОЕ/г} \end{aligned} \quad (22)$$

Продолжительность воздействия (мин) и температура (°С)	Съемка с помощью тепловизора	Вид сырья после термообработки	
		в стационарном режиме	в непрерывном режиме в комбинированном резонаторе
4-9°С			
1 мин, 4-16,5°С			
2 мин, 21-82°С			
4 мин, 24-97°С			

Рисунок 21 – Распределение температурного поля по поверхности продукта при воздействии ЭМП СВЧ на сырье удельной мощностью 3,5 Вт/г

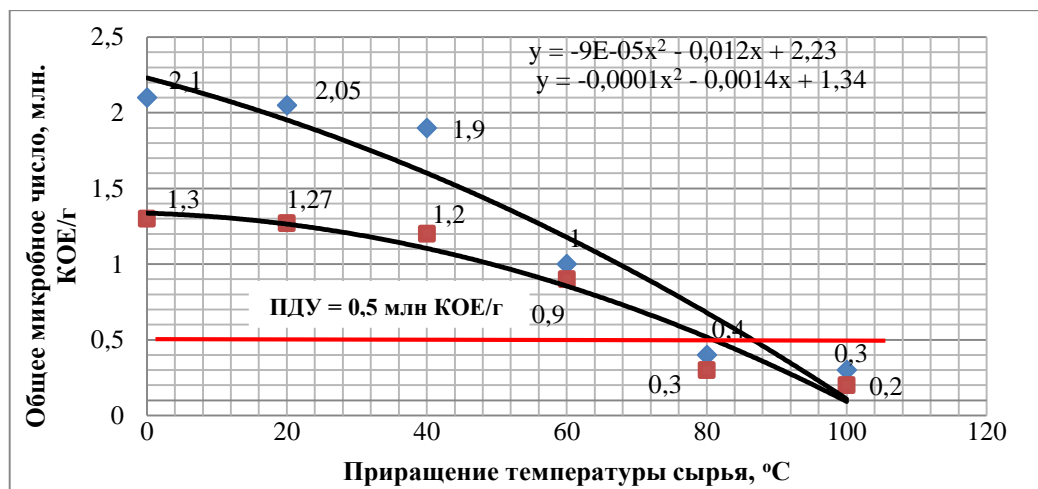


Рисунок 22 – Зависимость снижения ОМЧ от приращения температуры сырья разной исходной обсемененности: 1,3 и 2,1 млн. КОЕ/г

Высокая напряженность ЭП в резонаторе обеспечивает снижение жизнедеятельности патогенной микрофлоры до ПДУ 0,5 млн. КОЕ/г, что увеличивает срок годности продукта. Происходит повышение кормовой ценности на 15-20% в зависимости от вида вторичного сырья по сравнению с базовым образцом продукта, вареного в автоклаве.

В фермерских хозяйствах измельченные отходы животного происхождения либо предварительно смешивают с фуражным зерном (наполнителем), либо обезвоживают центрифугированием. Далее в технологической линии используют экструдеры или грануляторы. Схема производства белкового продукта из вторичного сырья традиционными и проектными вариантами приведена на рисунке 23.



Рисунок 23 – Схема производства белкового корма из вторичного сырья традиционными и проектными вариантами

Изготовленная установка с комбинированным резонатором и отдельные узлы приведены на рисунок 24, а технические характеристики – в таблице 2. СВЧ установка состоит из узлов для измельчения и обезвоживания вторичного сырья и комбинированного резонатора, позволяющего провести термообработку и обеззараживание твердой фракции сырья для получения кормового продукта.

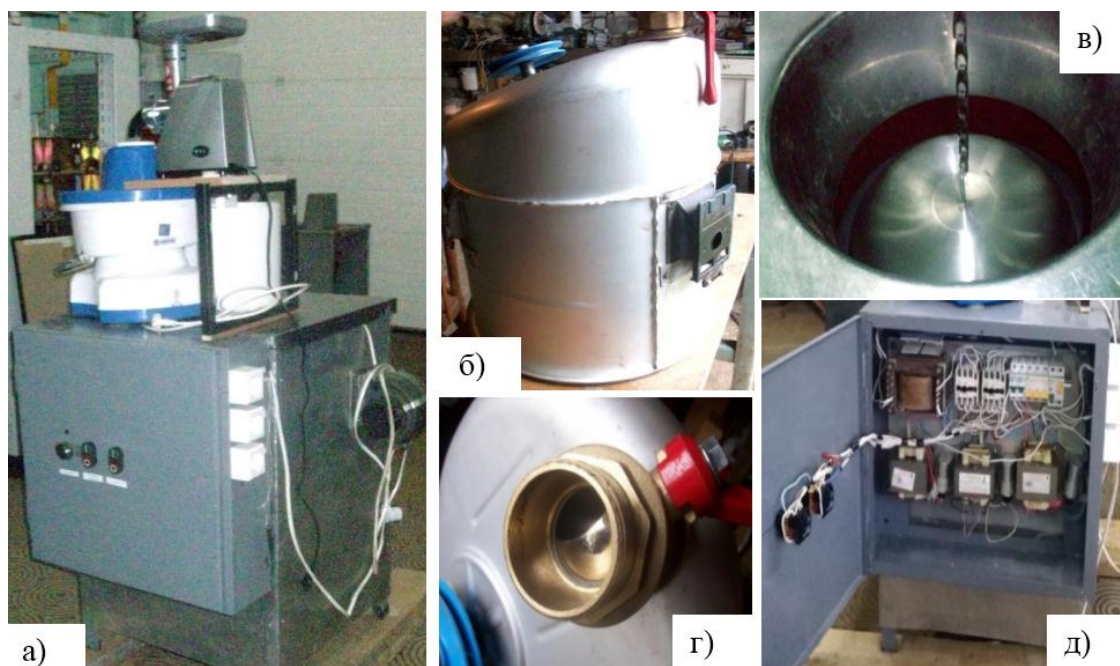


Рисунок 24 – СВЧ установка с комбинированным резонатором:

- а) установка; б) резонатор с магнетроном и с шаровым краном; в) полусферическая часть резонатора на подвеске в приемном цилиндре; г) шаровой кран; д) шкаф управления



Таблица 2 – Технические характеристики СВЧ установки

Производительность, кг/ч	30-40
Потребляемая мощность СВЧ установки, кВт	6,08
Потребляемая мощность СВЧ установки без измельчителя, кВт	4,28
Мощность электродвигателя вентилятора, кВт	0,24
Мощность перемешивающего диска, кВт	0,32
Мощность измельчителя, кВт	1,8
Мощность центрифуги, кВт	0,32
Потребляемая мощность трех СВЧ генераторов, кВт	3,4
Удельные энергетические затраты без измельчителя, кВт·ч/кг	0,15-0,2
Удельные энергетические затраты без измельчителя и центрифуги, кВт·ч/кг	0,11-0,13
Габаритные размеры, м	0,8x0,8x1,5

Результаты исследования мощности потока СВЧ излучений в зависимости от расстояния ( $l$ ) до СВЧ установки и высоты замера показывают, что установка обеспечивает электромагнитную безопасность оператору в течение 4 часов работы (рисунок 25).

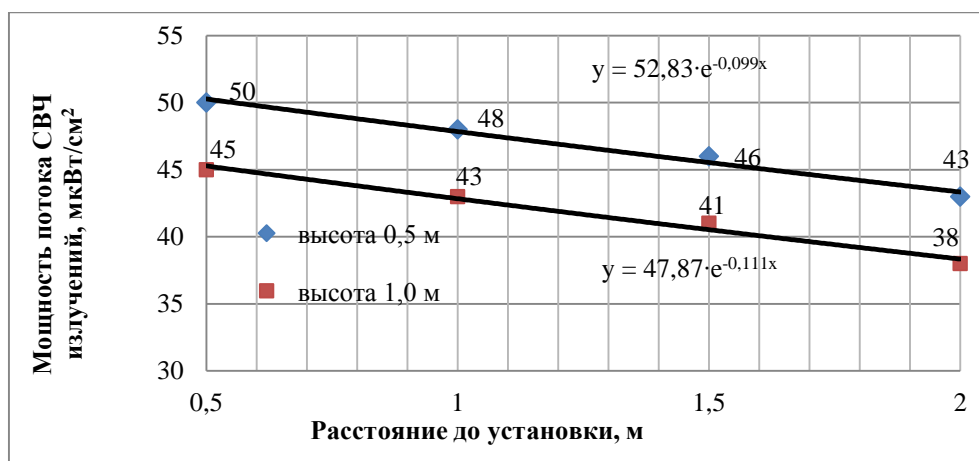


Рисунок 25 – Графики изменения мощности потока СВЧ излучений в зависимости от расстояния до установки и высоты замера

Изменения мощности потока излучений описываются эмпирическими выражениями (мкВт/см<sup>2</sup>):

$$p = 52,83 \cdot e^{-0,1l}; p = 47,87 \cdot e^{-0,11l}. \quad (23)$$

Результаты экспериментальных исследований (38-50 мкВт/см<sup>2</sup>) с достаточной доверительной вероятностью (0,95) совпадают с результатами теоретических исследований (формула 17).

**Раздел пятый** «Технико-экономическая эффективность капитальных вложений на разработку СВЧ установки для термообработки вторичного сырья животного происхождения» содержит результаты экономической оценки применения установок в фермерских хозяйствах по методу приведенных затрат. В качестве целевой функции такой оптимизации следует использовать интегральный эффект: доход от эксплуатации установки и кормовая ценность продукта.

Годовой экономический эффект от применения СВЧ установки с комбинированным резонатором по сравнению с экструдером ЭК-40 составляет 288 тыс. руб. за счет снижения эксплуатационных затрат при объеме выработанной продукции 84 тонны, повышение рентабельности – на 42%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе системного анализа существующих технологий и СВЧ техники разработаны методологические основы создания радиогерметичной СВЧ установки непрерывно-поточного действия с маломощными магнетронами, реализующей технологию термообработки вторичного сырья животного происхождения для сохранения кормовой ценности при сниженных эксплуатационных затратах.

2. Разработана модель функционирования многогенераторных СВЧ установок непрерывно-поточного действия с нетрадиционными резонаторами и запредельными волноводами, обеспечивающими термообработку предварительно измельченного вторичного сырья в процессе обезвоживания, имеющими рациональные конструкционно-технологические параметры, новизна технических решений которых доказана 23 патентами на изобретения. Проведена оценка соответствия каждого резонатора критериям функционирования установки путем расчета наименьших отклонений от оптимальных значений.

3. Полученные 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, *позволяют* согласовать собственную добротность (5000-9000) и объем резонатора (17-28 л) с напряженностью электрического поля (1,2-3,5 кВ/см) и скоростью нагрева сырья (0,6-0,8°С/с).

4. Обоснованы параметры электродинамической системы с визуализацией распределения ЭМП в резонаторах в программе CST Microwave Studio в режиме переходного процесса с выявлением их эффективных исполнений, обеспечивающих высокую напряженность ЭП, высокую собственную добротность и соблюдение электромагнитной безопасности. Результаты вычисления и визуализации распределения ЭМП в сферическом, цилиндрическом, тороидальном, шнековом, биконическом, тетраконическом, коаксиальном и комбинированном резонаторах позволили:

- *выявить* эффективные конфигурации резонаторов в соответствии с критериями проектирования;

- комплексно *оценить* основные параметры электродинамической системы «генератор-резонатор», а именно – собственную добротность резонатора и напряженность электрического поля.

Максимальной собственной добротностью (8000-10000) обладает сферический резонатор, где напряженность ЭП с тремя магнетронами достигает 0,6-1,0 кВ/см; далее биконический резонатор (7098), где напряженность ЭП 0,6-3,5 кВ/см; собственная добротность цилиндрических резонаторов (перфорированных, щелевых) не превышает 6530, в них напряженность ЭП равна 0,6-1,6 кВ/см; в тетраконических и тороидальных резонаторах с собственной добротностью 4000-6000 можно возбудить ЭП напряженностью до 3,5 кВ/см; в изготовленном комбинированном резонаторе с собственной добротностью 9270 напряженность ЭП составляет 0,6-3,5 кВ/см.

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

нальной дозы воздействия ЭМП СВЧ общее микробное число в белковом продукте снижается с 1,2 до 0,5 млн КОЕ/г; производительность установки достигает до 30-40 кг/ч, при энергетических затратах на термообработку и обеззараживания предварительно измельченного вторичного сырья без обезвоживания 0,15-0,2 кВт·ч/кг, а при предварительном обезвоживании – 0,11-0,13 кВт·ч/кг.

Разработанная технология термообработки непищевого мясного сырья, созданная СВЧ установка с комбинированным резонатором обеспечивают повышение кормовой ценности белкового продукта на 5 баллов по сравнению с традиционной технологией из максимально возможных 15 при соблюдении нормы электромагнитной безопасности, оцененной по значению плотности потока энергии, не превышающей 50 мкВт/см<sup>2</sup>, при работе до 4 часов в сутки.

б. Апробированная в производственных условиях СВЧ установка с 3-4 магнетронами малой мощности (700-800 Вт) с комбинированным резонатором, производительностью 30-40 кг/ч (в зависимости от вида вторичного сырья), имеющим кольцевую щель размером менее, чем четверть длины волны, образованной между соосно расположенными полусферой и цилиндром, обеспечивает подачу измельченного и обезвоженного (до 35-40 %) сырья в резонатор, его термообработку и обеззараживание при перемешивании, и дозированную выгрузку вареных частиц белкового продукта через шаровой кран.

Разработано техническое задание для создания СВЧ установки непрерывно-поточного действия с комбинированным резонатором, и годовой экономический эффект от ее применения для термообработки и обеззараживания непищевого мясного сырья по сравнению с экструдером ЭК-40 составляет 288 тыс. руб. за счет снижения эксплуатационных затрат.

#### ***Рекомендации производству***

Эксплуатацию СВЧ установки следует осуществлять в соответствии СанПин 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях», где рекомендовано, что в диапазоне СВЧ (300-300000 МГц) за рабочий день уровень плотности излучения не должен превышать 10 мкВт/см<sup>2</sup> на расстоянии 50 см от установки. Чистку и ремонт установки разрешается только после снятия напряжения.

#### ***Перспективы дальнейшей разработки***

Совокупность обоснованных научных положений открывает перспективы совершенствования технологий и установок непрерывно-поточного действия с маломощными генераторами для термообработки сырья, обеспечивающих снижение эксплуатационных затрат. В дальнейшем следует разрабатывать автоматизированную систему управления СВЧ установкой с оснащением дистанционной контрольно-измерительной аппаратурой; расширить электротехнологические процессы на агропредприятиях для энергосбережения.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

#### ***Публикации в изданиях, определенных ВАК РФ***

1. Gdankin, G.V. Microwave installation with conical resonators for the heat treatment of inedible meat wastes (Микроволновые установки с коническими резонаторами для термообработки непищевых мясных отходов) / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, О.В. Михайлова, В.Г. Семенов // Of the National academy of sciences

of the republic of Kazakhstan (Series of geology and technical sciences) (Известия Национальной академии наук Республики Казахстан). Volume 2, Number 428. 2018, P. 44-54. (Журнал принят для индексирования в Emerging Sources Citation Index, обновленной версии **Web of Science**).

2. Gdankin, G.V Installation for complex influence of electrophysical factors on raw materials (Установка для комплексного воздействия электрофизических факторов на сырье) / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, О.В. Михайлова, М.В. Белова, В.Г. Семенов // Of the National academy of sciences of the republic of Kazakhstan (Series of geology and technical sciences) (Известия Национальной академии наук Республики Казахстан). Volume, Number. 4(436). 2019, P. 54-61. (Журнал принят для индексирования в Emerging Sources Citation Index, обновленной версии **Web of Science**).

3. Gdankin, G.V Justification of parameters of the microwave installation with mobile resonators for heat treatment of non-food eggs / О.И. Орлова, Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, М.В. Белова, В.Г. Семенов // Of the National academy of sciences of the republic of Kazakhstan (Series of geology and technical sciences) (Известия Национальной академии наук Республики Казахстан). Volume, Number 5. 2019. P. 53-59. Журнал принят для индексирования в Emerging Sources Citation Index, обновленной версии **Web of Science**.

4. Gdankin, G.V Development of ultra-high-frequency installation of container type for heat treatment of blood and fat-containing raw materials. (Разработка сверхвысокоочастотной установки контейнерного типа для термообработки крови и жиросодержащего сырья) / М.В. Белова, Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова // American Journal of Agriculture and Forestry, a peer-reviewed scientific journal dedicated to promoting the advancement of science and technology. P. 95-105. Американский журнал сельского и лесного хозяйства, рецензируемый научный журнал, посвященный содействию развитию науки и техники. ISSN печатной версии: 2330-8583. **Web of Science**.

5. Gdankin, G.V. Survey on UHF Device Operating Modes for Thermal Treatment and Disinfection of Nonfood Animal-Origin Raw Materials (Исследование режимов работы СВЧ-устройств для термической обработки и обеззараживания непищевого сырья животного происхождения) / G.V. Zhdankin, V.F. Storchevoy, G.V. Novikova, P.M. Umanskya. ISSN 1068-3674, Russian Agricultural Sciences, 2020, Vol. 46, No. 1, pp. 94–99. Allerton Press, Inc., 2020. Russian Text The Author(s), 2019, published in Rossiiskaya Sel'skokhozyaistvennaya Nauka, 2019, No. 6, pp. 65–69. (Российские сельскохозяйственные науки, 2020, Т. 46, № 1, с. 94-99. © Allerton Press, Inc., 2020. Русский текст опубликован в «Российские сельскохозяйственные науки», 2019, № 6, с. 65-69. **Web of Science**).

6. Жданкин, Г.В. Анализ разработанных сверхвысокоочастотных установок для термообработки сырья / Г.В. Новикова, Г.В. Жданкин, О.В. Михайлова, А.А. Белов // Вестник Казанского ГАУ. Казань: КГАУ, 2016, № 11(4). С. 89-93.

7. Жданкин, Г.В. Разработка сверхвысокоочастотной установки контейнерного типа для термообработки крови и жиросодержащего сырья / М.В. Белова, Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова // Вестник Казанского ГАУ. Казань: КГАУ, 2016, № 11(4). С. 74-78.

8. Жданкин Г.В. Разработка многомодульной сверхвысокоочастотной установки для термообработки сырья животного происхождения / Г.В. Жданкин, Б.Г. Зиганшин, М.В. Белова // Вестник Казанского ГАУ. Казань: КГАУ, 2016, № 11 (4). С. 79-83.

9. Жданкин, Г.В. Разработка радиоволновых установок для термообработки сырья / А.А. Белов, Г.В. Жданкин, В.Ф. Сторчевой // Вестник НГИЭИ. Княгинино: 2016, № 10 (65). С. 7-14.
10. Жданкин, Г.В. Разработка сверхвысокочастотной установки с передвижными резонаторами / А.А. Белов, Г.В. Жданкин, О.В. Михайлова, Г.С. Юнусов // Вестник НГИЭИ. Княгинино: НГИЭУ. 2016, № 12 (67). С. 35-40.
11. Жданкин, Г.В. Разработка и обоснование сверхвысокочастотной установки для термообработки непищевых отходов убоя и переработки птиц и животных / Г.В. Жданкин, В.Ф. Сторчевой // Научная жизнь. М.: ЗАО «Алкор», 2016, № 11. С. 17-23.
12. Жданкин, Г.В. Разработка и обоснование параметров установки для диэлектрического нагрева непищевых отходов животного происхождения в непрерывном режиме / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, О.В. Михайлова, Н.К. Кириллов // Вестник НГИЭИ. Княгинино: НГИЭУ, 2017, № 2(69). С. 61-71.
13. Жданкин, Г.В. Совершенствование и обоснование параметров СВЧ установки с тороидальным резонатором и с ячеистым ротором для термообработки сырья / А.А. Белов, Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова // Вестник НГИЭИ. Княгинино: НГИЭИ, 2017, № 3 (70). С. 57-66.
14. Жданкин, Г.В. Обоснование параметров СВЧ установки с концентрическими сферами для термомеханического разрушения сырья / А.А. Белов, Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова // Вестник НГИЭИ. Княгинино: НГИЭИ, 2017, № 4 (71). С. 50-58.
15. Жданкин, Г.В. Разработка и обоснование параметров установки с движущимися источниками сверхвысокочастотной энергии для термообработки сырья / А.А. Белов, Г.В. Жданкин // Вестник НГИЭИ. Княгинино: НГИЭИ, 2017, № 7 (74). С. 44-54.
16. Жданкин, Г.В. Разработка и обоснование параметров многоярусной сверхвысокочастотной установки для термообработки влажного сырья в непрерывном режиме / Г.В. Жданкин, В.Ф. Сторчевой, Б.Г. Зиганшин, Г.В. Новикова // Научная жизнь. М.: ЗАО «Алкор», 2017, № 4. С. 4-13.
17. Жданкин, Г.В. Разработка и обоснование параметров микроволновой установки для термообработки сырья в процессе измельчения / Г.В. Жданкин, П.В. Зайцев, Г.В. Новикова, В.Ф. Сторчевой // Научная жизнь. М.: ЗАО «Алкор», 2017, № 11. С. 15-26.
18. Жданкин, Г.В. Разработка и обоснование параметров центробежной установки для термообработки боенских отходов / Г.В. Жданкин, В.Ф. Сторчевой, Г.В. Новикова // Вестник Казанского ГАУ. Казань: КГАУ, 2017, № 12(2). С. 81-87.
19. Жданкин, Г.В. Разработка и обоснование параметров СВЧ установки со сферическим резонатором для термообработки боенских отходов // Г.В. Жданкин, Б.Г. Зиганшин, М.В. Белова // Вестник Казанского ГАУ. Казань: КГАУ, 2017, № 2(44). С. 90-98.
20. Жданкин, Г.В. Разработка рабочих камер сверхвысокочастотных установок для термообработки непищевых отходов мясного производства / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, Б.Г. Зиганшин // Вестник Ижевской ГСХА. Ижевск: ИГСХА, 2017, № 1(50). – С. 61-69.
21. Жданкин, Г.В. Разработка сверхвысокочастотной установки для термообработки непищевых боенских отходов / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова // Пермский аграрный Вестник. Пермь: ПГАУ, 2017, № 4(20). С. 54-64.

22. Жданкин, Г.В. Разработка сверхвысокочастотной установки для варки отходов убоя птицы и животных / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, Е.И. Меженина, И.Г. Ершова // Вестник ВИЭСХ, № 1 (26). М.: ФГБНУ ВИЭСХ, 2017. С. 99-106.

23. Жданкин, Г.В. Микроволновая установка для обезвоживания и термообработки непищевых отходов убоя животных / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, М.В. Белова // Вестник Алтайского ГАУ. Барнаул: АГАУ, 2018, №74(6). С. 153-160.

24. Жданкин, Г.В. Радиоволновые установки для термообработки непищевых отходов животного происхождения / Г.В. Жданкин, М.В. Белова, О.В. Михайлова, Г.В. Новикова // Известия Оренбургского ГАУ. Оренбург: ОГАУ, 2018, № 4(72). С. 198-202.

25. Жданкин, Г.В. Разработка технологии и СВЧ установки с коническими резонаторами для термообработки непищевых отходов животного происхождения / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, М.В. Белова // Вестник НГИЭИ. Княгинино: НГИЭУ, 2018, № 10 (89). С. 55-64.

26. Жданкин, Г.В. Разработка установки и микроволновой технологии термообработки непищевых отходов яиц / О.И. Орлова Г.В. Жданкин, М.В. Белова, О.В. Михайлова // Известия Оренбургского ГАУ. Оренбург: ОГАУ, 2018, № 6 (74). С. 121-124.

27. Жданкин, Г.В. Исследование электродинамических параметров СВЧ установок с резонаторами, обеспечивающими термообработку влажного сырья / Г.В. Жданкин, М.В. Белова, В.Ф. Сторчевой, Г.В. Новикова // Электротехнологии и оборудование в АПК, № 2 (35), 2018. С. 103-109.

### ***Монографии и учебные пособия***

28. Жданкин, Г.В. СВЧ установки для термообработки непищевых отходов животного происхождения: ***монография*** / Г.В. Жданкин, В.Ф. Сторчевой, Г.В. Новикова. Княгинино: НГИЭУ, 2021. 297 с. ISBN 978-5-907-454-04-0.

29. Жданкин, Г.В. Основы патентоведения и научно-технические разработки для реализации микроволновой технологии в переработке сырья АПК: ***учебное пособие*** / О.В. Михайлова, М.В. Просвирякова. Г.В. Новикова, В.Ф. Сторчевой, Г.В. Жданкин и др. Княгинино: ГБОУ ВО НГИЭУ, 2021. 526 с. ISBN 978-5-907246-86-7.

### ***Патенты на изобретения***

1. Патент № 2626156 РФ, МПК А23 N17/00. Радиоволновые установки для термообработки сырья / А.А. Белов, Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, О.В. Михайлова, И.Г. Ершова; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2016133572; заявл. 15.08.2016. Бюл. № 21 от 21.07.2017.

2. Патент № 2629159 РФ, МПК А 23 N17/00. СВЧ установка с тороидальным резонатором и с ячеистым ротором для термообработки сырья / А.А. Белов, Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, О.В. Михайлова; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2016133524; заявл. 15.08.2016. Бюл. № 24 от 24.08.2017.

3. Патент № 2629220 РФ, МПК А 23 N17/00. Установка с движущимися источниками СВЧ энергии для термообработки сырья / А.А. Белов, Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, О.В. Михайлова; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2016133500; заявл. 01.08.16. Бюл. № 25 от 28.08.2017.

4. Патент № 2629221 РФ, МПК А 23 N17/00. Сверхвысокочастотная установка с резонатором, образованным между двумя сферами для термомеханического разрушения сырья / А.А. Белов, Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, О.В. Михайлова;

заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2016133535; заявл.15.08.2016. Бюл. № 25 от 28.08.2017.

5. Патент № 2629259 РФ, МПК А23К 1/10. Сверхвысокочастотная установка для варки отходов убоя птицы и животных / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2016146640; заявл. 28.11.2016. Бюл. № 25 от 28.08.2017.

6. Патент № 2636155 РФ, МПК А23К 1/10. Микроволновая технология извлечения жира из жиросодержащего сырья / Г.В. Жданкин, А.Г. Самоделкин, Г.В. Новикова, М.В. Белова, Б.И. Горбунов; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2016150318.; заявл. 27.09.2016. Бюл. № 26 от 21.11. 2017.

7. Патент № 2636156 РФ, МПК А22В5/04. Устройство для дозирования вязкой жидкости в передвижные рабочие камеры / Г.В. Жданкин, Е.Ю. Сергеева, Г.В. Новикова; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2016150297; заявл. 20.12.2016. Бюл. № 33 от 21.11. 2017.

8. Патент № 2660906 РФ, МПК А22С17/00. СВЧ установка со сферическим резонатором для термообработки сырья животного происхождения в непрерывном режиме / Б.Г. Зиганшин, М.В. Белова, Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, О.В. Михайлова; заявитель и патентообладатель Казанский ГАУ (RU). № 2017113450; заявл. 18.04.2017. Бюл. № 20 от 11.07.2018.

9. Патент № 2661372 РФ, МПК А23N17/00. Многоярусная СВЧ установка для термообработки влажного сырья в непрерывном режиме / Б.Г. Зиганшин, М.В. Белова, Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, О.В. Михайлова; заявитель и патентообладатель Казанский ГАУ (RU). № 2017113036; заявл. 14.04.2017. Бюл. № 20 от 16.07.2018.

10. Патент № 2667751 РФ, МПК С11В3/04. СВЧ установка со сферическими резонаторами для термообработки жиросодержащего сырья / Г.В. Жданкин, А.Г. Самоделкин, Г.В. Новикова, А.С. Шойкин; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2016150317; заявл. 20.12.2016. Бюл. № 18 от 21.06.18.

11. Патент № 2671699 РФ, МПК С11В3/04. Сверхвысокочастотная установка с передвижными полусферами для термомеханического разрушения сырья / А.А. Белов, Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, О.В. Михайлова; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2016133571; заявл. 15.08.2016. Бюл. № 5 от 06.11.2018.

12. Патент № 2671710 РФ, МПК А22С17/00. Микроволновая установка для термообработки сырья в процессе измельчения / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, П.В. Зайцев, Е.Ю. Сергеева заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2017118717, заявл. 20.02.2017. Бюл. № 31 от 06.11.2018.

13. Патент № 2671712 РФ, МПК А23К 1/10. Сверхвысокочастотная установка для термообработки непищевых отходов убоя животных в непрерывном режиме / Г.В. Жданкин, В.Ф. Сторчевой, Г.В. Новикова; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2017118884; заявл. 27.09.2016. Бюл. № 31 от 06.11.2018.

14. Патент № 2671714 РФ, МПК А22С17/00. СВЧ установка с ячеистым барабаном для термообработки непищевых отходов убоя животных / Г.В. Жданкин, В.Ф. Сторчевой, Г.В. Новикова, М.В. Белова; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2017118881; заявл. 30.05.2017. Бюл. № 31 от 06.11.2018.

15. Патент № 2679203 РФ, МПК А23К 10/00. СВЧ установка для термообработки непищевых отходов животного происхождения в непрерывном режиме /

Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, М.В. Белова; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2017108866; заявл. 20.03.2017. Бюл. № 26 от 17.09.2018.

16. Патент № 2690482 РФ, МПК А22С17/00. СВЧ установка с коническими резонаторами для термообработки непищевых отходов животного происхождения / Г.В. Жданкин, А.В. Казаков, Г.В. Новикова, М.В. Белова, О.В. Михайлова; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2018125093; заявл. 16.05.2018. Бюл. № 16 от 03.06.2019.

17. Патент № 2693737 РФ, МПК А22С17/00. Микроволновая установка для обезвоживания и термообработки непищевых отходов убоя животных / Г.В. Жданкин, В.Ф. Сторчевой, Г.В. Новикова, М.В. Белова, О.В. Михайлова; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2017145736; заявл. 14.11.2017. Бюл. № 19 от 04.07.2019.

18. Патент № 2694179 РФ, МПК А23К 10/00. Многомодульная центробежная сверхвысокочастотная установка для термообработки сырья животного происхождения и отделения жидкой фракции / Г.В. Жданкин, Самоделкин А.Г., Новикова Г.В., Белова М.В., Михайлова Е.Д. заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2017108665; заявл. 13.03.2017. Бюл. № 5 от 20.02.2019.

19. Патент № 2703940 РФ, МПК С14В1/58. Установка для гранулирования измельченных отходов животного и растительного происхождения в процессе электрического нагрева / Ю.Е. Крайнов, Е.А. Шамин, Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова; заявитель и патентообладатель НГИЭУ (RU). № 2018113197; заявл. 11.04.2018. Бюл. № 29 от 14.10.2019.

20. Патент № 2703944 РФ, МПК С14В1/58. Установка для гранулирования обезвоженных непищевых отходов убоя животных в ЭМПСВЧ / Г.В. Жданкин, Е.А. Шамин, Ю.Е. Крайнов, Г.В. Новикова; заявитель и патентообладатель НГИЭУ (RU). № 2018101624; заявл. 18.01.2018. Бюл. № 20 от 16.07.2019.

21. Патент № 2729153 РФ, МПК А22С17/00. Микроволновая установка с комбинированным резонатором для термообработки непищевых отходов животного происхождения в непрерывном режиме / Г.В. Жданкин, заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2018112382; заявл. 30.07.2020. Бюл. № 28 от 07.10.2019.

22. Патент № 2710154 РФ, МПК А47j29/06. Сверхвысокочастотная установка с коническим резонатором для обезвоживания и термообработки мясных отходов / А.В. Казаков, Г.В. Новикова, Б.И. Горбунов, Г.В. Жданкин, заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2019118371; заявл. 13.06.2019. Бюл. № 36 от 24.12.2019.

23. Патент № 2729151 РФ, МПК А22С17/00. Сверхвысокочастотная установка с биконическим резонатором и шнеком для варки отходов убоя животных / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, М.В. Белова, О.В. Михайлова; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2018112186; заявл. 5.02. 2018. Бюл. № 22 от 04.08.2020.

### ***Публикации в сборниках научных трудов и материалов конференций***

1. Жданкин, Г.В. Методика проектирования СВЧ установки для термообработки непищевых отходов убоя животных / Г.В. Жданкин, В.Ф. Сторчевой, Г.В. Новикова // Инновации в сельском хозяйстве. М.: ФГБНУ ВИЭСХ, 1 (22) /2017. С. 79-86.

2. Жданкин, Г.В. Разработка аппарата для термообработки жиросодержащего сырья / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, Т.Н. Лаврентьева, А.С. Шойкин, Е.Л. Белов //



Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Йошкар-Ола: Марийский ГУ, 2017. С. 257-259.

3. Жданкин, Г.В. Разработка центробежной установки для диэлектрического нагрева непищевого сырья мясного производства / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, М.В. Белова, О.В. Михайлова // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Йошкар-Ола: Марийский ГУ, 2017. С. 262-263.

4. Жданкин, Г.В. Разработка и обоснование параметров сверхвысокочастотной установки для термообработки отходов убоя животных / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, Б.И. Горбунов, И.В. Ершова // Всероссийская научно-практическая конференция «Наука, производство, образование: проблемы и перспективы». Чебоксары: ЧГПУ им. И.Я. Яковлева, 2017. С. 51-57.

5. Жданкин, Г.В. Разработка многогенераторной сверхвысокочастотной установки для варки обезвоженных непищевых мясных отходов / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова // Инновационные направления развития энергетики АПК. Ижевск: ИГСХА, 2017. С. 89-92.

6. Жданкин, Г.В. Микроволновые технологии и установки для термообработки непищевых отходов убоя животных / Г.В. Жданкин, В.Ф. Сторчевой, М.В. Белова // Международная научная конференция, посвященная 130-летию Н.И. Вавилова. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2017. С. 150-153.

7. Жданкин, Г.В. Установка для гранулирования измельченных отходов животного и растительного происхождения в процессе диэлектрического нагрева / Ю.Е. Крайнов, Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Йошкар-Ола: Марийский ГУ, 2018., вып. 20. С. 384-387.

8. Жданкин, Г.В. Операционно-технологическая схема переработки мягких непищевых отходов животного происхождения / Г.В. Жданкин, В.Ф. Сторчевой, О.В. Михайлова // Инновации в сельском хозяйстве. М.: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2018, № 4 (29). С. 229-236.

9. Жданкин, Г.В. Разработка СВЧ установки и технологии термообработки непищевых отходов животного происхождения для сохранения кормовой ценности / Г.В. Жданкин, Г.В., Новикова, М.В. Белова М.В., О.В. Михайлова // Современное состояние и перспективы развития науки, техники и образования. Чебоксары: ЧГПУ им. И.Я. Яковлева, 2018. С. 51-56.

10. Жданкин, Г.В. Разработка СВЧ установки для термообработки непищевых отходов животного происхождения / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: Могилев, 26.04.2018. [Электронный ресурс]. Могилев: Белорусско-Российский университет, 2018. С. 78-80.

11. Жданкин, Г.В. Технологическое оборудование для производства белкового продукта из вторичного сырья / Г.В. Жданкин, О.В. Михайлова, Г.В. Новикова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: Могилев, 25.10.2018. [Электронный ресурс]. Могилев: Белорусско-Российский университет, 2018. С. 90-94.

12. Жданкин, Г.В. Исследование электродинамических параметров СВЧ установок для термообработки с.-х. сырья / Г.В. Жданкин // Развитие аграрной

науки как важнейшее условие эффективного функционирования АПК страны. Чебоксары: ЧГСХА, 2018. С. 367-371.

13. Жданкин, Г.В. Расчет электродинамических параметров СВЧ установки для производства белкового корма из вторичного сырья / Г.В. Жданкин, М.В. Белова, И.Г. Ершова // Мобильная энергетика в сельском хозяйстве: состояние и перспективы развития. Чебоксары: ЧГСХА, 2018. С. 291-296.

14. Жданкин, Г.В. Конвейерная установка со сферическими резонаторами для термообработки непищевых яиц / Г.В. Жданкин, М.В. Белова, Г.В. Новикова // Мобильная энергетика в сельском хозяйстве: состояние и перспективы развития. Чебоксары: ЧГСХА, 2018. С. 296-300.

15. Жданкин, Г.В. Исследование параметров микроволновой установки для термообработки отходов убоя животных / Г.В. Жданкин, В.Ф. Сторчевой, Г.В. Новикова // Доклады ТСХА, выпуск № 291, ч. 2, 2019. С. 290-294.

16. Жданкин, Г.В. СВЧ установка с ячеистыми барабанами для термообработки непищевых отходов убоя животных / Г.В. Жданкин, О.В. Михайлова, Г.В. Новикова // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Йошкар-Ола: Марийский ГУ, 2019, № 21. С. 565-568.

17. Жданкин, Г.В. Разработка установки для обезвоживания и термообработки непищевых мясных отходов / Г.В. Жданкин, Г.В. Новикова, М.В. Белова / Наука, производство, образование: современное состояние и направление развития. Чебоксары: ЧГПУ им. И.Я. Яковлева, 2019. С. 43-47.

18. Жданкин, Г.В. Применение СВЧ волн для получения белковых добавок из сельскохозяйственных отходов / Жданкин Г.В. Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. С. 597-601.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре  
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ  
Подписано в печать 08.07.2021. Формат 60x84/16,  
Бумага офсетная № 1. Усл.печ.л. 2,4. Тираж 100 экз. Ризограф  
Заказ № 20631

---

Издательско-полиграфический центр  
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ  
393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101  
тел. +7 (47545) 3-88-34, доб. 211



