

ЕРШОВА ИРИНА ГЕОРГИЕВНА

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ
СВЧ-РАЗМОРАЖИВАТЕЛЕЙ МОЛОЗИВА ЖИВОТНЫХ**

Специальность 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и
энергоснабжение агропромышленного комплекса

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В соответствии с Госпрограммой развития сельского хозяйства и регулирования рынков с/х продукции на 2020 г. уровень самообеспеченности РФ по молоку и молокопродуктам составил 84,4 %. Годовой объем сырья по России составил 206,6 млн л, а суточный объем замороженного молозива – 188,7 тыс. л.

На фермах КРС молозиво замораживают с последующей реализацией в размороженном виде. При этом возникают сложности, связанные с сохранением его кормовой ценности после дефростации в традиционных размораживателях. Из-за длительности процесса (1,5...2 ч.) кормовая ценность молозива животных снижается на 10...30 %, в том числе содержание иммуноглобулинов – в среднем на 8,3 %. Поэтому разработка научно-технических основ проектирования сверхвысокочастотных размораживателей, заменяющих традиционный способ дефростации и разогрева молозива в пластиковых бутылках в пароводяной смеси на микроволновую технологию для ускорения процесса, *актуальна*.

Замороженное молозиво при дефростации разделяется на две части в процессе фазового перехода (замороженную и жидкую). Характер изменения их диэлектрических параметров в отрицательном и положительном диапазоне температур противоположный. Поэтому при температурном воздействии на такое сырье, жидкая фаза которого коагулируется при температуре выше 39 °С, предлагается применить другой способ дефростации – воздействием электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ), позволяющим в зависимости от агрегатного состояния сырья управлять процессом путем использования двухрезонаторных СВЧ-размораживателей.

Научная инновационная идея состоит в том, что для снижения продолжительности дефростации и разогрева молозива животных и сохранения кормовой ценности эти процессы следуют реализовать в двух резонаторах при разных дозах воздействия ЭМП СВЧ. Это связано с тем, что фактор диэлектрических потерь сырья в диапазоне температур от –10 до 0 °С увеличивается, а в диапазоне от 0 до 39 °С уменьшается. Поэтому жидкое молозиво должно разогреваться воздействием ЭМП СВЧ во втором резонаторе.

Научная проблема – длительный процесс дефростации и разогрева молозива животных, характеризующийся снижением кормовой ценности, для решения которой предусматривается развитие теоретических и методологических основ разработки двухрезонаторных СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия с магнетронами воздушного охлаждения, позволяющих, при изменении агрегатного состояния молозива, провести отдельные процессы дефростации и разогрева, с соблюдением электромагнитной безопасности, при сниженных эксплуатационных затратах.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в теорию электромагнитных полей и решение прикладных задач в области разработки СВЧ электротермических установок внесли ученые: Архангельский Ю. С., Богоявленский В. М., Бородин И. Ф., Вассерман А. Л., Васильев А. Н., Вендин С. В., Гинзбург А. С., Григорьев А. Д., Диденко А. Н., Дробахин О. О., Дрогайцева О. В., Кисунько Г. В., Коломейцев В. А., Лыков А. В., Нетушила А. В., Новикова Г. В., Пахомов А. И., Рогов И. А., Стребков Д. С., Стрекалов А. В., Сторчевой В. Ф.,

Титов Е. В., Цугленок Н. В. и др.

Результаты систематизации технологий кормления животных, технологий обработки молочного сырья, отражены в научных работах: Афанасова Э. Э., Бозымова А. К., Богатова О. В., Горбатова А. В., Глизатулина В. Г., Ерохина А. И., Евдокимова И. А., Иванова Ю. Г., Ивашова В. И., Кирсанова В. В., Липатова Н. Н., Лисицына А. Б., Храмцова А. Г., Харитонова В. Д., Шидловской В. П., Barillet F., Duchemin S. I., Galal S., Georgiev D., Gelasakis A. I., Milan P., Panayotov D., Sevov S. и др.

Анализ работ показывает, что не в полной мере решены задачи обеспечения равномерного эндогенного нагрева молозива в резонаторных системах стоячей и бегущей волны, поскольку процессы тепловой обработки характеризуются резким изменением электрофизических и теплофизических параметров сырья. Отсутствует единый эффективный метод расчета оптимальной геометрии объемных резонаторов, обеспечивающих дефростацию и разогрев молозива животных с учетом изменения агрегатного состояния при высокой концентрации и однородности электрического поля. Поэтому разработка методологических основ проектирования размораживателей молозива животных, позволяющих определить эффективные технологические параметры и конструктивные исполнения резонаторов, обеспечивающих равномерное распределение ЭМП в сырье разного агрегатного состояния, является *актуальной задачей*.

Целью работы является разработка научно-технических основ конструктивно-технологического проектирования и создания радиогерметичных СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия с резонаторами, обеспечивающими отдельные процессы дефростации и разогрева молозива животных с изменяющимся агрегатным состоянием для сохранения его кормовой ценности при сниженных эксплуатационных затратах.

Основные научные задачи:

1. Выработать научно-методические основы конструктивно-технологического проектирования и разработки радиогерметичных многогенераторных СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия с резонаторами, обеспечивающими отдельные процессы дефростации и разогрева сырья с изменяющимся агрегатным состоянием для сохранения его кормовой ценности. Разработать блок-схему модели реализации теоретических и экспериментальных исследований процессов дефростации и разогрева сырья с изменяющимся агрегатным состоянием в процессе фазового перехода, жидкая фаза которого коагулируется.
2. Обосновать процесс дефростации и разогрева сырья воздействием ЭМП СВЧ с учетом фазового перехода и изменения глубины проникновения волны в сырье разного агрегатного состояния, зависящей от электрофизических параметров. Вывести аналитические зависимости, описывающие распределение температурного поля в сырье при разных агрегатных состояниях и распределение волн на границе раздела между замороженным и жидким сырьем, позволяющие определить коэффициент отражения волн, поглощаемую сырьем мощность при дефростации и разогреве, и КПД двухрезонаторного СВЧ-размораживателя. Исследовать динамику дефростации и разогрева коровьего молозива при разных напряжениях электрического поля (ЭП).

3. Разработать систему методов исследований электродинамических (ЭД) параметров и критериев оценки эффективного функционирования многогенераторных СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия со сдвоенными резонаторами для отдельной тепловой обработки сырья при разных дозах воздействия ЭМП СВЧ в зависимости от агрегатного состояния.
4. Разработать конструктивно-технологические схемы СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия со сдвоенными резонаторами для отдельной тепловой обработки сырья в разных дозах в зависимости от агрегатного состояния, и обосновать конфигурацию резонаторов путем исследования их ЭД параметров, в том числе по программе CST Studio Suite, и оценки отклонения ЭД параметров от эффективных значений критериев проектирования.
5. Обосновать комплекс параметров и режимов работы двухрезонаторных СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия с магнетронами воздушного охлаждения с учетом регрессионных моделей и результатов исследований органолептических, биохимических, физико-химических, микробиологических показателей молока животных, характеризующих его кормовую ценность.
6. Разработать, создать и апробировать в производственных условиях многогенераторный СВЧ-размораживатель непрерывно-поточного действия, содержащий коаксиальный резонатор с передвижными диэлектрическими контейнерами, состыкованный с коническим резонатором, и заградительные волноводы. Оценить эффективность экранирующего корпуса и заградительных волноводов путем исследования мощности потока излучений СВЧ-размораживателя и регрессионного анализа многофакторных моделей. Оценить технико-экономическую эффективность внедрения двухрезонаторного СВЧ-размораживателя для дефростации и разогрева молока на ферме КРС.

Гипотеза исследования. При рациональной конфигурации двух состыкованных резонаторов и компоновке рабочих органов СВЧ-размораживателя, и обеспечении высокой напряженности ЭП и необходимой дозы воздействия ЭМП СВЧ на сырье разного агрегатного состояния, характеризующееся противоположным изменением фактора диэлектрических потерь в процессе тепловой обработки, ожидается снижение продолжительности дефростации и разогрева молока с сохранением его кормовой ценности.

Объект исследования – технологические процессы, обеспечивающие дефростацию и разогрев молока животных (коровьего и козьего) с сохранением кормовой ценности; образец двухрезонаторного СВЧ-размораживателя непрерывно-поточного действия с магнетронами воздушного охлаждения и заградительными волноводами, обеспечивающими электромагнитную безопасность.

Предмет исследования – закономерности воздействия ЭМП СВЧ на сырье разного агрегатного состояния для определения эффективных режимов функционирования двухрезонаторных радиогерметичных СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия, обеспечивающих сохранение кормовой ценности продукта.

Научную новизну представляют

– научно-методические основы конструктивно-технологического проектирования и разработки двухрезонаторных СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия с магнетронами воздушного охлаждения, включающие ме-

тодики выявления эффективных конструктивных исполнений состыкованных резонаторов, обеспечивающих электромагнитную безопасность при реализации отдельных процессов дефростации и разогрева молозива животных из-за изменения его агрегатного состояния, для сохранения его кормовой ценности;

– модель процесса функционирования многогенераторных СВЧ-размораживателей молозива животных с состыкованными нестандартными резонаторами, обеспечивающими отдельные процессы дефростации и разогрева сырья в непрерывном режиме при разных дозах воздействия ЭМП СВЧ в зависимости от агрегатного состояния;

– аналитические зависимости и результаты исследования ЭД параметров для обоснования технологического процесса дефростации и разогрева молозива воздействием ЭМП СВЧ с учетом фазового перехода и изменения глубины проникновения волны в сырье разного агрегатного состояния, зависящей от электрофизических параметров;

– аналитические зависимости, описывающие распределения температурного поля в сырье при разных агрегатных состояниях и распределение волн на границе раздела между замороженным и жидким сырьем, позволяющие определить коэффициент отражения волн, поглощаемую сырьем мощность при дефростации и разогреве, и КПД двухрезонаторного СВЧ-размораживателя;

– конструктивно-технологические схемы СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия со сдвоенными резонаторами и обоснованные конфигурации нестандартных резонаторов путем оценки отклонения ЭД параметров системы «генератор-резонатор» от эффективных значений критериев проектирования;

– комплекс конструктивных параметров и эффективных режимов работы двухрезонаторных СВЧ-размораживателей обоснованных с учетом многокритериальных регрессионных моделей и результатов исследований органолептических, биохимических, физико-химических, микробиологических показателей молозива животных, характеризующих кормовую ценность;

– образец СВЧ-размораживателя непрерывно-поточного действия с передвижными диэлектрическими контейнерами и шестью магнетронами воздушного охлаждения на состыкованных коаксиальном и коническом резонаторах, позволяющий реализовать дефростацию и разогрев молозива животных при разных дозах воздействия ЭМП СВЧ с соблюдением электромагнитной безопасности на животноводческой ферме.

Теоретическую и практическую значимость работы представляют:

– научно-методические основы конструктивно-технологического проектирования и разработки радиогерметичных многогенераторных СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия с резонаторами, обеспечивающими отдельные процессы дефростации и разогрева сырья при изменении агрегатного состояния для сохранения его кормовой ценности;

– обоснованный технологический процесс дефростации и разогрева сырья воздействием ЭМП СВЧ с учетом фазового перехода и изменения глубины проникновения волны в сырье разного агрегатного состояния, зависящей от электрофизических параметров; аналитические зависимости, описывающие распределение температурного поля в сырье при разных агрегатных состояниях и рас-

пределение волн на границе раздела между замороженным и жидким сырьем, позволяющие определить коэффициент отражения волн, поглощаемую сырьем мощность при дефростации и разогреве, и КПД двухрезонаторного СВЧ-размораживателя;

– система методов исследований ЭД параметров и критериев оценки эффективного функционирования многогенераторных СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия со сдвоенными резонаторами для отдельной тепловой обработки сырья при разных дозах воздействия ЭМП СВЧ в зависимости от агрегатного состояния;

– конструктивно-технологические схемы СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия со сдвоенными резонаторами для отдельной тепловой обработки сырья в разных дозах в зависимости от агрегатного состояния, и обоснованные конфигурации резонаторов путем исследования их ЭД параметров, в том числе по программе CST Studio Suite, и оценки отклонения ЭД параметров от эффективных значений критериев проектирования;

– комплекс конструктивных параметров и режимов работы двухрезонаторных СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия с магнетронами воздушного охлаждения с учетом регрессионных моделей и результатов исследований органолептических, биохимических, физико-химических, микробиологических показателей молозива животных, характеризующих кормовую ценность;

– разработанный, созданный и апробированный в производственных условиях многогенераторный СВЧ-размораживатель непрерывно-поточного действия, содержащий коаксиальный резонатор с передвижными диэлектрическими контейнерами, состыкованный с коническим резонатором, и запердельные волноводы;

– результаты оценки эффективности экранирующего корпуса и запердельных волноводов путем исследования мощности потока излучений СВЧ-размораживателем и регрессионного анализа многофакторных моделей; технико-экономические показатели эффективности внедрения двухрезонаторного СВЧ-размораживателя для дефростации и разогрева молозива на ферме КРС.

Методология и методы исследования. Методология разработки многогенераторных СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия со сдвоенными резонаторами для дефростации и разогрева сырья с изменяющимся агрегатным состоянием предусматривает поэтапную оптимизацию конструктивного исполнения резонаторов через их ЭД параметры и путем анализа математических моделей, описывающих распределение ЭМП в них. В исследованиях пользовались в программе CST Microwave Studio 2018 трехмерным моделированием объемных резонаторов, выполненных с помощью программы SolidWorks, Компас 3D V20; многокритериальной оценкой регрессионных моделей с учетом органолептических, биохимических, физико-химических, микробиологических показателей молозива животных, характеризующих кормовую ценность; современными техническими средствами и измерительными приборами. Статистическую обработку опытных данных проводили, пользуясь пакетом программ MS Office, включая Excel, Mathcad 14, STATGRAPHICS Plus для Windows.

Положения, выносимые на защиту:

1. Технологические и технические решения по разработке радиогерметичных многогенераторных СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного дей-

ствия с резонаторами, обеспечивающими отдельные процессы дефростации и разогрева молозива животных с изменяющимся агрегатным состоянием для сохранения его кормовой ценности;

блок-схема модели реализации теоретических и экспериментальных исследований процессов дефростации и разогрева сырья с изменяющимся агрегатным состоянием в процессе фазового перехода, жидкая фаза которого коагулируется.

2. Математические модели, описывающие процессы дефростации и разогрева сырья воздействием ЭМП СВЧ с учетом фазового перехода и изменения глубины проникновения волны в сырье разного агрегатного состояния, зависящей от электрофизических параметров. Аналитические зависимости, описывающие распределение температурного поля в сырье при разных агрегатных состояниях и распределение волн на границе раздела между замороженным и жидким сырьем, позволяющие определить коэффициент отражения волн, поглощаемую сырьем мощность при дефростации и разогреве, и КПД двухрезонаторного СВЧ-размораживателя. Результаты исследования динамики дефростации и разогрева коровьего молозива животных при разных напряжениях ЭП.

3. Методы исследований ЭД параметров с учетом критериев оценки эффективного функционирования многогенераторных СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия со сдвоенными резонаторами для отдельной тепловой обработки сырья при разных дозах воздействия ЭМП СВЧ в зависимости от агрегатного состояния.

4. Конструктивно-технологические схемы СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия со сдвоенными резонаторами для отдельной тепловой обработки сырья в разных дозах в зависимости от агрегатного состояния, и обоснованные конфигурации резонаторов путем исследования их ЭД параметров, в том числе по программе CST Microwave Studio, и оценки отклонения ЭД параметров от эффективных значений критериев проектирования.

5. Комплекс конструктивных параметров и режимов работы двухрезонаторных СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия с магнетронами воздушного охлаждения с учетом регрессионных моделей и результатов исследований органолептических, биохимических, физико-химических, микробиологических показателей молозива животных, характеризующих кормовую ценность.

6. Разработанный, созданный и апробированный в производственных условиях многогенераторный СВЧ-размораживатель непрерывно-поточного действия, содержащий коаксиальный резонатор с передвижными диэлектрическими контейнерами, состыкованный с коническим резонатором, и заградительные волноводы. Метод оценки эффективности экранирующего корпуса и заградительных волноводов путем исследования мощности потока излучений СВЧ-размораживателя и регрессионного анализа многофакторных моделей, и оценка технико-экономических показателей технологии и двухрезонаторных СВЧ-размораживателей для дефростации и разогрева молозива на ферме КРС.

Степень достоверности и обоснованности результатов обеспечивается использованием научных методов исследования, сопоставлением результатов экспериментальных и теоретических исследований на основе известных методов решений, актами апробации в производственных условиях технологии и двухре-

зонаторного СВЧ-размораживателя; результатами исследования кормовой ценности молозива; публикацией результатов исследований в ведущих научных журналах. Достоверность технических решений подтверждена экспертизой ФГБНУ ФИПС, выдавшей 18 патентов на изобретения.

Реализация результатов исследований. Исследования проводились в соответствии с планами НИР: «Чувашский ГАУ», «Нижегородский ГИЭУ», «РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева» в объединенной научной школе. Результаты НИР используются в учебном процессе вузов: Марийский ГУ, Нижегородская ГСХА, Костромская ГСХА, Казанский ГАУ, Ульяновская ГСХА, ЧГПУ им. И. Я. Яковлева, Российский университет кооперации. Изготовленный СВЧ-размораживатель и результаты научно-исследовательской работы апробированы на фермах КРС в Нижегородской области: ООО «АП Княгининское» (г. Княгинино, ул. Свободы, д. 7); в Чувашской Республике (ЧР): в СХПК «СО-ЮЗ» (Ядринский район, д. Якимкино, ул. Светлая, д. 6), ГКФХ «Солдатова Эльвира Юрьевна» (Батыревский район, д. Татмыш-Югелево, ул. К. Маркса, д. 14), СХПК «НИВА» (Красночетайский район, д. Мочей, ул. Новая, д. 2), ОПХ «Ленинская искра» (Ядринский район, д. Верхние Ачаки, ул. Ленина, д. 25). Министерством сельского хозяйства ЧР и Министерством сельского хозяйства и продовольственных ресурсов Нижегородской области рекомендованы к применению технология и СВЧ-размораживатель для дефростации и разогрева молозива животных.

Апробация результатов. Основные положения диссертации обсуждались на международных научно-практических конференциях: Кузница идей (Литва, 2013 г.); Инновационные разработки молодых ученых – развитию АПК (Ставрополь, 2013 г.); Научный вклад молодых ученых в развитие перерабатывающей промышленности АПК (ГНУ ВНИМИ Россельхозакадемии, 2013 г.); Достижения современной науки в области энергосбережения (ЧГСХА, 2013-2014 гг.); Перспективы развития научных исследований в 21 веке (Махачкала, 2013-2014 гг.); Eurodoc Conference (Венгрия, 2014 г.); Инженерная наука – аграрному производству (КГАУ, 2014 г.); Энергосберегающие технологии в животноводстве и стационарной энергетике; Инновации в сельском хозяйстве (ВИЭСХ, 2014-2016 гг.); Роль мультидисциплинарного подхода в решении актуальных проблем фундаментальных и прикладных наук (Национальная академия наук Азербайджана, 2014 г.); Продовольственная безопасность и устойчивое развитие АПК (ЧГСХА, 2015 г.); Актуальные направления научных исследований XXI века (Воронежский ГЛТУ, 2015 г.); Наука, образование, общество (Интерактив, Чебоксары, 2015 г.); WORLD SCIENCE (ОАЭ, 2015-2016 гг.); Достижения науки в АПК (Самарская ГСХА, 2016 г.); Современные тенденции развития науки и технологий (Белгород, 2016-2017 гг.); Мосоловские чтения (Марийский ГАУ, 2016 г., 2021 г.); Наука, производство, образование (ЧГПУ им. И.Я. Яковлева, 2019 г.); посвященной 155-летию РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева (2020 г.); Устойчивое развитие в с. х., экологическая безопасность и энергетическая эффективность (Саратовский ГАУ, 2021 г.); AgroScience (ЧувГАУ, 2021-2022 гг.) и др.

Результаты исследований отмечены стипендией Президента РФ (приказ № 184 от 10.03.2015 г.); стипендией Главы ЧР (распоряжение № 473-рг от 31.12.2014 г.); дипломами У.М.Н.И.К. (ЧР, 2013-2014 гг.), Лучший молодой уче-

ный ЧР (2015 г.), конкурса объектов интеллектуальной собственности на соискание Премии Нижегородской области им. И. П. Кулибина (Н. Новгород, 2023 г.) (за патент № 2761810). Апробация работы прошла на инновационных выставках и конкурсах: РНФ «Проведение поисковых научных исследований отдельными группами» (заявки № 22-19-00372, № 22-66-00007, № 22-22-00118); Молодёжные идеи и проекты, направленные на повышение энергоэффективности и энергосбережения (М., 2013 г.); IV Ярославский энергетический форум (2013 г.); Наука XXI века (ЧР, 2013-2014 гг.); научно-техническое творчество молодежи НТТМ (ЧР, 2013 г., 2016 г.); За вклад в развитие интеллектуальной собственности (ЧР, 2015 г.); молодежный научно-образовательный форум (ЧР, 2016 г.); АПК выставках: Золотая осень (М., 2014 г., 2021-2022 гг.), АгроРусь (СПб, 2021 г.) и др.

Публикации. Результаты исследований отражены в 77 научных работах, в том числе 16 из перечня изданий, определенных ВАК РФ, 18 патентах на изобретения, 5 – в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных Scopus, 3 монографиях объемом 49,5 п.л. Общий объем опубликованных работ составляет 80,75 п.л., из которых 60,5 п.л. (75 %) принадлежат лично соискателю.

Личный вклад соискателя состоит в выявлении основной проблемы с последующей постановкой цели, формулировании теоретических задач и практической их реализации с дальнейшей обработкой и систематизацией полученных научных результатов в ходе экспериментальных исследований в лабораторных условиях, на ферме КРС и производственных испытаний.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов с выводами, заключения, списка использованной литературы (292 наименования, из них 50 – на иностранном языке) и 11 приложений. Основная часть изложена на 329 стр., содержит 160 рисунков и 76 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение включает актуальность избранной темы, научную инновационную идею, степень разработанности темы, гипотезу исследования, объект и предмет исследования, научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, методологию и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности, реализацию и апробацию результатов. Основываясь на существующих способах дефростации сырья, предлагается выработать методологию разработки радиогерметичного многогенераторного СВЧ-размораживателя непрерывно-поточного действия со сдвоенными резонаторами с учетом фазового превращения молозива животных.

В первом разделе «Состояние научной проблемы и возможные пути ее решения» анализированы состояние проблемы и информационные источники использования современных технологий и технических средств, предназначенных для дефростации молозива животных; электрофизические и теплофизические параметры сырья; сформулированы цель научного исследования и задачи для ее достижения. Известны диэлектрические свойства человеческого молозива

на микроволновых частотах¹. Содержание иммуноглобулинов в молозиве зависит от режима его хранения и его подготовки к скармливанию телятам (рисунок 1).

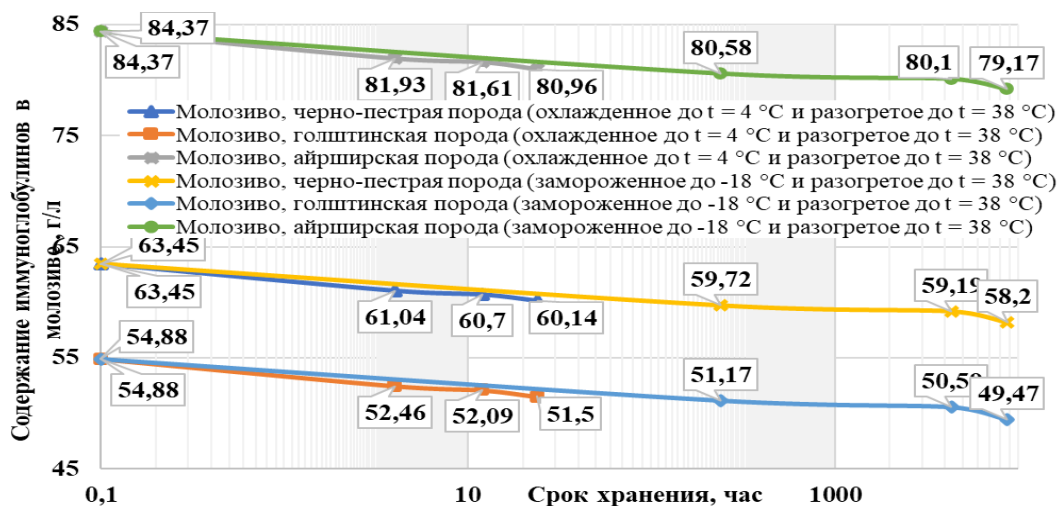


Рисунок 1 – Изменение содержания иммуноглобулинов в молозиве коровьем от хранения и подготовки его к выпойке телятам

Второй раздел «Теоретическое обоснование параметров двухрезонаторных СВЧ-размораживателей молозива животных» включает результаты обоснования параметров двухрезонаторных СВЧ-установок для дефростации молозива с учетом температуры фазового превращения; оценки равномерного распределения мощности излучения в СВЧ-размораживателях; исследования ЭД параметров резонаторов и обоснования выбора эффективных конструктивных исполнений резонаторов. Приведены результаты исследования распределения волн на границе фазового перехода с одного агрегатного состояния в другое. Характер изменения диэлектрических параметров молозива в замороженном и жидком состоянии с увеличением температуры нагрева противоположный. Известно, что по данным И. А. Рогова² изменения фактора диэлектрических потерь (k) сырья от температуры (T) описываются эмпирическими выражениями в промежутках температур:

$$\text{от } -10 \text{ до } 0^\circ\text{C: } k = 25,53 \cdot e^{0,19 \cdot T}; \text{ от } 0 \text{ до } 39^\circ\text{C: } k = 27,308 \cdot e^{-0,021 \cdot T}.$$

Т.е. фактор диэлектрических потерь сырья (коровьего молозива) при отрицательной температуре увеличивается, а при положительной температуре – уменьшается (рисунок 2).

Удельная мощность ($P_{уд}$), генерируемая в единице объема замороженного молозива, в процессе дефростации с -10 до 0°C при напряженности ЭП, равной $1,2 \text{ кВ/см}$, увеличивается с 7832 до 52867 Вт/м^3 .

$$P_{уд} = 5,55 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot k \cdot E^2 = 5,55 \cdot 10^{-11} \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot (4 \dots 27) \cdot (1,2 \cdot 10^5)^2 = 7832 \dots 52867 \text{ Вт/м}^3, \quad (1)$$

где f – частота, Гц; k – фактор диэлектрических потерь коровьего молозива; E – напряженность ЭП, В/м.

Скорость нагрева ($\Delta T/\Delta \tau$) молозива в процессе дефростации увеличивается с

¹ Lonappan, A., Rajasekharan, C., Thomas, V., Bindu, G., & Mathew, K. T. (2006). Dielectric Properties of Human Colostrum at Microwave Frequencies. Journal of Microwave Power and Elec-tromagnetic Energy. 41(2). P. 30-35.

² Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов/ И.А. Рогов и др. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. Стр. 35 (льда); стр. 87 молока, жирностью 6,4 %

$$0,0014 \text{ до } 0,094 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}: \frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \frac{P_{\text{уд}} \cdot \eta}{\rho \cdot C} = \frac{(7832 \dots 52867) \cdot 0,7}{1017 \cdot 3860} = 0,0014 \dots 0,0094 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{с}, \quad (2)$$

где ρ – плотность сырья, кг/м³; C – теплоемкость сырья, Дж/кг °С.

Тогда продолжительность *дефростации* молозива составит:

$$\Delta \tau = \Delta T / (0,0094) = 10 / 0,0094 = 17,7 \text{ мин.} \quad (3)$$

Для *разогрева* молозива от 0 до 39 °С, с учетом уменьшения скорости нагрева, следует обеспечить в резонаторе напряженность ЭП 3,8 кВ/см, т. е. другую дозу воздействия ЭМП СВЧ. Это возможно в конденсаторной части квазистационарного тороидального резонатора. Тогда продолжительность разогрева составит 7...8 мин., а общая продолжительность технологического процесса в двух резонаторах – 25...26 мин. Мощность СВЧ-размораживателя составляет 4,5 кВт при производительности 25...30 кг/ч, удельных энергетических затратах 0,17...0,2 кВт·ч/кг. Базовые размораживатели молозива, потребляемой мощностью 6 кВт, работают при удельных энергетических затратах 0,25...0,3 кВт·ч/кг. Продолжительность процесса дефростации и разогрева молозива в проектом варианте сокращается в 4 раза, что делает возможным предположение о сохранении кормовой ценности (иммуноглобулинов не ниже 50 мг/мл). В связи с этим для реализации процессов дефростации и разогрева сырья с учетом основных критериев проектирования разработаны двухрезонаторные СВЧ-размораживатели. Для обоснования параметров состыкованных коаксиального и коническим резонаторов использованы методики А. Н. Диденко³, С. А. Афанасьева⁴.

Проанализированы особенности ранее несуществующих конструкций резонаторов, где происходит тепловая обработка и обеззараживание продукта за счет поляризации диполей, зависящей от дозы воздействия и напряженности ЭП.

1) Особенности *усеченного конического резонатора* (открытого резонатора, рисунок 9). Размеры и рабочая частота для таких резонаторов подбирается так, чтобы на конической части возникали условия отсечки для одного или нескольких высших типов колебаний. Это обеспечит в данных структурах условия для возникновения резонансных колебаний за счет переотражений электромагнитных волн высших порядков от критических сечений. Отсекая вершину конического резонатора, созданы отверстия для внесения замороженного молозива в усеченный конический резонатор, без ущерба для качества резонансной системы. Я. В. Алексеенко⁵ показал, что при коническом профиле резонатора вырождение между колебаниями H_{01p} и E_{11p} не происходит, а собственные частоты мало отличаются от собственных мод цилиндрического резонатора с радиусом, равным радиусу основания конуса. Поэтому напряженность ЭП по радиусу основания открытого конического резонатора определяли по его формуле:

$$E_r = C \cdot (J_{m+1/2}) \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot r}{c} \right) \cdot P_v^m \cdot (\cos \theta) \cdot e^{i \cdot m \cdot \varphi} / r^{3/2}, \quad (4)$$

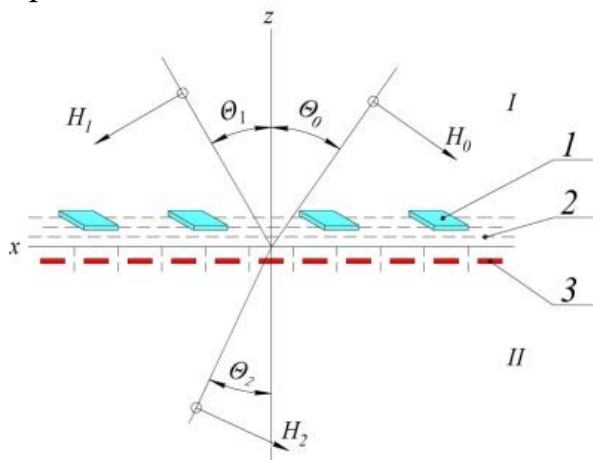
³ Диденко, А. Н. СВЧ-энергетика : Теория и практика. – М.: Наука. – 2003. – 446 с. (исследования процессов отражения и преломления волны).

⁴ Афанасьев, С. А. Введение в электродинамику СВЧ / С. А. Афанасьев, Д. Г. Санников. Ульяновск : Ульяновский ГУ. 2012. 60 с. (исследования интенсивности и мощности излучения через перфорацию)

⁵ Алексеенко, Я. В. Методы шепчущей галереи конического резонатора / Я. В. Алексеенко, А. М. Монахов, И. В. Рожанский // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. – № 11. – С. 72-76

где C – константа, определяемая частным решением функции Бесселя; $(J_{m+1/2})$ – функция Бесселя; m – целое число радиальных изменений поля по диаметру; f – частота ЭМП, Гц; r – радиус основания конического резонатора, м; c – скорость волны вакууме ($3 \cdot 10^8$ м/с); P_v^m – мощность, генерируемая в объеме сырья, Вт/м³; θ – угол раствора конуса, град; φ – начальная фаза.

2) *Граница раздела тороидального и конического резонаторов.* По его же методике проводили исследования процессов отражения и преломления волны СВЧ диапазона на плоской границе раздела между двумя однородными средами (замороженное и жидкое молозиво) на перфорированном неферромагнитном основании конического резонатора. Падение волны (рисунок 2) происходит из прозрачной среды I (замороженного сырья). При этом величины, относящиеся к падающей волне и отраженной, обозначены индексами 0 и 1, а величины, относящиеся к преломленной волне – индексом 2. Направление нормали к плоскости раздела сред I и II совпадают с осью z , ориентированной внутрь среды II, а ось x совпадает с границей раздела. Направление распространения всех волн лежит в плоскости xz , что эквивалентно равенству составляющих волнового вектора для трех волн:



сред I и II совпадают с осью z , ориентированной внутрь среды II, а ось x совпадает с границей раздела. Направление распространения всех волн лежит в плоскости xz , что эквивалентно равенству составляющих волнового вектора для трех волн:

$$k_{0x} = k_{1x} = k_{2x}, \text{ где } k_{0x} = k_0 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon \cdot \mu}, \quad (5)$$

где ε, μ – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

Рисунок 2 – Падение плоской волны на поверхность раздела двух сред:

1 – замороженные брикеты молозива; 2 – жидкое молозиво;

3 – перфорированное основание конического резонатора

Коэффициент отражения волн R , позволяющий оценить отношение потока отраженной энергии к падающему потоку энергии, можно определить по известной формуле 6 с учетом зависимости диэлектрических проницаемостей от температуры нагрева сырья при разных агрегатных состояниях $\varepsilon_1(T), \varepsilon_2(T)$. При нормальном падении плоской волны на границу раздела сред ($\theta_0 = 0$) оба случая поляризации эквивалентны. Формула справедлива и для поглощающей среды II. Если подвергается воздействию ЭМП СВЧ жидкая фракция молозива с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_2 = 53 \dots 42$, а замороженные блоки молозива с $\varepsilon_1 = 7 \dots 53$, тогда коэффициент отражения волн:

$$R = \left| \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_2(T) / \varepsilon_1(T)}}{1 + \sqrt{\varepsilon_2(T) / \varepsilon_1(T)}} \right|^2 = \left| \frac{1 - \sqrt{(53 \dots 42) / (7 \dots 53)}}{1 + \sqrt{(53 \dots 42) / (7 \dots 53)}} \right|^2 = 0,467 \dots 0,0466. \quad (6)$$

Следовательно, при мощности генератора 2400 Вт в жидкой фракции молозива при 0 °С поглощается мощность $(1 - 0,467) \cdot 2400 = 1279$ Вт.

Интенсивность и мощность излучения через перфорации основания конического резонатора исследовали на примере элементарного щелевого излучателя.

3) *Коаксиальный резонатор.* Пространство между соосно расположенными цилиндрами (диаметрами a и b , образующими кольцевую часть резонатора), за-

полнено замороженным молозивом с диэлектрической проницаемостью ε_l . Распределение ЭП \vec{E} в поперечном сечении линии повторяет структуру электростатического поля в цилиндрическом резонаторе. Поэтому ЭП имеет только радиальную составляющую E_r , а электрическое поле бегущей волны не имеет продольных составляющих: $E_z = 0, H_z = 0$. Размеры коаксиального резонатора определены из условий $b/a \leq 3,6$, и средний периметр кольцевого пространства кратен половине длины волны. Если условия не соблюдаются, то потери возрастают из-за увеличения плотности тока во внутреннем цилиндре. При уменьшении кольцевого пространства (стремлении отношения b/a к единице) потери растут.

Электрофизические аспекты нагрева сырья в ЭМПСВЧ. Размещение сырья с достаточно большим тангенсом угла диэлектрических потерь в объемный резонатор позволяет использовать практически всю СВЧ энергию генератора для нагрева сырья. Слой замороженного сырья расположен на перфорированном основании конического резонатора, радиусом R с колебаниями H_{01p} так, что его поверхность касательна электрическому полю $E_\varphi(r, z)$, а центр симметрии имеет координату $z = (\lambda/4) \cdot q$, где $q = 1, 3, 5 \dots$. При определенных конструктивных размерах резонатора КПД генератора можно определить и по методике А.Н. Диденко⁶ (7) с учетом изменения фактора диэлектрических потерь: $k_1 = 25,54 \cdot e^{0,19 \cdot T}$, ($-12 \dots 0$ °С); $k_2 = 27,31 \cdot e^{-0,021 \cdot T}$, ($0 \dots 40$ °С).

$$\eta = \left\{ 1 + \frac{\left[1 + (2 \cdot \pi / \mu_{01})^2 \cdot (R/h)^3 \cdot (1/2 \cdot p) \right] \cdot (R_s / Z_0) \cdot (V_{рез} / V_{сырья})}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon(T) \cdot \operatorname{tg} \delta(T) \cdot (2 \cdot \pi / \mu_{01})^2 \cdot (R/\lambda)^3} \right\}^{-1}, \quad (7)$$

где μ_{01} – корень функции Бесселя J_1 ($\mu_{01}=2,4050$); h – высота конуса, м; $V_{рез} = \frac{\pi \cdot h}{3} (R^2 + R \cdot r + r^2)$ – объем усеченного конического резонатора, м³; $V_{сырья} = \pi \cdot R^2 \cdot d$ – объем сырья в резонаторе, м³; R_s – поверхностное сопротивление резонатора ($R_s = 0,028$ Ом·мм²/м); Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства ($Z_0 = 377$ Ом).

КПД резонатора существенно зависит от коэффициента заполнения сырьем и от ориентации граничных плоскостей сырья относительно вектора ЭП. КПД тороидального резонатора определяли, зная критическую длину волны $\lambda_{кр}$, пользуясь известной формулой:

$$\eta = \left[1 + \frac{l \cdot \lambda}{2 \cdot a \cdot \lambda_{кр}} \right]^{-1} = \left[1 + \frac{0,1836 \cdot 0,1224}{2 \cdot 0,306 \cdot 0,52} \right]^{-1} = 0,73. \quad (8)$$

где l, a – размеры конденсаторной части тороидального резонатора, м.

По формуле $E_\varphi(r, z) / \sqrt{P_{генер} \cdot Q}$ (9) оценивали эффективность резонатора, учитывающей взаимосвязь напряженности ЭП $E_\varphi(r, z)$ с мощностью генератора $P_{генер}$ и собственной добротностью резонатора Q . В реальных условиях при СВЧ нагреве имеет место неравномерность фактора диэлектрических потерь молозива и распределения напряженности ЭП, зависящих от температуры сырья (рис. 3). Фактор диэлектрических потерь молозива при температуре от -10 до 0 °С увеличивается от 4 до 27, т.е. мощность, поглощаемая сырьем, и скорость его нагрева в процессе дефростации, увеличивается. При разогреве молозива от 0 до

⁶ Диденко, А. Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика. – М.: Наука. – 2003. – 446 с.

39 °С фактор диэлектрических потерь уменьшается, т.е. скорость нагрева жидкого сырья с увеличением температуры уменьшается. Это приводит к перегреву одних участков сырья и недостаточному нагреву других. Температурное поле в сырье приводит к изменению агрегатного состояния. Конфигурация объемного резонатора должна обеспечить концентрацию и однородность ЭП в области расположения сырья. Это возможно в тороидальных резонаторах, имеющих зазор в виде конденсаторной части, где возбуждается однородное ЭП. ЭД параметры в тороидальных резонаторах с перфорированным основанием с частично заполненным сырьем с изменяющимся агрегатным состоянием изучены недостаточно полно.

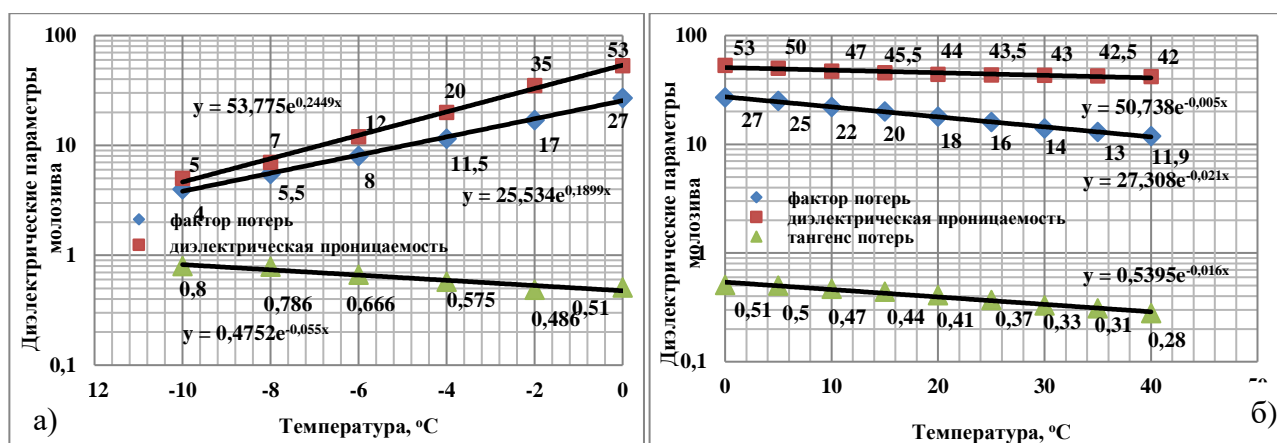


Рисунок 3 – Изменения диэлектрических параметров коровьего молока при переходе из замороженного в жидкое состояние:
 а) замороженное молоко; б) размороженное молоко 6,4 %

Разработан СВЧ-размораживатель с двумя состыкованными тороидальными резонаторами с общим перфорированным основанием для дефростации и разогрева молока воздействием ЭМП СВЧ разной дозы (рис. 4).

Над основанием установлен диэлектрический перемешивающий механизм.

В центральную часть верхнего резонатора установлен измельчающий механизм. В конденсаторную часть нижнего резонатора установлена диэлектрическая тарелка. Магнетроны установлены в области конденсаторных частей со сдвигом на 120 градусов. Измельченное замороженное сырье попадает в конденсаторную часть 12 резонатора 4, где под воздействием ЭМП СВЧ происходит дефростация молока, и жидкое сырье через перфорированное основание 11 стекает в конденсаторную часть 7 нижнего резонатора 5, где разогревается.

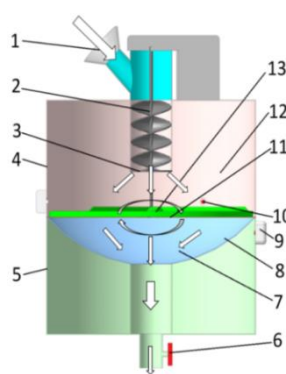


Рисунок 4 – Схема СВЧ-размораживателя с тороидальными резонаторами:

1 – измельчающий механизм, 2 – нагнетательный шнек; 3 – нож и решетка; 4, 5 – верхний и нижний тороидальные резонаторы; 6 – шаровой кран; 7, 12 – конденсаторные части резонаторов; 8 – диэлектрическая тарелка; 9, 10 – магнетроны; 11 – перфорированное основание резонаторов; 13 – диэлектрический перемешивающий механизм

В конденсаторных частях обоих резонаторов возбуждается ЭП высокой

напряженности, достаточной для снижения бактериальной обсемененности продукта. Расчет тороидальных резонаторов проводили по стандартным формулам и с помощью программы CST Studio Suite. При теоретическом обосновании параметров СВЧ-размораживателя решались взаимосвязанные задачи электродинамики и теплопроводности для тороидальных резонаторов с общим перфорированным основанием при заполнении их сырьем разного агрегатного состояния с учетом температуры фазового превращения. При рассмотрении процесса взаимодействия электромагнитных волн с сырьем учитывали то, что диэлектрические и теплофизические параметры являются функцией температуры. Исследование проводили в двух резонаторах (таблица 1): 1) нагрев замороженного сырья и его переход в жидкое состояние; 2) нагрев молозива в жидком состоянии от 0 до 39 °С, по методике Тахаува А. А.⁷

Таблица 1 – Последовательность исследования процессов в двух резонаторах с учетом изменения диэлектрических параметров сырья

Диэлектрические параметры	<i>Первый тороидальный резонатор</i>	
	воздуха и толщина слоя	$\varepsilon_0, tg\delta_0, h_0$
	замороженного молозива и толщина слоя	$\varepsilon_1, tg\delta_1, h_1$
	смеси замороженного молозива с частично размороженным сырьем и толщина слоя	$\varepsilon_2, tg\delta_2, h_2$
	размороженного молозива и толщина слоя	$\varepsilon_3, tg\delta_3, h_3$
	<i>Второй тороидальный резонатор</i>	
	жидкого молозива при температуре 0...1 °С и толщина слоя	$\varepsilon_3, tg\delta_3, h_4$
жидкого молозива при температуре 39 °С и толщина слоя	$\varepsilon_4, tg\delta_4, h_5$	

Глубина проникновения электромагнитной волны в сырье разного агрегатного состояния Δ_i зависит от диэлектрической проницаемости (ε_i), тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta_i$) и длины волны $\lambda = 12,24$ см:

$$\Delta_i(y) = \frac{\lambda}{\sqrt{2 \cdot \varepsilon_i (\sqrt{1 + tg^2 \delta_i} - 1)}}, \Delta_1(y) = \frac{\lambda}{\sqrt{2 \cdot \varepsilon_1 (\sqrt{1 + tg^2 \delta_1} - 1)}}, \Delta_4(y) = \frac{\lambda}{\sqrt{2 \cdot \varepsilon_4 (\sqrt{1 + tg^2 \delta_4} - 1)}}. \quad (10)$$

Эмпирические зависимости диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и фактора диэлектрических потерь молозива жирностью 6,4 %:

- 1) в диапазоне ($h_0 < y_1 < h_1$) отрицательных температур (–12...0 °С)
 $\varepsilon_1 = 53,78 \cdot e^{0,25 \cdot T}; tg\delta_1 = 0,48 \cdot e^{-0,055 \cdot T}; k_1 = 25,54 \cdot e^{0,19 \cdot T};$
- 2) в диапазоне ($h_1 < y_2 < h_2$) фазового перехода (–1,5...2,5 °С)
 $\varepsilon_2 = 51,75 \cdot e^{0,025 \cdot T}; tg\delta_2 = 0,47 \cdot e^{-0,0097 \cdot T}; k_2 = 24,28 \cdot e^{0,036 \cdot T};$
- 3) в диапазоне ($h_2 < y_3 < h_3$) положительных температур (0...40 °С)
 $\varepsilon_3 = 50,74 \cdot e^{-0,0050 \cdot T}; tg\delta_3 = 0,54 e^{-0,016 \cdot T}; k_3 = 27,31 \cdot e^{-0,021 \cdot T}.$

$$\Delta_1(y) = \frac{\lambda}{\sqrt{2 \cdot 53,78 \cdot e^{0,25 \cdot T} \left(\sqrt{1 + (0,48 \cdot e^{-0,055 \cdot T})^2} - 1 \right)}}, \Delta_2(y) = \frac{\lambda}{\sqrt{2 \cdot 51,75 \cdot e^{0,025 \cdot T} \cdot \left(\sqrt{1 + (0,47 \cdot e^{-0,0097 \cdot T})^2} - 1 \right)}}, \quad (11)$$

⁷ Тахаув, А. А. Математическое моделирование СВЧ нагрева диэлектрика с учетом фазовых переходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / Тахаув Айдар Асгатович. – Казань: КГТУ им. Туполева. – 2011. – 20 с.

Например, при фазовом переходе молозива с твердого в жидкое состояние глубина проникновения ЭМП, длиной волны 12,24 см, составляет 32,89 мм.

$$\Delta_3(y) = \frac{122,4}{\sqrt{2 \cdot 50,74 \cdot (\sqrt{1 + (0,54)^2} - 1)}} = 32,89 \text{ мм.} \quad (12)$$

Аналогично вычислены величины глубины проникновения электромагнитных волн в молозиво при других агрегатных состояниях. Для определения температурного поля составлена система уравнений теплопроводности с начальными и граничными условиями с учетом температуры фазового перехода и скорости движения границы фазового перехода, и изменения толщины каждого слоя.

Для определения коэффициента теплоотдачи (α_i) молозива с учетом фазового перехода пользовались известной формулой:

$$\alpha_i = 2,04 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda_i^3 \cdot \rho_i \cdot g \cdot r_i}{\nu_i \cdot h_i \cdot \Delta T}}, \quad (13)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; r – удельная теплота парообразования воды ($2,258 \cdot 10^6$ Дж/кг); ν_i – коэффициент кинематической вязкости, м²/с ($\nu = 2,5817e^{-0,02 \cdot T}$); ΔT – разность температур, °С.

Коэффициент теплоотдачи молозива в положительном диапазоне температур при изменении температуры и толщины сырья определяли по формуле: $\alpha_3 = 152,66 \cdot \sqrt[4]{e^{0,026 \cdot T} / h_3}$. (14). Коэффициент теплоотдачи молозива при фазовом переходе с замороженного состояния в жидкое составляет 482,75 Вт/м²·°С. Для расчетов пользовались формулой удельной мощности (15), учитывающей изменение электрофизических параметров молозива при разных агрегатных состояниях. Распределение температурного поля в сырье происходит в соответствии с функцией плотности мощности тепловых потерь (p_i) по оси y :

$$p_i(y) = \omega \cdot \varepsilon_o \cdot \varepsilon_i \cdot tg \delta_i \cdot |\dot{E}_i|^2, \quad p_1(y) = 3,47 \cdot 10^{10} \cdot e^{0,19 \cdot T} \cdot E_1^2, \text{ Вт/см}^3;$$

$$p_2(y) = 3,30 \cdot 10^{10} \cdot e^{0,036 \cdot T} \cdot E_2^2, \text{ Вт/см}^3; \quad p_3(y) = 3,71 \cdot 10^{10} \cdot e^{-0,021 \cdot T} \cdot E_3^2, \text{ Вт/см}^3. \quad (15)$$

где E – напряженность ЭП, В/см.

Собственную добротность коаксиального резонатора вычисляли по выражению:

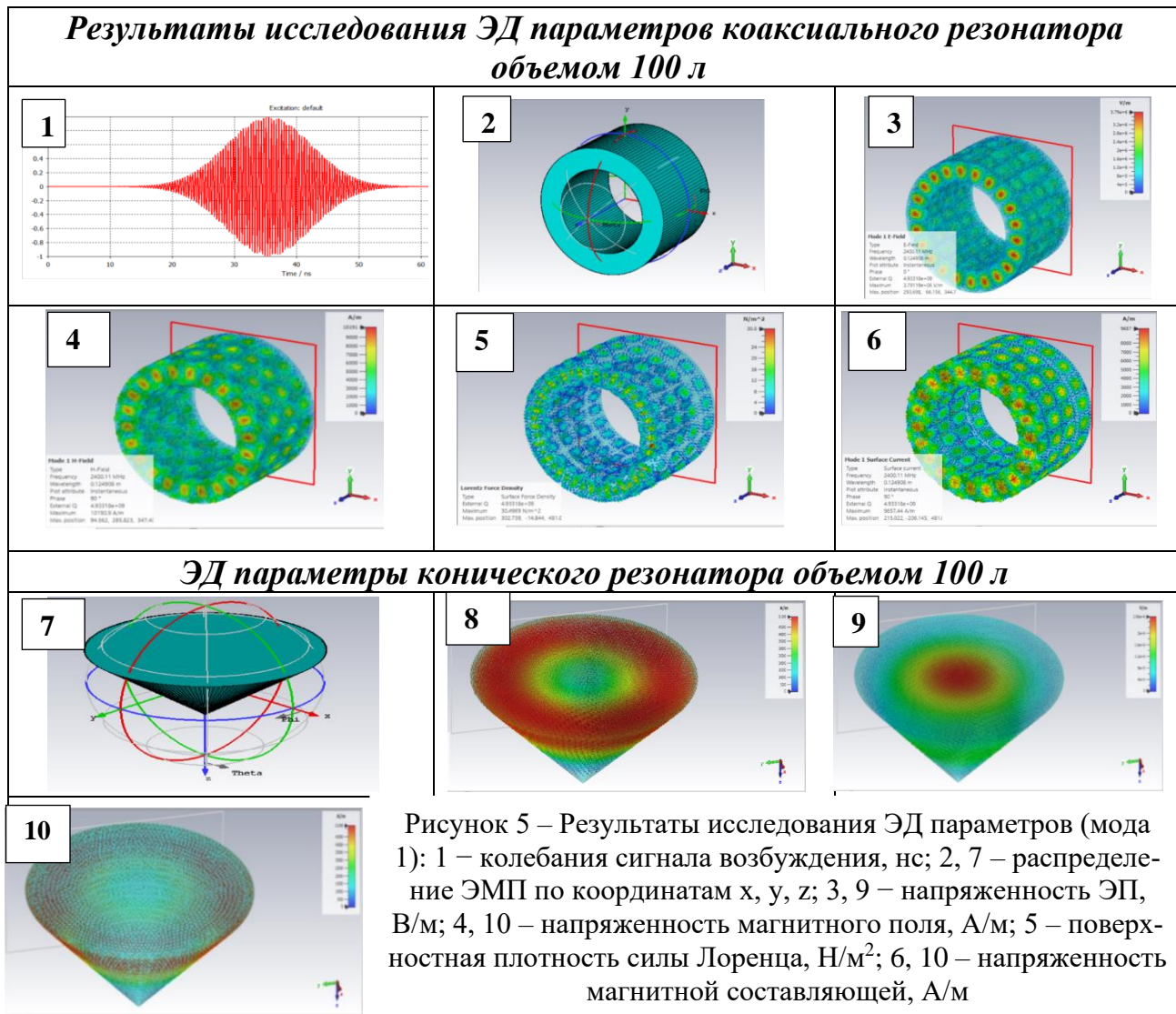
$$Q = \frac{\pi \cdot f \cdot a}{c \cdot \sqrt{f / \sigma}} \cdot \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot k^2}{\left((2 \cdot \pi \cdot f)^2 / c^2 - k^2 \right)^2 \cdot a \cdot b} \right), \quad (16)$$

где c – скорость света, м/с ($3 \cdot 10^8$ м/с); σ – проводимость стенок резонатора, См/м (для алюминия $\sigma = 35 \cdot 10^6$ См/м); $k = 3,5$ – коэффициент, учитывающий перфорацию основания; a, b – диаметры цилиндров, м; γ – проводимость сырья, См/м.

$$Q = \frac{3,14 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,1}{3 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{\frac{2450 \cdot 10^6}{35 \cdot 10^6}}} \cdot \left(1 + \frac{3,14^2 \cdot 3,5^2}{\left((2 \cdot 3,14 \cdot 2450 \cdot 10^6)^2 \cdot (3 \cdot 10^8)^{-2} - 3,5^2 \right)^2 \cdot 0,1 \cdot 0,35} \right) = 3063.$$

$$\text{Фазовая скорость колебаний: } \nu = 2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot f}{\mu \cdot \gamma}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot 2450 \cdot 10^6}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1}} = 156 \cdot 10^6 \text{ м/с.} \quad (17)$$

Проведено моделирование трехмерных структур ЭМП в коаксиальном резонаторе с тремя магнетронами в программе CST Studio Suite (вычислительный модуль Time Domain Solver). Результаты исследования напряженности электрической (А/м) и магнитной (В/м) составляющих, плотности тока (А/м³), плотности излучения ЭМИ (А/м²) приведены на рисунках 5, 6. Зная электрофизические параметры молозива в разных агрегатных состояниях, предварительно оценивали динамику нагрева сырья. Систематизированы СВЧ-размораживатели с разными конструктивными исполнениями резонаторов и проанализированы основные ЭД параметры системы «генератор-резонатор-нагрузка» (рисунок 6).



СВЧ-установки для дефростации и разогрева молозива животных с результатами исследования ЭД параметров

Пат. 2694944

1. Торoidalный резонатор для освобожденного от пластиковых бутылок замороженного сырья. Собственная добротность (Q) 3000. Напряженность ЭП (E) 0,6-1 кВ/см.

Пат. 2753424

2. Состыкованные тороидальные резонаторы для измельченного замороженного сырья. $Q=4000$. $E=2-4$ кВ/см.

Пат. 2752938

3. Состыкованные конический и тороидальный резонаторы для сырья, замороженного в виде брикетов. $Q=4000$. $E=1,2-4$ кВ/см.

Пат. 2775137

4. Состыкованные конические резонаторы. $Q=5000$. $E=1,2-4$ кВ/см.

Пат. 2752941

5. Состыкованные четыре конических резонатора. $Q=4000$. $E=2-4$ кВ/см.

Пат. 2762645

6. Цилиндрический металлодиэлектрический резонатор, состыкованный с коническим резонатором. $Q=6000$. $E=1,2$ кВ/см (в цилиндрическом резонаторе), $E=4$ кВ/см (в коническом).

Пат. 2761810

7. Коаксиальный резонатор, состыкованный с коническим резонатором. $Q=5000$. $E=1-2$ кВ/см (в коаксиальном резонаторе), $E=2-4$ кВ/см (в коническом).

Пат. 2777113

8. Сдвоенный коаксиальный резонатор. $Q=5000$. $E=1,1-4$ кВ/см.

Mode 1	
Type	E-Field
Frequency	2450.13 MHz
Phase	0
Maximum	3.15431e+06 V/m
Max. position	-70.218, 434.377, 201.327

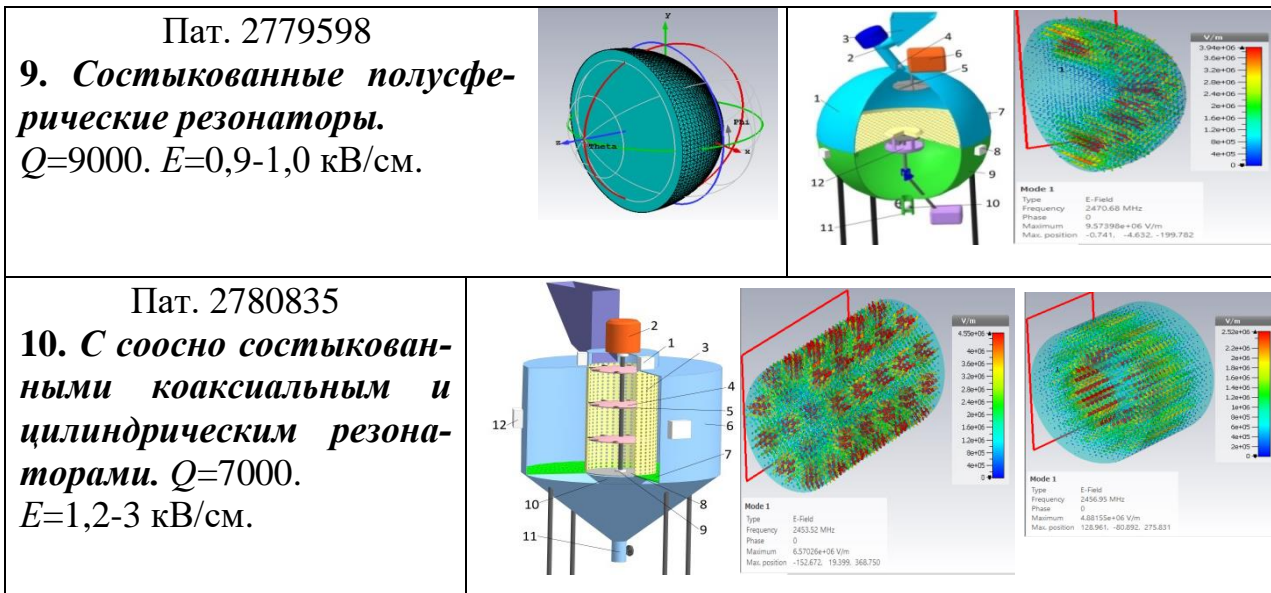


Рисунок 6 – Сводная таблица СВЧ-размораживателей с разными конфигурациями резонаторов

Результаты исследования ЭД параметров показывают, что для обеспечения высокой напряженности ЭП следует проектировать тороидальные резонаторы, конические резонаторы обеспечивают электромагнитную безопасность при непрерывном режиме работы, металлодиэлектрический цилиндрический резонатор с криволинейной поверхностью снижает потери энергии и обладает высокой собственной добротностью. Для обеспечения равномерного распределения ЭМП следует источники излучений расположить со сдвигом на 120 градусов по периметру резонатора. Для равномерного нагрева замороженного сырья в пластиковых бутылках их следует транспортировать в объеме резонатора.

В третьем разделе «Реализация принципов проектирования СВЧ техники для размораживания молозива животных» приведены описания разработанных СВЧ-размораживателей с разными конструктивными исполнениями резонаторов. Они позволили оценить возможность реализации основных требований, предъявляемых к технологии дефростации и разогрева молозива животных, в том числе сохранение кормовой ценности в продукте.

Блок-схема модели реализации теоретических и экспериментальных исследований предусматривает воздействие ЭМП СВЧ управлением ЭД параметрами системы «генератор-резонатор-нагрузка», а именно – напряженностью ЭП, частотой ЭМП, мощностью потока излучений (рисунок 7).

Методологические основы проектирования СВЧ-размораживателей с учетом возможности реализации всех критериев в конструктивных исполнениях резонаторов, способных выполнять одновременно функцию экранирующего корпуса, и обладающих минимальными эксплуатационными затратами, и позволяющих сохранить кормовую ценность молозива, отражены в таблице 2.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭМПСВЧ варьируется <i>управлением</i>				
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ системы «генератор-резонатор-нагрузка», а именно:			РЕЖИМАМИ ВОЗДЕЙСТВИЯ с учетом электрофизических параметров сырья: фактора диэлектрических потерь (k); тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta$); диэлектрической проницаемости (ϵ); теплоемкости (C); плотности (ρ) <i>обосновываются</i>	
напряженность ЭП, В/м	частота ЭМП, 2450 МГц	мощность потока излучений, Вт/м ²	удельная мощность генератора, Вт/г	продолжительность тепловой обработки, с
ИССЛЕДУЕМЫЙ ОБЪЕКТ – замороженная суспензия, с изменяющимся агрегатным состоянием в процессе фазового перехода, жидкий компонент сырья коагулируется при температуре выше 40 °С:				
МОЛОЗИВО ЖИВОТНЫХ				
коровье			козье	
КОРМОВАЯ ЦЕННОСТЬ продукта представлена результатами исследований биохимических, физико-химических, микробиологических, органолептических показателей				

Рисунок 7 – Блок-схема реализации теоретических и экспериментальных исследований

Таблица 2 – Методологические основы разработки СВЧ-размораживателей для дефростации и разогрева молозива животных

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ	<i>Анализ электрофизических параметров сырья на частоте 2450 МГц с учетом агрегатного состояния</i>		Изменение электрофизических и теплофизических параметров молозива: диэлектрической проницаемости, фактора диэлектрических потерь, теплоемкости, плотности в зависимости от температуры, жирности.
	<i>Выявления функциональных критериев</i>	Установка непрерывно-поточного действия. Магнетроны воздушного охлаждения. Высокая напряженность электрического поля. Радиогерметичность без экранирующего корпуса. Достаточная производительность установки для ферм КРС. Резонаторы многогенераторные, состыкованные для разного агрегатного состояния сырья.	
	<i>Разработка нескольких размораживателей с разными конструктивными исполнениями резонаторов: для замороженного сырья в бутылках, измельченного сырья, сырья в виде брикетов с размерами не более двух глубин проникновения волны</i>		Тороидальные резонаторы с разными месторасположениями конденсаторной зоны. Коаксиальный резонатор. Конические резонаторы. Полусферические резонаторы. Цилиндрические резонаторы.
	<i>Обоснование механизма для транспортирования сырья разного агрегатного состояния</i>		Контейнеры, шнек, центробежный диск, перфорация, насос вязкой жидкости, молотковая дробила.
	<i>Сравнительная оценка установок с разными конфигурациями резонаторов по наименьшему отклонению критериев</i>		Основным критерием является сокращение длительности процесса дефростации и разогрева молозива. Сохранение кормовой ценности продукта, в том числе иммуноглобулинов.
	<i>Оценка экономических показателей применения размораживателей</i>	Экономический эффект за счет снижения эксплуатационных расходов и реализации продукта, обладающего кормовой ценностью. Рентабельность применения СВЧ-размораживателей, в которых реализованы инновационная идея – тепловая обработка сырья в разном агрегатном состоянии в двух резонаторах с разной дозой воздействия ЭМПСВЧ.	

Конструктивные исполнения двухрезонаторных размораживателей должны:
– реализовать процессы дефростации и разогрева молозива животных в непрерывном режиме за счет прорезей, перфорации, щелей или за счет исполь-

зования запредельных волноводов – как узлы для загрузки сырья и слива продукта;

– обеспечить маломощными магнетронами достаточную напряженность ЭП в резонаторах и мощность диэлектрического нагрева для достижения стерильности продукта;

– обеспечить равномерность распределения ЭМП в резонаторах, за счет диссекторов, и равномерный нагрев жидкого сырья, путем согласования межтарельчатого зазора, куда стекает продукт, с глубиной проникновения волны;

– иметь возможность управлять дозой воздействия ЭМП СВЧ на молозива при изменении его жирности, и варьировать производительностью размораживателя;

– обеспечить электромагнитную безопасность без экранирующего корпуса за счет конструктивных особенностей резонаторов (например, усечением конического резонатора на уровне критического сечения);

– учитывать изменения электрофизических параметров молозива разных видов животных в зависимости от температуры нагрева;

– содержать датчики контроля температуры, плотности, жирности, кислотности сырья, ЭД параметров, в том числе мощности установки, потребления электроэнергии, контроля частоты ЭМП, мощности потока излучений.

Ниже описаны СВЧ-размораживатели непрерывно-поточного действия с состыкованными резонаторами разного конструктивного исполнения.

1. СВЧ-размораживатель с тороидальным резонатором для размораживания молозива в пластиковых бутылках (заявка 2022120392, положительное решение)

(рисунки 8). Инновационная идея: конструктивное исполнение тороидального резонатора обеспечивает на уровне конденсаторной части перемещение замороженного сырья в пластиковых бутылках, наклоненных горлышком к центру, по диэлектрической круглой платформе.

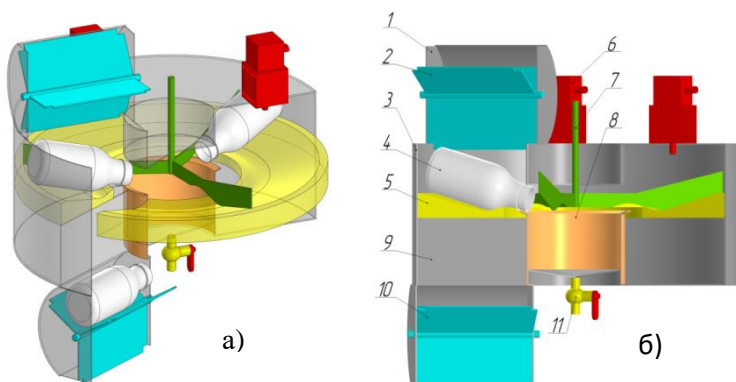


Рисунок 8 – СВЧ-размораживатель: а) общий вид; б) общий вид с позициями; 1 – шлюзовой затвор; 2 – отсеки роторного питателя; 3 – тороидальный резонатор; 4 – молозиво в пластиковой бутылке; 5 – диэлектрическая наклонная платформа; 6 – волновод, магнетрон и вентилятор; 7 – электроприводной ротор с диэлектрическими лопастями; 8 – керамический цилиндр; 9 – тороидальная часть резонатора; 10 – шлюзовой затвор; 11 – шаровой кран

Жидкое сырье разогревается и стерилизуется при высокой напряженности ЭП в керамическом цилиндре, расположенном в конденсаторной части, позволяющем сконцентрировать энергию электромагнитных излучений в сырье. На кольцевых основаниях резонатора, средний периметр которых кратен половине длины волны, имеются отверстия для тары, состыкованные с шлюзовыми затворами 1, 10. Скорость передвижения замороженного сырья зависит от мощности генераторов и от объема сырья в резонаторе. *Преимущества.* В конденсаторной части резонатора возбуждается ЭП высокой напряженности, что увеличивает скорость нагрева и снижает бактериальную обсемененность, сохраняя кормовую ценность сырья.

2. СВЧ-размораживатель с коническим и тороидальным резонаторами для замороженного молока в брикетах (пат. 2752938) содержит резонаторы с общим перфорированным основанием 4 (рисунок 9). Магнетроны 2, 5 расположены со сдвигом на 60 градусов по периметру резонаторов. Тороидальный резонатор представлен конденсаторной частью 6, отделенной перфорированным диэлектрическим кольцевым основанием 7 от кольцевой части 9 резонатора, средним периметром, кратным половине длины волны. *Преимущества.* Возможность обеспечения высокой напряженности ЭП в обоих резонаторах, электромагнитной безопасности; равномерного нагрева сырья.

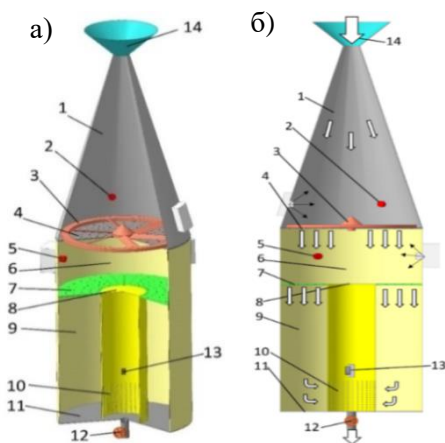


Рисунок 9 – СВЧ-размораживатель: а, б) пространственное и схематическое изображения:

- 1 – конический резонатор; 2, 5 – магнетроны; 3 – перемешивающий механизм; 4 – перфорированное основание конического резонатора; 6 – конденсаторная часть; 7 – диэлектрическое перфорированное основание; 8 – основание внутреннего цилиндра; 9 – кольцевая часть; 10 – перфорированная нижняя часть боковой стенки; 11 – неферромагнитное основание; 12 – шаровой кран; 13 – датчик температуры; 14 – приемная емкость

Недостатки. Загрузка сырья – только замороженными брикетами, размерами менее четверти длины волны. В коническом резонаторе равномерное распределение ЭМП без диссекторов затруднительно.

3. СВЧ-размораживатель с коническими резонаторами для замороженного молока в брикетах (рисунок 10) (пат. 2752941). Основной резонатор 2 установлен с усеченной вершиной, направленной вверх, а остальные дополнительные конические резонаторы 4, расположенные вокруг него, направлены вершиной вниз. У резонаторов 4 часть сектора боковой поверхности 5 в области нижнего основания, перфорирована. Боковые перфорированные поверхности резонаторов 4 углублены в боковую поверхность основного резонатора 1 так, что площади перфораций достигают до его основания. По периметрам оснований всех резонаторов со сдвигом на 120 градусов установлены магнетроны 4, 10, а над основанием основного резонатора расположен диэлектрический перемешивающий механизм 9. В дополнительных резонаторах, в области вершин с шаровыми кранами 7 и датчиками температуры 8, установлены диэлектрические перемешивающие диски 6.

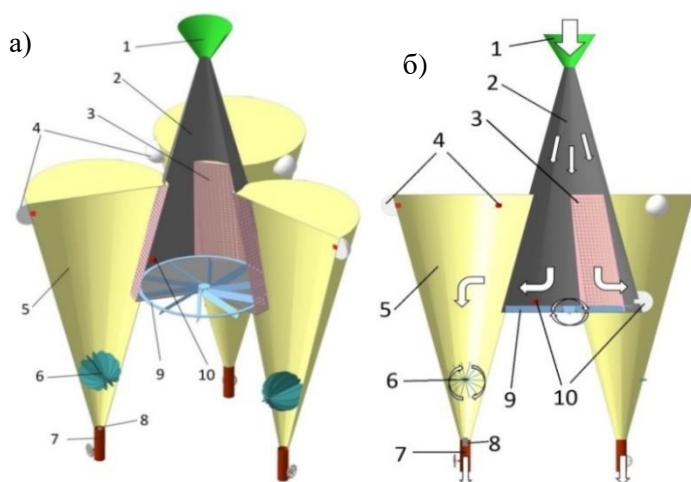


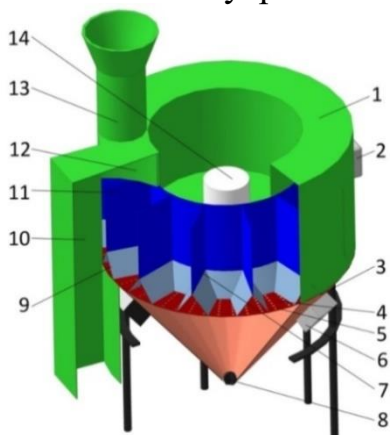
Рисунок 10 – СВЧ-размораживатель с коническими резонаторами:

- а, б) пространственное и схематическое изображения: 1 – приемная емкость; 2 – основной конический резонатор с перфорированными частями 3 боковой поверхности; 4 – магнетроны по периметрам оснований дополнительных резонаторов 5, 6 – диэлектрические перемешивающие диски; 7 – шаровые краны; 8 – датчики температуры; 9 – диэлектрический перемешивающий механизм; 10 – магнетроны на основном резонаторе

К усеченному основанию основного резонатора 2 прикреплена приемная емкость 1 с заслонкой. Высота и периметр оснований всех резонаторов кратны половине длины волны. *Преимущества.* Установка радиогерметичная, обеспечивает высокую напряженность ЭП; равномерное распределение сырья в объеме резонатора; возможность регулирования дозы воздействия и обеспечения тепловой обработки отдельно с учетом агрегатного состояния молозива.

Недостатки. Сложно оценить критическое сечение в зависимости от угла раствора и высоты конического резонатора, зависящей от длины волны.

4. СВЧ-размораживатель с квазистационарными тороидальными резонаторами для замороженного измельченного молозива (пат. 2753424), рисунок 4. Характерным признаком квазистационарного тороидального резонатора является пространственное разделение электрического и магнитного полей у колебания с наименьшей резонансной частотой. Энергия соответствующих полей концентрируется в тороидальной части и конденсаторном зазоре. Основываясь на этом признаке, разработан СВЧ-размораживатель непрерывно-поточного действия с двумя квазистационарными тороидальными резонаторами с общим перфорированным основанием. *Преимущества:* равномерный нагрев измельченного замороженного сырья; радиогерметичность. *Недостатки.* Сложно регулирования напряженности ЭП в конденсаторном зазоре из-за малого диаметра основания внутреннего цилиндра, куда установлен измельчающий механизм.



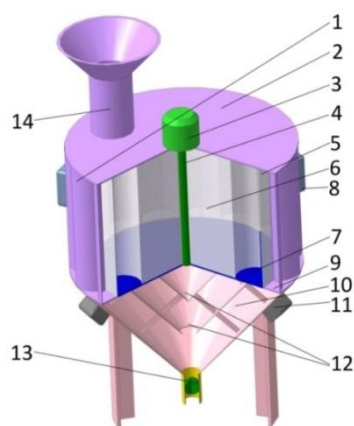
5. СВЧ-размораживатель с коаксиальным и коническим резонаторами для размораживания молозива в пластиковых бутылках (рисунок 11) (пат. 2761810) содержит коаксиальный резонатор 1 без нижнего кольцевого основания. Он состыкован с основанием конического резонатора 3. В коаксиальном резонаторе по периметру внутреннего цилиндра имеется прорезь для электропривода 14, обеспечивающего перемещение отсеков, образованных с помощью радиально расположенных диэлектрических перегородок 7.

Рисунок 11 – СВЧ-размораживатель с коаксиальным и коническим резонаторами: 1 – коаксиальный резонатор прямоугольного сечения; 2, 6 – магнетроны; 3 – конический резонатор с перфорированным основанием 4; 7 – диэлектрические перегородки, образующие отсеки; 8 – шаровой кран на вершине конического резонатора; 9, 11 – открытое окно; 10 – неферромагнитный выгрузной патрубок; 12 – направляющая диэлектрическая планка; 13 – загрузочный патрубок; 14 – электропривод

Перфорированное основание 4 конического резонатора диаметром менее четверти длины волны, а магнетроны установлены со сдвигом на 120 градусов по периметру на каждом резонаторе. На основании коаксиального резонатора, со средним периметром, кратным половине длины волны, имеется загрузочный патрубок 13, выполняющий функцию заградительного волновода. *Преимущества.* В кольцевом объеме резонатора возбуждается бегущая волна, обеспечивающая нагрев сырья равномерно. Возможность варьировать объемом и количеством бутылок. *Недостатки.* Заградительный волновод, используемый для загрузки пла-

стиковых бутылок, очень длинный, что вызывает затруднения при размещении бутылок в контейнеры.

6. СВЧ-размораживатель с металлодиэлектрическим резонатором для размораживания мороженого в пластиковых бутылках (рисунки 12) (пат. 2762645) содержит соосно установленный цилиндрический неферромагнитный



корпус 1, радиопрозрачный цилиндр 5 и диэлектрический сплошной цилиндр 6, боковая сторона которого представлена вогнутыми полуцилиндрами, радиусом, кратным половине длины волны. Боковая сторона корпуса 1 образована выпуклыми полуцилиндрами диаметром, равным диаметру вогнутого полуцилиндра. Радиопрозрачный и сплошной диэлектрический цилиндры жестко установлены на диске 7. Пространство, внутри неферромагнитного цилиндрического корпуса 1, выполняет функцию *металлодиэлектрического* резонатора.

Рисунок 12 – СВЧ-размораживатель с металлодиэлектрическим резонатором:

- 1 – экранирующий цилиндрический резонатор; 2 – верхнее неферромагнитное основание;
- 3 – электродвигатель; 4 – вал неферромагнитный; 5 – радиопрозрачный пустой цилиндр;
- 6 – диэлектрический сплошной цилиндр; 7 – диск неферромагнитный перфорированный;
- 8, 11 – магнетроны; 9 – кольцевое неферромагнитное основание корпуса; 10 – конический неферромагнитный резонатор; 12 – радиопрозрачные усеченные конические тарелки;
- 13 – запердельный волновод с шаровым краном; 14 – запердельный волновод

Микроволны удерживаются внутри поляризуемого диэлектрика, например, керамики, сапфира и т.п., за счет резкого изменения диэлектрической проницаемости на поверхности, и отражаются между сторонами диэлектрического сплошного цилиндра 6 и экранирующим цилиндром. Микроволны образуют стоячие волны. Керамика или сапфир имеют низкий коэффициент рассеивания. Металлодиэлектрический резонатор работает также, что и неферромагнитные объемные резонаторы, но радиоволны отражаются большим изменением диэлектрической проницаемости, а не проводимостью неферромагнитного материала резонатора, где поверхность становится отражателями, но с потерями (скин-слоем). Отражающей поверхностью является граница раздела сырья с диэлектрической проницаемостью больше единицы и воздуха. *Преимущества.* Из-за малого значения тангенса угла диэлектрических потерь диэлектрика такие резонаторы обладают высокой собственной добротностью и малыми потерями, чем неферромагнитные резонаторы, и выдерживают высокие механические нагрузки. При использовании внутри цилиндрического резонатора с криволинейной боковой поверхностью *керамического цилиндра* также с криволинейной поверхностью образуется *металлодиэлектрический* резонатор, где радиоволны отражаются, и происходит суперпозиция электромагнитных полей.

7. СВЧ-размораживатель с состыкованными вершинами конических резонаторов для размораживания мороженого без пластиковой бутылки (пат. № 2775137) (рисунки 13) содержит два состыкованных вершинами усеченных конических резонатора 1, 7. На основаниях усеченных резонаторов по периметру со сдвигом на 120 градусов установлены магнетроны 4, 12. Внутри верхнего резонатора с соприкосновением на опорные ролики 13 соосно установлен ди-

электрический контейнер 2 на диэлектрическом валу 5. Диэлектрический контейнер выполнен в виде соосно расположенных усеченных конусов без оснований, где кольцевое пространство разделено на отсеки 3. К внутренней поверхности нижнего резонатора прикреплена диэлектрическая направляющая 8 в виде усеченного конуса без оснований, вершиной вниз. Под ним расположена диэлектрическая коническая направляющая 9 без основания, вершиной вверх. Под ней к резонатору прикреплен диэлектрический конический накопитель 10 с шаровым краном 11. На основании верхнего усеченного конического резонатора 1 предусмотрен запердельный волновод 15, наклоненный в соответствии с углом наклона отсеков. Конструктивные размеры усеченных конических резонаторов согласованы с длиной волны, а их вершины усечены диаметром не более четверти длины волны. *Преимущества.* Возможность обеспечения высокой напряженности ЭП, равномерного нагрева сырья в обоих резонаторах. *Недостаток.* Запердельный волновод длинный. Следует освободить замороженное сырье от пластиковой бутылки.

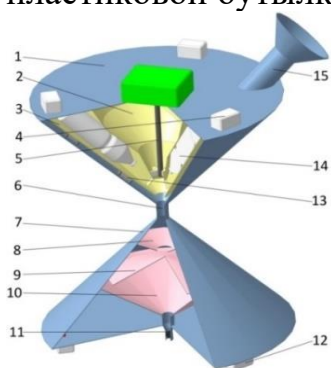


Рисунок 13 – СВЧ-размораживатель с коническими резонаторами: 1 – резонатор; 2 – диэлектрический контейнер с отсеками 3, образованными между двумя соосно расположенными усеченными конусами; 4, 12 – магнетроны; 5 – диэлектрический вал; 6 – муфта, 7 – нижний усеченный конический резонатор, 8 – диэлектрическая направляющая; 9 – диэлектрическая коническая направляющая; 10 – диэлектрический конический накопитель; 11 – шаровой кран; 13 – опорные ролики; 14 – замороженное сырье без пластиковой бутылки, 15 – запердельный волновод

8. СВЧ-размораживатель с полусферическими резонаторами для размораживания молозива без пластиковой бутылки (пат. 2779598) содержит полусферические резонаторы 1, 9 с общим перфорированным вибрирующим основанием в горизонтальной плоскости (рисунок 14). Внутри верхнего резонатора, под измельчающим механизмом 2, 4, состыкованным с резонатором и расположенным с наружной стороны, установлен высокоскоростной электроприводной диэлектрический диск 5 с радиально расположенными острыми ребрами. Под перфорированным основанием расположен вибратор 12.

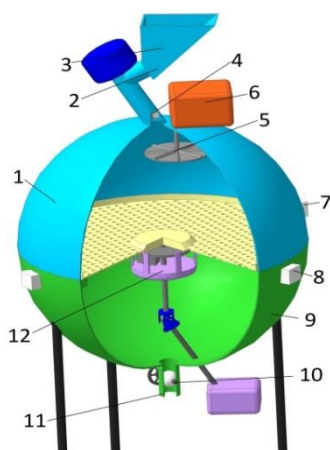


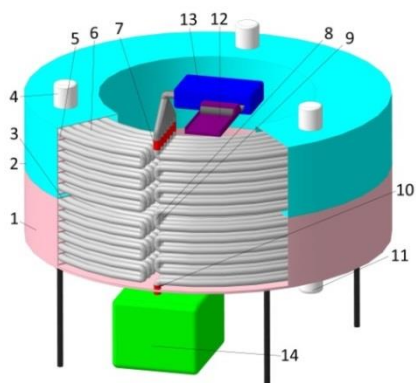
Рисунок 14 – СВЧ-размораживатель с полусферическими резонаторами: 1 – верхний полусферический резонатор; 2 – измельчитель с загрузочной емкостью 3 и шнеком 4; 5, 6 – электроприводной диэлектрический диск; 7, 8 – магнетроны с волноводами; 9 – нижний полусферический резонатор; 10 – шаровой кран; 11 – запердельный волновод; 12 – вибратор диэлектрический

Рисунок 14 – СВЧ-размораживатель с полусферическими резонаторами: 1 – верхний полусферический резонатор; 2 – измельчитель с загрузочной емкостью 3 и шнеком 4; 5, 6 – электроприводной диэлектрический диск; 7, 8 – магнетроны с волноводами; 9 – нижний полусферический резонатор; 10 – шаровой кран; 11 – запердельный волновод; 12 – вибратор диэлектрический

Внизу нижнего резонатора 9 установлен запердельный волновод 11. Магнетроны 7, 8 с волноводом расположены по периметрам обоих резонаторов со сдвигом на 120 градусов. Загрузочная емкость 3 пристыкована к измельчающему механизму.

Преимущества. Высокая собственная добротность, возможность ускорения процесса дефростации молозива за счет уменьшения размеров частиц сырья. *Недостаток.* Не совершенен вибратор для размещения под перфорированным основанием.

9. СВЧ-размораживатель со сдвоенными коаксиальными резонаторами для размораживания измельченного сырья (пат. 2777113) (рисунок 15) представлен двумя состыкованными коаксиальными резонаторами 1, 2 с прямоугольными сечениями и с общим основанием 3. В кольцевом пространстве имеются диэлектрические кольцевые перегородки 5, расположенные поярусно, где расположен молокопровод 6, свернутый в кольцо и фиксированный к перегородке. Продолжение молокопровода проложено через перегородку на последующие ярусы. Через запердельные волноводы проложены молокопроводы для подачи измельченного замороженного молозива в верхний коаксиальный резонатор 2, и слива разогретого молозива из нижнего коаксиального резонатора 1, соответственно. В каждом молокопроводе 6, на выходе из верхнего резонатора,



имеются ферромагнитные сетки 8 в диэлектрических втулках 9, ограничивающих излучение из верхнего резонатора в нижний резонатор, и фильтрующие льдо-водяную смесь. Молокопровод сечением менее двух глубин проникновения волны.

Преимущества. Ускорение процесса дефростации за счет перекачивания измельченного сырья по молокопроводу сечением менее глубины проникновения волны с помощью насоса.

Рисунок 15 – СВЧ-размораживатель со сдвоенными коаксиальными резонаторами:

1, 2 – нижний и верхний коаксиальные резонаторы; 3 – общее основание резонаторов; 4 – магнетроны на верхнем резонаторе; 5 – диэлектрические кольцевые перегородки; 6 – молокопровод; 7 – запердельный волновод на верхнем резонаторе; 8 – ферромагнитная сетка; 9 – диэлектрическая втулка; 10 – запердельный волновод на нижнем резонаторе; 11 – магнетроны на нижнем резонаторе; 12 – измельчитель; 13 – насос вязкой жидкости; 14 – емкость для приема

10. СВЧ-размораживатель с соосно состыкованными цилиндрическим и коаксиальным резонаторами для размораживания замороженных брикетов молозива (пат. 2780835) (рисунок 16) содержит соосно расположенные в коаксиальном ферромагнитном резонаторе 6 перфорированный ферромагнитный цилиндрический резонатор 3 и молотковую дробилку. Молотковая дробилка представлена из поярусно расположенных двояковыпуклых керамических дисков 4 на диэлектрическом валу 9, и диэлектрическими молотками 5, закрепленными шарнирно. Нижнее кольцевое основание 7 коаксиального резонатора 6 перфорировано, а под ним установлена ферромагнитная коническая приемная емкость 10 с шаровым краном 11, а ферромагнитная загрузочная емкость 13 с заслонкой пристыкована к верхнему основанию цилиндрического резонатора 3. Магнетроны 1, 12 прикреплены через волноводы к поверхностям обоих резонаторов 3, 6 со сдвигом на 120 градусов.

Преимущества. Снижение продолжительности дефростации за счет измельчения замороженных брикетов молозива. Двояковыпуклые керамические диски концентрируют энергию ЭМИ в сырье. *Недостаток.* Энергозатраты увеличиваются за счет мощности электропривода молотковой дробилки.

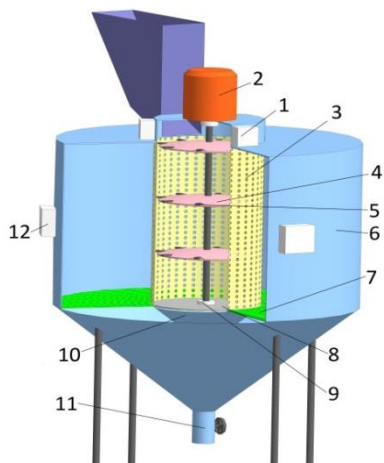


Рисунок 16 – СВЧ-размораживатель с соосно состыкованными цилиндрическим и коаксиальным резонаторами:
1, 12 – магнетроны на поверхностях резонаторов;
2 – электропривод молотковой дробилки;
3 – перфорированный цилиндрический резонатор;
4 – двояковыпуклые керамические диски; 5 – диэлектрические молотки; 6 – коаксиальный резонатор; 7 – кольцевое основание; 9 – диэлектрический вал; 10 – коническая приемная емкость; 11 – шаровой кран; 13 – загрузочная емкость с заслонкой

11. СВЧ-размораживатель с взаимосвязанными тороидальным и цилиндрическим резонаторами (замороженное молозиво без пластиковых бутылок) (заявка № 2023109489). Он (рисунок 17) содержит перевернутый тороидальный резонатор 1, представленный в виде коаксиально расположенных цилиндров разной высоты с общим нижним неферромагнитным основанием 10, образуя тороидальную 2 и конденсаторную 5 части резонатора. Верхнее основание 3 внутреннего цилиндра 11 перфорировано и к нему прикреплена керамическая стационарная обечайка 4 в виде усеченного конуса. Конденсаторную часть размещен электроприводной перфорированный диэлектрический секционный диск 6. Малая продолжительность перехода из замороженного состояния в жидкое обеспечивает высокое качество продукта с сохранением кормовой ценности.

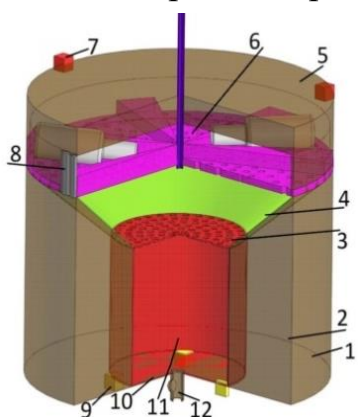


Рисунок 17 – СВЧ-размораживатель с взаимосвязанными тороидальным и цилиндрическим резонаторами: 1 – тороидальный резонатор; 2 – тороидальную часть резонатора; 3 – перфорированное основание; 4 – керамическая обечайка; 5 – конденсаторную часть резонатора; 6 – электроприводной диэлектрический перфорированный секционный диск; 7, 9 – магнетроны; 8 – окно для загрузки сырья, закрытое алюминиевой шторой; 10 – неферромагнитное основание; 11 – цилиндрический резонатор; 12 – патрубок с шаровым краном

12. Размораживатель молозива животных непрерывно-поточного действия с СВЧ энергоподводом в коаксиальный резонатор (заявка № 2023114576). В экранирующем цилиндрическом корпусе соосно установлен перфорированный квазикоаксиальный резонатор, внутренний цилиндр которого заменен неферромагнитным стационарным винтовым шнеком, корпус которого из радиопрозрачного материала вращается вместе с наружным перфорированным цилиндром. Это обеспечивает интенсификацию размораживания при нахождении замороженных частиц сырья во взвешенном состоянии за счет центробежной силы.

Проведено сравнение пяти основных СВЧ-размораживателей с разными конструктивными исполнениями резонаторов, такими как с коническими (№ 4), коаксиальный с коническим резонатором (№ 7), со сдвоенными коаксиальными резонаторами (№ 8), с полусферическими резонаторами (№ 9), с точки зрения продолжительности дефростации и разогрева молозива (рисунок 18).

Оценка отклонения от среднего значения интервалов варьирования критериев, характеризующих параметры резонаторов, показывает, что наименьшее от-

клонение (0,052; 0,077; 0,12) от среднего значения по пяти критериям (собственная добротность, напряженность ЭП, плотность потока энергии (ППЭ), равномерность дефростации молозива, металлоемкость) имеют размораживатели: № 4, 7, 6. Оценка продолжительности процесса и энергетических затрат показывает, что наименьшим отклонением (0,052...0,092) обладают СВЧ-размораживатели: № 10, 7, 8, 9, а значит они будут перспективными для фермерских хозяйств.

СВЧ-установка для дефростации и разогрева молозива животных с результатами исследования ЭД параметров (номера установок из рисунка 6)	
<p>Пат. 2775137</p> <p>4. Состыкованные конические резонаторы: производительность 25-30 кг/ч, продолжительность дефростации и разогрева 25 мин., ППЭ = 50 мкВт/см², удельные энергетические затраты (Э) на процесс 0,176-0,212 кВт·ч/кг.</p>	
<p>Пат. 2761810</p> <p>7. Коаксиальный резонатор, состыкованный с коническим резонатором: производительность установки 25-30 кг/ч, продолжительность дефростации и разогрева 26 мин., ППЭ = 50 мкВт/см², Э = 0,176-0,212 кВт·ч/кг.</p>	
<p>Пат. 2777113</p> <p>8. Сдвоенные коаксиальные резонаторы: производительность 30-35 кг/ч, продолжительность дефростации и разогрева 21 мин., ППЭ = 10 мкВт/см², Э = 0,174-0,204 кВт·ч/кг.</p>	
<p>Пат. 2779598</p> <p>9. Полусферические резонаторы: производительность установки 35-40 кг/ч, продолжительность дефростации и разогрева 19 мин., ППЭ = 10 мкВт/см², Э = 0,153-0,174 кВт·ч/кг.</p>	
<p>Пат. 2780835</p> <p>10. Состыкованные коаксиальный и цилиндрический резонаторы: производительность установки 35-38 кг/ч, продолжительность дефростации и разогрева 18 мин., ППЭ = 10 мкВт/см², Э = 0,154-0,175 кВт·ч/кг.</p>	

Рисунок 18 – Сводная таблица СВЧ-размораживателей для оценки эффективной конструкции резонаторов

Месторасположение СВЧ-размораживателя молока в машинно-аппаратной схеме подготовки молозива к выпойке телятам приведено на рисунке 19. После отела коров выдаивают молозиво с помощью доильного аппарата в отдельную флягу, переливают в стерильную емкость, откуда разливают в емкости для выпойки телят, а остальное молозиво размещают в пластиковых бутылках (1...1,5 л) в морозильную камеру. По мере потребности размораживают.



Рисунок 19 – Машинно-аппаратная схема подготовки молозива к выпойке телятам на ферме КРС ООО «АП Княгининское», Нижегородская область

В четвертом разделе «Экспериментальные исследования процессов дефростации и разогрева молозива животных воздействием ЭМП СВЧ» приведены регрессионные модели и обоснованные эффективные режимы дефростации и разогрева молозива животных. Дефростация молозива происходит в пластиковых бутылках (рисунок 20) в СВЧ-размораживателе с коаксиальным и коническим резонаторами (рисунок 21), его технические характеристики – в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики СВЧ-размораживателя

Производительность, кг/ч	25...30
Потребляемая мощность СВЧ-размораживателя, кВт	5,14
Мощность электродвигателя вентилятора, кВт	0,16
Мощность привода дизлектрического контейнера, кВт	0,18
Потребляемая мощность шести СВЧ-генераторов, кВт	4,8
Удельная мощность генератора, Вт/г	0,8
Энергетические затраты, кВт·ч/кг	0,18...0,2

Пользуясь программой Statistic12, получены трехмерные изображения поверхностей откликов в зависимости от режимов **разогрева** сырья, а именно, зависимость производительности размораживателя (Q), энергетических затрат (W), температуры нагрева сырья (T), общего микробного числа (ОМЧ) от удельной мощности генератора (x_1), продолжительности воздействия ЭМП СВЧ (x_2) и мощности генераторов (x_3) (формулы 18). Двумерные сечения в изолиниях и поверхности откликов трехфакторных моделей энергетических затрат, температуры разогрева и производительности СВЧ-размораживателя приведены на рисунке 22.



Рисунок 20 – Виды и формы замороженного молозива

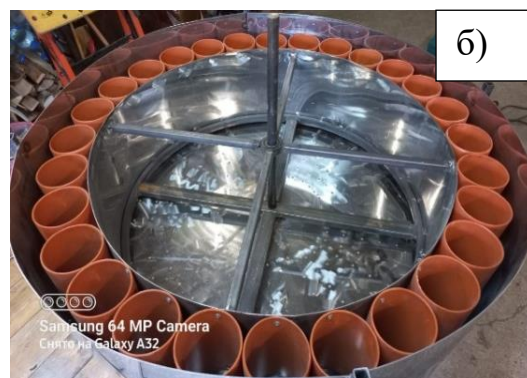
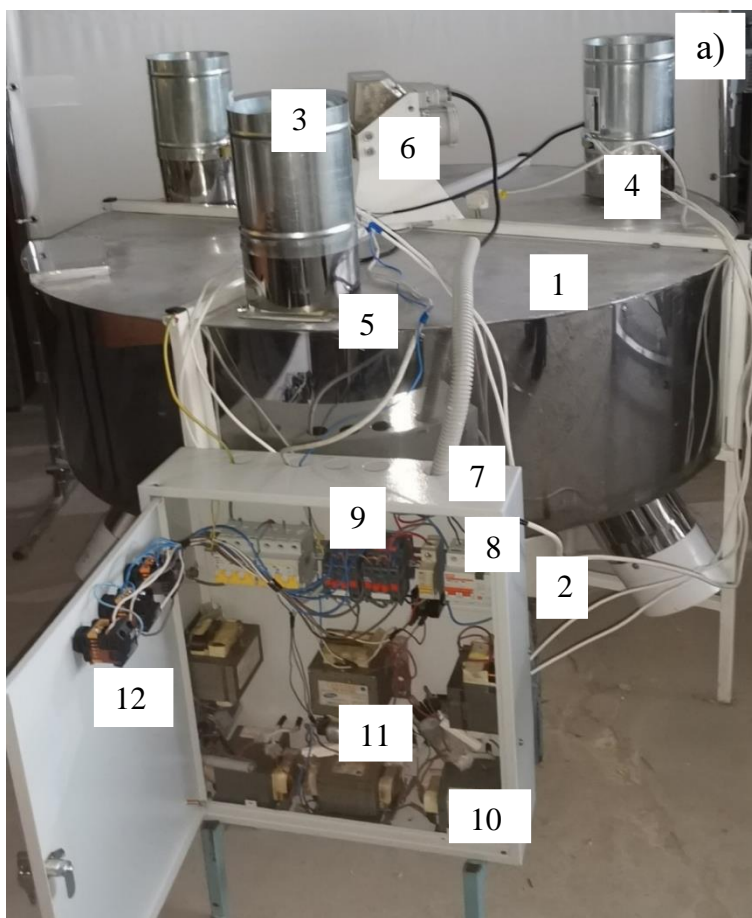
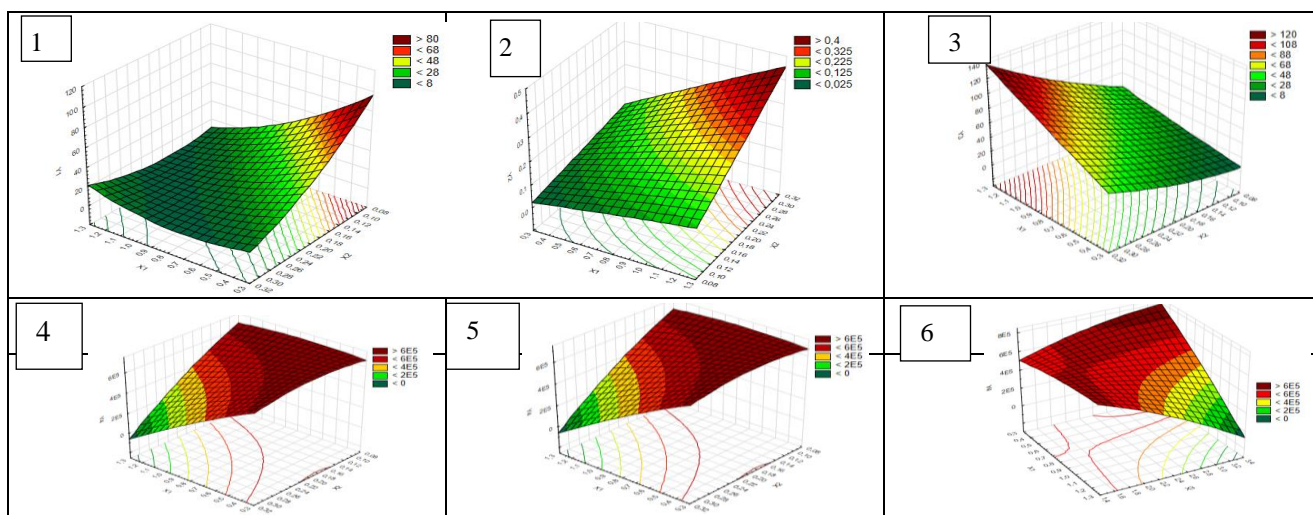


Рисунок 21 – Изготовленный СВЧ-размораживатель для дефростации и разогрева молозива животных:
а) размораживатель; б) передвижные контейнеры; 1 – коаксиальный резонатор; 2 – конический резонатор; 3 – вентиляторы; 4 – магнетроны; 5 – волноводы; 6 – мотор-редуктор; 7 – шкаф управления; 8 – автоматические выключатели; 9 – магнитные пускатели; 10 – высоковольтные трансформаторы; 11 – конденсаторы; 12 – кнопки «Пуск» и «Стоп»



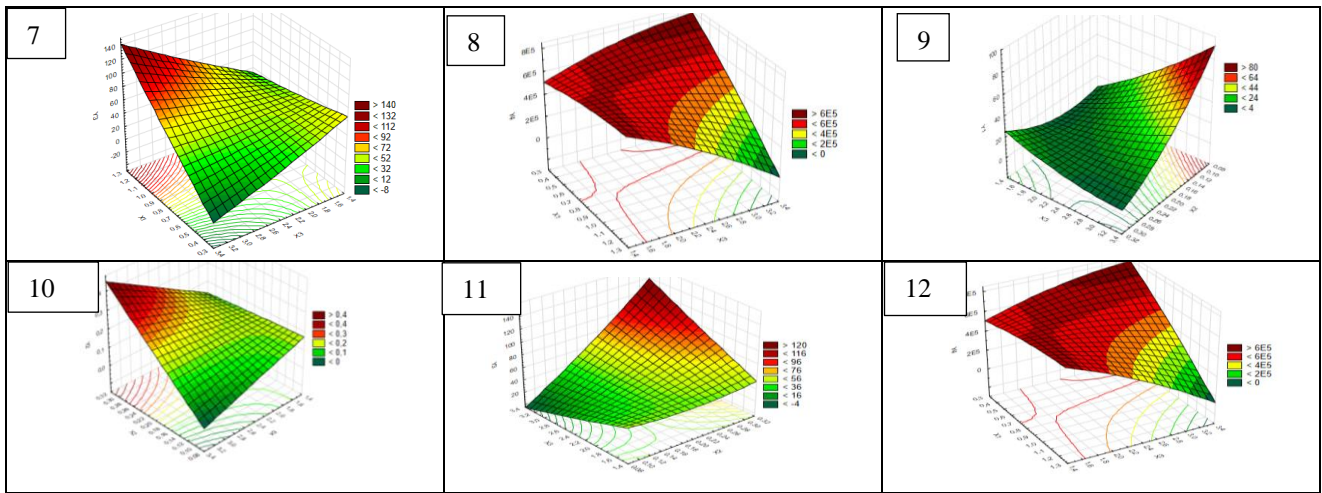


Рисунок 22 – Двумерные сечения в изолиниях и поверхности откликов трехфакторных моделей

при $x_1 = 2,4$ кВт

$$1) Q = 193,53 - 186,23 \cdot x_2 - 744,91 \cdot x_3 + 44 \cdot x_2^2 + 389,38 \cdot x_2 \cdot x_3 + 703,95 \cdot x_3^2$$

$$2) W = -0,019 + 0,036 \cdot x_2 + 0,104 \cdot x_3 - 0,011x_2^2 + 0,99 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,036 \cdot x_3^2$$

$$3) T = 3,09E-12 + 9,06 \cdot x_2 - 60,44 \cdot x_3 + 3,4539 \cdot x_2^2 + 225 \cdot x_2 \cdot x_3 + 455,2632 \cdot x_3^2$$

$$4) \text{ОМЧ} = 4,73E5 + 3,87E5 \cdot x_2 + 2,21E6 \cdot x_3 - 1,0362E5 \cdot x_2^2 - 2,875E6 \cdot x_2 \cdot x_3 - 3,6579E6 \cdot x_3^2$$

при $x_2 = 0,2$ ч

$$5) Q = -6,47 + 14,43 \cdot x_1 + 36,31 \cdot x_3 + 50,58 \cdot x_1^2 - 55,55 \cdot x_1 \cdot x_3 + 4,83 \cdot x_3^2$$

$$6) W = 0,49 - 0,45 \cdot x_1 - 0,2 \cdot x_3 - 0,012 \cdot x_1^2 + 0,28 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,001 \cdot x_3^2$$

$$7) T = 188,28 - 178,31 \cdot x_1 - 80,92 \cdot x_3 + 8,06 \cdot x_1^2 + 93,75 \cdot x_1 \cdot x_3 + 2,8 \cdot x_3^2$$

$$8) \text{ОМЧ} = -2,5E5 + 1,06E6 \cdot x_1 + 5,45E5 \cdot x_3 - 1,1E5 \cdot x_1^2 - 5,16E5 \cdot x_1 \cdot x_3 - 50986,84 \cdot x_3^2$$

при $x_3 = 0,8$ Вт/г

$$9) Q = -36,47 + 57,73 \cdot x_1 + 36,31 \cdot x_2 + 809,21 \cdot x_1^2 - 222,19 \cdot x_1 \cdot x_2 + 4,83 \cdot x_2^2$$

$$10) W = 0,44 - 1,65 \cdot x_1 - 0,1843x_2 - 0,0166 \cdot x_1^2 + 1,0687 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0003 \cdot x_2^2$$

$$11) T = 143,40 - 596,23 \cdot x_1 - 59,61 \cdot x_2 + 444,737 \cdot x_1^2 + 300 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,48 \cdot x_2^2$$

$$12) \text{ОМЧ} = -2,12E5 + 4,59E6 \cdot x_1 + 5E5 \cdot x_2 - 3,34E6 \cdot x_1^2 - 2E6 \cdot x_1 \cdot x_2 - 44407,9 \cdot x_2^2. \quad (18)$$

Результаты анализа регрессионных моделей и испытание СВЧ-размораживателя в условиях фермерских хозяйств (рисунок 23) показали, что эффективные режимы **размораживания** коровьего молозива от -4 до 1 °С в коаксиальном резонаторе следующие: удельная мощность СВЧ генератора – $0,8$ Вт/г; продолжительность воздействия ЭМПСВЧ – $17,7$ мин.; мощность СВЧ генераторов – $2,4$ кВт; напряженность ЭП – $1,2$ кВ/см.

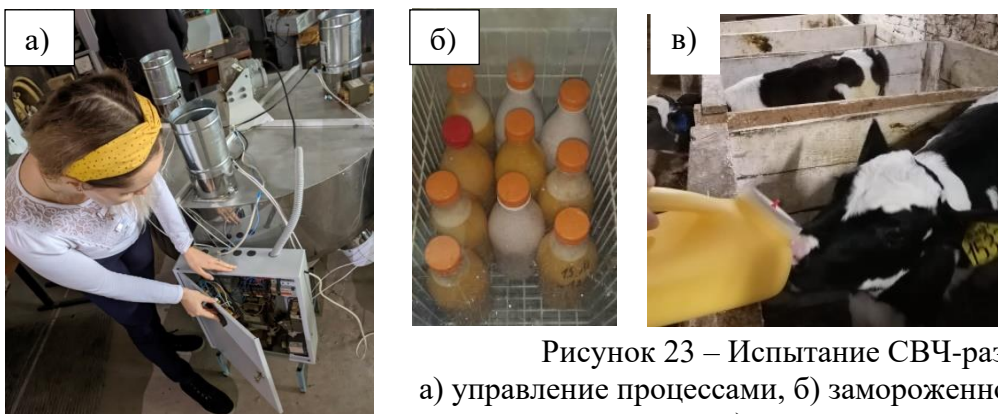


Рисунок 23 – Испытание СВЧ-размораживателя:
а) управление процессами, б) замороженное в бутылках молозиво,
в) выпаивание теленка

Эффективные режимы *разогрева* коровьего молозива от 1 до 39 °С в ЭМПСВЧ, следующие: удельная мощность СВЧ генератора – 0,8 Вт/г; продолжительность воздействия в коническом резонаторе – 8 мин.; мощность СВЧ генераторов – 2,4 кВт; напряженность ЭП 3,8 кВ/см.

Динамика нагрева *замороженного и размороженного молозива*, при удельной мощности генератора 0,8 Вт/г, приведена на рисунке 24. Результаты экспериментальных исследований подтверждают теоретические предположения о том, что при разогреве молозива от 0 до 39 °С скорость нагрева жидкого сырья с увеличением температуры уменьшается.

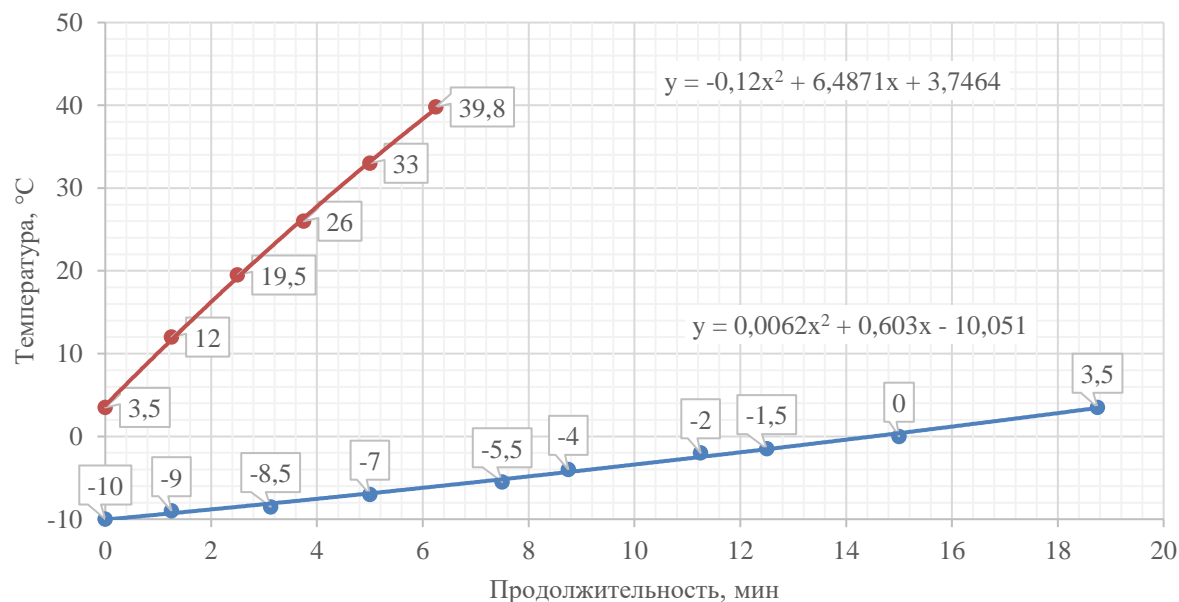


Рисунок 24 – Динамика нагрева *замороженного и размороженного молозива*, при удельной мощности генератора 0,8 Вт/г

Проведенные исследования органолептических, биохимических, физико-химических показателей молозива коровьего и козьего (с помощью приборов «Клевер-2 М», рН-метр-термометр «Нитрон-рН», колострометр (таблица 4), микробиологические исследования (с помощью рН-метра рН-150МИ, рефрактометра ИРФ-454Б) (рисунок 25) в научно-исследовательской лаборатории по технологии молока и молочных продуктов ФГБОУ ВО «Чувашский ГАУ» 24.11.2021 г. подтверждают, что показатели качества молозива животных контрольного и проектного образцов сохранены и соответствуют нормативным документам.

Проведенные исследования микробиологических показателей молозива коровьего и козьего после обработки в ЭМПСВЧ (с помощью гигрометра психрометрического «ВИТ-2») в лицензированном испытательном лабораторном центре ФГБОУ ВО «Чувашский ГАУ» (№ 301-308 от 29.10.2021 г., № 355-358 от 13.12.2021 г.) показывают, что патогенные микроорганизмы не обнаружены, КМАФАиМ – ниже ПДУ (таблица 5).

Таблица 4 – Результаты биохимических, физико-химических исследований после дефростации и разогрева в базовом и разработанном СВЧ-размораживателе

Исследуемые показатели	Молозиво <i>коровье</i>			Молозиво <i>козье</i>		
	до замораживания (свежевыдоенное молоко в первые 6 ч.)	дефростация и разогрев в базовом размораживателе	дефростация и разогрев в ЭМП-СВЧ	до замораживания (свежевыдоенное молоко в первые 6 ч.)	дефростация и разогрев в базовом размораживателе	дефростация и разогрев в ЭМП-СВЧ
М.д. (массовая доля) жира, %	3,85	3,85	3,78	3,85	3,68	3,85
М.д. белка, %	5,473	4,983	5,473	3,73	3,71	3,73
Плотность, кг/м ³	1051,25	1051,23	1055,11	1051,38	1051,27	1051,36
СОМО (сухой обезжиренный остаток молока), %	15,1	13,5	14,82	9,15	9,13	9,15
СМО (сухой молочный остаток), %	15,76	14,76	15,60	13,06	13,07	13,06
СГ (степень гомогенизации), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
М.д. лактозы, %	8,1	7,35	8,08	4,60	4,60	4,60
М.д. соли, %	1,26	1,16	1,273	0,79	0,79	0,79
Температура, °С (при исследовании)	30	25,38	25,89	25,35	23,08	25,35
Температура замерзания, °С	-0,42	-0,402	-0,47	-0,55	-0,5517	-0,552
Активная кислотность (рН)	6,21	6,23	6,23	6,71	6,70	6,71
Кислотность, °Т	25,1	25,63	25,89	16,34	16,59	16,34

Таблица 5 – Результаты микробиологического исследования молозива животных после дефростации и разогрева в разработанном размораживателе

Определяемые показатели	Единицы измерения	Результаты испытаний		ПДУ	Нормативный документ
		коровье молоко	козье молоко		
КМАФАиМ	КОЕ/см ³	1,7x10 ⁴	1,2x10 ⁴	5x10 ⁵	ГОСТ 32901-2014
Патогенные микроорганизмы	г	не обнаружено			ГОСТ 31659-2012

Определено содержание иммуноглобулинов в молозиве коровьем и козьем от температуры при дефростации и разогреве в разработанном размораживателе (рисунок 25). Содержание иммуноглобулинов в молозиве коровьем после дефростации и разогрева в ЭМПСВЧ подтверждает хорошее качество молозива (норма иммуноглобулинов по шкале Брикса – выше 50 г/л): черно-пестрой породы 30 % по шкале Brix (соответствует 57 г/л IgG); айрширской породы – 41 % Brix (77,9 г/л IgG); голштинской породы – 28 % Brix (53,2 г/л IgG); в молозиве козьем – 34 % Brix (64,6 г/л IgG).

Исследования показывают, что содержание иммуноглобулинов в молозиве животных после обработки в ЭМПСВЧ в среднем снизилось на 2 % Brix (3,8 г/л IgG). Показатели качества молозива животных проектного образца сохранены и соответствуют нормативным документам, следовательно, кормовая ценность молозива животных сохраняется.

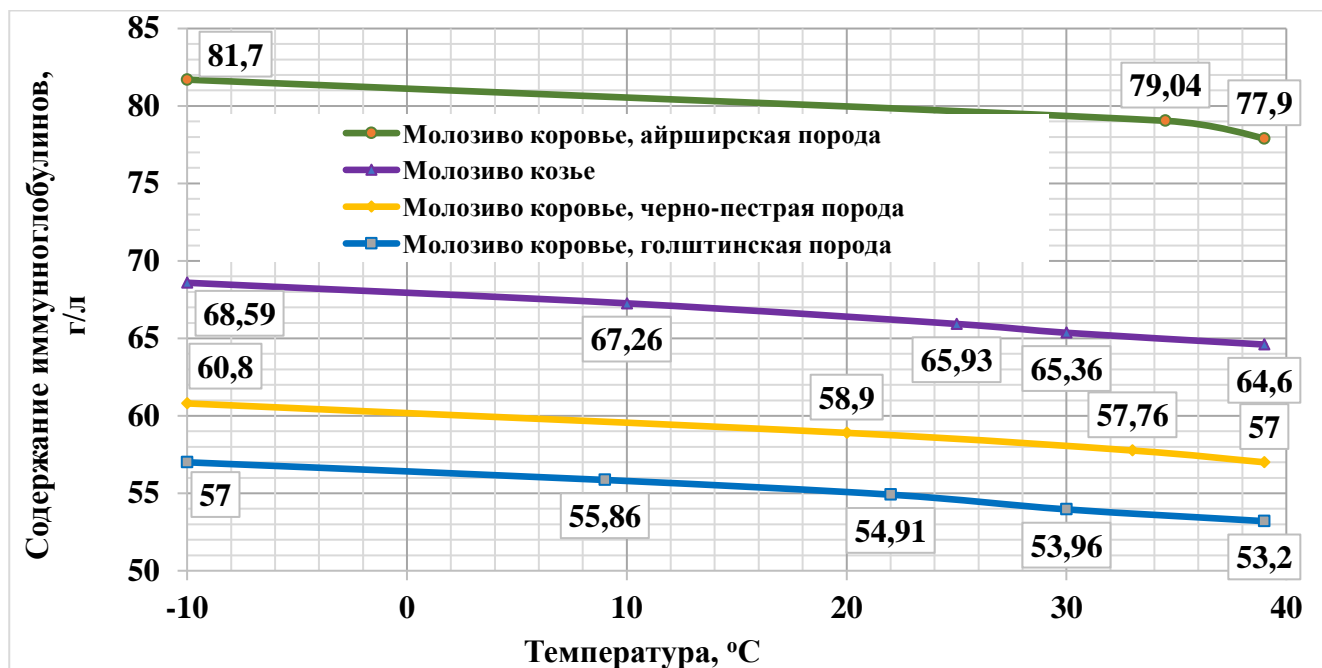


Рисунок 25 – Изменение содержания иммуноглобулинов (г/л) в молозиве животных при дефростации и разогреве воздействием ЭМП СВЧ

Пятый раздел «Технико-экономическая оценка внедрения СВЧ-размораживателя для дефростации и разогрева молозива животных» содержит результаты экономической оценки применения опытного образца размораживателя. Ожидаемый годовой экономический эффект от применения СВЧ-размораживателя по сравнению с наиболее применяемыми размораживателями разного конструктивного исполнения, работающими на принципе пароводяной смеси, составляет 323,35 тыс. руб., за счет снижения эксплуатационных расходов. Рентабельность повышается на 5 %, срок окупаемости равен 4 месяцам.

Перспективы дальнейшей разработки сводится к созданию радиогерметичного многогенераторного СВЧ-размораживателя непрерывно-поточного действия резонаторами с системой автоматического управления процессом дефростации и разогрева молозива животных для ферм с поголовьем дойных коров свыше 500 голов, позволяющего ускорить технологический процесс, обеззараживать и сохранить кормовую ценность сырья при сниженных эксплуатационных затратах. С точки зрения конструктивного исполнения размораживателя для тепловой обработки сырья перспективным является металлодиэлектрические резонаторы, обеспечивающие равномерное распределение электромагнитного поля и снижение диэлектрических потерь.

Рекомендации производству: с целью обеспечения электромагнитной безопасности рекомендуется эксплуатировать СВЧ-размораживатель в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности для человека» (Постановление от 28.01.2021, № 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны методологические основы конструктивно-технологического проектирования и создания радиогерметичного СВЧ-размораживателя непрерывно-поточного действия с резонаторами, разделяю-

щими процессы дефростации и разогрева сырья при изменении агрегатного состояния для сохранения его кормовой ценности.

2. Предложена усовершенствованная технология дефростации и разогрева сырья воздействием ЭМП СВЧ с учетом фазового перехода в двухрезонаторных СВЧ-размораживателях с рациональными конструктивно-технологическими параметрами. Результаты анализа диэлектрических параметров молозива коровьего в зависимости от температуры свидетельствуют, что процессы его дефростации и разогрева должны происходить в разных объемных резонаторах при разных дозах воздействия ЭМП СВЧ. При этом глубина проникновения волны в замороженное сырье с увеличением температуры от -12 до 0 °С растет с $0,14$ см до $0,93$ см, а при разогреве молозива с 0 до 39 °С – растет с $1,01$ см до $2,17$ см. Сырье равномерно нагревается, если его размеры не превышают глубины проникновения волны.

3. Получены аналитические зависимости, описывающие распределение температурного поля в сырье при разных агрегатных состояниях и распределение волн на границе раздела между замороженным и жидким сырьем для определения продолжительности его дефростации и разогрева. Предложенная модель процесса взаимодействия электромагнитных волн с сырьем при разных агрегатных состояниях, описывающая электромагнитные и тепловые процессы в тороидальных резонаторах с общим перфорированным основанием, учитывает зависимость электрофизических параметров сырья от температуры. Определение температурного поля через систему уравнений теплопроводности с учетом температуры фазового перехода и скорости движения границы фазового перехода показывает, что распределение температурного поля в сырье происходит в соответствии с функцией плотности мощности тепловых потерь. Исследования распределения волн на границе раздела между замороженным и жидким сырьем показывают, что скорость нагрева в процессе дефростации сырья увеличивается, а для разогрева сырья с 0 до 39 °С с учетом уменьшения скорости нагрева, следует обеспечить в резонаторе напряженность ЭП не менее $1,2$ кВ/см.

Коэффициент отражения волн, позволяющий оценить отношение потока отраженной энергии к падающему потоку энергии на границе раздела сред при уменьшении диэлектрической проницаемости с 53 до 44 , уменьшается в пределах 10 раз, с $0,47$ до $0,047$. Следовательно, при температуре фазового превращения в сырье генерируется мощность 1300 Вт, если мощность генератора 2400 Вт.

4. Разработаны конструктивно-технологические схемы СВЧ-размораживателей непрерывно-поточного действия со сдвоенными резонаторами для отдельной тепловой обработки молозива животных в разных дозах в зависимости от агрегатного состояния, и обоснованы конфигурации резонаторов путем исследования их электродинамических параметров по программе CST Studio Suite и оценки отклонения от среднего значения критериев проектирования. Напряженность ЭП в разработанных резонаторах колеблется в пределах $0,6...3,8$ кВ/см, в том числе в конденсаторной зоне четвертьволнового тороидального резонатора и вдоль оси конического резонатора. Собственная добротность при равных объемах резонаторов составляет $4000...8000$. Плотность энергии электромагнитных волн при напряженности ЭП в резонаторе $0,2$ кВ/см составляет 10^6 Вт/м², если напряженность ЭП $0,6$ кВ/см – то $9 \cdot 10^6$ Вт/м². Пороговая

мощность с учетом коэффициента затухания волны в сырье при изменении диэлектрических параметров жидкого молозива в процессе нагрева, позволяющая оценить эффективность обеззараживания сырья, равна 6,85 кВт при напряженности ЭП 0,6 кВ/см и собственной добротности резонатора не менее 3100. При увеличении собственной добротности в два раза можно при мощности 3 кВт и напряженности ЭП 0,6 кВ/см получить такой же эффект обеззараживания сырья.

Для ускорения дефростации и размораживания молозива животных предусмотрены в процессе воздействия ЭМП СВЧ: дробление замороженных брикетов с помощью центробежного диска в полусферическом резонаторе, обладающем максимальной собственной добротностью 9000; перекачивание измельченного сырья с помощью насоса вязкой жидкости по молокопроводу в коаксиальном резонаторе; дробление брикетов с помощью молотковой дробилки в цилиндрическом резонаторе, соосно расположенном в коаксиальном резонаторе с собственной добротностью 6500 и напряженностью ЭП до 3 кВ/см.

Для достижения высокой скорости нагрева сырья в области положительных температур в коническом резонаторе обеспечена напряженность ЭП (1,2...2 кВ/см) и условие нагрева жидкости тонким слоем, не более двух глубин проникновения волны с помощью соосно расположенных радиопрозрачных тарелок.

Для резкого увеличения собственной добротности разработан *металлодиэлектрический* резонатор с керамическим сплошным цилиндром с криволинейной поверхностью, и оценена возможность обеззараживания жидкого сырья в резонаторе с собственной добротностью 7000 при напряженности ЭП 0,6 кВ/см и мощности генератора 3 кВт.

Оценка отклонения от значения критериев, характеризующих *продолжительность процесса и энергетические затраты*, показывает, что наименьшее отклонение (0,052...0,092) от оптимального значения имеют размораживатели: с состыкованными коаксиальным и цилиндрическим резонаторами; со сдвоенными коаксиальными резонаторами и насосом; с полусферическими резонаторами и диском.

5. Обоснованы параметры и режимы работы двухрезонаторного СВЧ-размораживателя с учетом регрессионных моделей и результатов исследований органолептических, биохимических, физико-химических, микробиологических показателей молозива животных, характеризующих кормовую ценность. Содержание иммуноглобулинов IgG в молозиве животных после дефростации и разогрева в ЭМП СВЧ составило 28...41 % по шкале Вгix, в среднем снизилось на 2 % Вгix (3,8 г/л). Показатели качества молозива животных проектного образца сохранены (ОМЧ менее 500 тыс. КОЕ/г) и соответствуют нормативным документам.

Эффективные режимы *дефростации* молозива от -4 до 1 °С в ЭМП СВЧ: удельная мощность СВЧ генератора – 0,8 Вт/г; продолжительность воздействия ЭМП СВЧ в коаксиальном резонаторе – 17,7 мин.; мощность СВЧ генераторов – 2,4 кВт; напряженность – ЭП 1,2 кВ/см. Эффективные режимы *разогрева* молозива от 1 до 39 °С в ЭМП СВЧ: удельная мощность СВЧ генератора – 0,8 Вт/г; продолжительность воздействия ЭМП СВЧ в коническом резонаторе – 8 мин.; мощность СВЧ генераторов – 2,4 кВт; напряженность ЭП – 3,8 кВ/см.

Производительность СВЧ установки со сдвоенными резонаторами 30 кг/ч, продолжительность воздействия – 25,7 мин., энергетические затраты на дефростацию и разогрев – 0,176 кВт·ч/кг.

6. Разработан, создан и апробирован в производственных условиях многогенераторный СВЧ-размораживатель непрерывно-поточного действия, содержащий коаксиальный резонатор с передвижными диэлектрическими контейнерами, состыкованный с коническим резонатором, и запердельные волноводы.

Ожидаемый годовой экономический эффект от применения СВЧ-размораживателя балансовой стоимостью 120 тыс. руб. по отношению с размораживателями базовых вариантов разного конструктивного исполнения балансовой стоимостью 60-95 тыс. руб., работающими на принципе пароводяной смеси, составляет 323,35 тыс. руб., за счет снижения эксплуатационных расходов.

Основное содержание диссертации опубликовано в 77 работах, в том числе:

– публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Ершова, И. Г.** Технология переработки жиросодержащего сырья / О. В. Михайлова, **И. Г. Ершова**, М. Г. Сорокина // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. – 2013. – № 4. – С. 34-37.
2. **Ершова, И. Г.** Технологический процесс термообработки жиросодержащего сырья и устройство для его осуществления / **И. Г. Ершова**, О. В. Науменко // Естественные и технические науки. – 2014. – № 8. – С. 124-125.
3. Установка для переработки жиросодержащего сырья с СВЧ энергоподводом / **И. Г. Ершова**, М. Г. Сорокина, М. В. Белова, Г. В. Новикова // Известия Оренбургского ГАУ. – 2014. – № 1 (45). – С. 54-56.
4. Определение продолжительности переработки сырья в ЭМПСВЧ / М. В. Белова, Г. В. Новикова, **И. Г. Ершова** [и др.] // Естественные и технические науки. – 2015. – № 6. – С. 510-512.
5. Многорезонаторная установка для плавления жира / А. Г. Самоделкин, Г. В. Новикова, М. В. Белова, **И. Г. Ершова**, [и др.] // Естественные и технические науки. – 2015. – № 6. – С. 492-493.
6. Установка для вытопки жира / Г. В. Новикова, И. М. Селиванов, М. В. Белова, **И. Г. Ершова** [и др.] // Естественные и технические науки. – 2015. – № 6. – С. 485-486.
7. Математическое описание процесса плавления жира в СВЧ установке / Г. В. Новикова, М. В. Белова, **И. Г. Ершова** [и др.] // Естественные и технические науки. – 2015. – № 6. – С. 513-515.
8. Установка для термообработки жиросодержащего сырья в ЭМПСВЧ / Г. В. Новикова, М. В. Белова, О. В. Михайлова, **И. Г. Ершова** [и др.] // Естественные и технические науки. – 2015. – № 1. – С. 129-130.
9. **Ershova I. G.** Heat treatment of fat-containing raw materials with energy of electromagnetic radiation (Термическая обработка жиросодержащего сырья энергией электромагнитного излучения) / **I. G. Ershova**, M. V. Belova, D. V. Poruchikov // International research journal. – 2016. – № 9. – С. 38-40.
10. **Ершова, И. Г.** Результаты исследования кормовой ценности молозива после дефростации эндогенным нагревом / **И. Г. Ершова** // Вестник НГИЭИ. – 2021. – № 12. – С. 50-61.
11. СВЧ-установка с тороидальным резонатором для дефростации молозива животных в непрерывном режиме / **И. Г. Ершова**, О. В. Михайлова, А. А. Тихонов [и др.] // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 10 (137). – С. 81-93.
12. Научно-технические основы разработки установок с СВЧ-энергоподводом для переработки сырья агропредприятий / Г. В. Новикова, В. Ф. Сторчевой, М. В. Просвирякова, **И. Г. Ершова** [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2023. – Т. 70. – № 1(50). – С. 18-27.
13. **Ершова, И. Г.** Алгоритм исследования процессов дефростации и разогрева молозива животных / **И. Г. Ершова** // Вестник НГИЭИ. – 2023. – № 4 (142). – С. 39-54.

14. Обоснование конструкции СВЧ-дефростера молозива животных / **И. Г. Ершова**, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова, В. Ф. Сторчевой // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2023. – № 3 (101). – С. 185-191.
15. **Ершова, И. Г.** Обоснование параметров размораживателя молозива животных с СВЧ энергоподводом в коаксиальный резонатор / **И. Г. Ершова** // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2023. – № 3 (101). – С. 179-184.
16. **Ершова, И. Г.** Способы и СВЧ техника для дефростации и разогрева молозива животных / **И. Г. Ершова** // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 6 (132). – DOI: 10.23670/IRJ.2023.132.94;

– в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных (Scopus):

17. Innovations in technologies of agricultural raw materials processing (Инновации в технологиях сельскохозяйственной обработки сырья) / М. V. Belova, G. V. Novikova, **I. G. Ershova** [et al.] // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Т. 11. – № 6. – P. 1269-1277.
18. Electrotechnology of animal colostrum defrosting in two-resonator microwave installations (Электротехнология размораживания молозива животных в двухрезонаторных микроволновых установках) / М. V. Prosviryakova, G. V. Novikova, **I. G. Ershova** [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – 857(1). – P. 012007.
19. Mathematical model of colostrum defrosting in super-high-frequency generator equipped (Математическая модель дефростации молозива животных в СВЧ установке с квазистационарными тороидальными резонаторами) / **I. G. Ershova**, М. V. Prosviryakova, G. V. Novikova, V. F. Storchevoy [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – 935(1). – P. 012027.
20. Effect of heating of frozen colostrum in two-resonator installation (Обоснование эффекта объемного нагрева замороженного молозива животных в двухрезонаторной установке) / G. V. Novikova, O. V. Mikhailova, **I. G. Ershova** [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Cheboksary. – 2021. – 935(1). – P. 012026.
21. Justification of the parameters of a microwave installation with a metal-dielectric resonator for defrosting and heating of colostrum of animals (Обоснование параметров СВЧ установки с металлодиэлектрическим резонатором для дефростации и разогрева молозива животных) / М. V. Prosviryakova, **I. G. Ershova**, D. V. Poruchikov [et al.] // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – 2022. – 979 (1). – P. 012086;

– в патентах на изобретения РФ:

22. Пат. 2537552 РФ МПК А23J3/12, А22В 5/04. Установка для термообработки крови с/х животных / Белова М. В., Уездный Н. Т., Зиганшин Б. Г., Новикова Г. В., **Ершова И. Г.** [и др.]; патентообладатель ЧГСХА. № 2013137720/13; заявл. 12.08.2013; опубл. 10.01.2015. Бюл. № 1.
23. Пат. 2541694 РФ, МПК С11В1/12. Установка для термообработки жиросодержащего сырья / Белова М. В., Михайлова О. В., Новикова Г. В., **Ершова И. Г.**; патентообладатель ЧГСХА. № 2013145358/13; заявл. 09.10.2013; опубл. 20.02.2015. Бюл. № 5.
24. Пат. 2541634 РФ МПК А23J1/06, А23К 1/04. Способ термообработки крови с/х животных / Белова М. В., Новикова Г. В., Уездный Н. Т., **Ершова И. Г.** [и др.]; патентообладатель ЧГСХА. № 2013146767/13; заявл. 18.10.2013, опубл. 20.02.2015. Бюл. № 5.
25. Пат. 2591126 РФ МПК С11В1/12. Установка для вытопки жира в ЭМПСВЧ / **Ершова И. Г.**, Белова М. В., Новикова Г. В. [и др.]; заявитель и патентообладатель АТУ. № 2015116255/13; заявл. 28.04.2015; опубл. 10.07.2016. Бюл. № 19.
26. Пат. 2600697 РФ МПК А23L5/30. Сверхвысокочастотная установка для плавления жира / **Ершова И. Г.**, Белова М. В., Новикова Г. В. [и др.]; патентообладатель АТУ. № 2015117451/13; заявл. 07.05.2015; опубл. 27.10.2016. Бюл. № 30.
27. Пат. 2581224 РФ, МПК А22С17/00 (2006.01), С11В 1/12 (2006.01). Центробежная установка для термообработки жиросодержащего сырья / Белова М. В., Новикова Г. В., Михайлова О. В., **Ершова И. Г.**; патентообладатель МАДИ. № 2014150840/13; заявл. 15.12.2014; опубл. 20.04.2016. Бюл. № 11.
28. Пат. 2605355 РФ МПК С11В1/12. СВЧ установка для выделения расплавленного жира из жиросодержащего сырья / **Ершова И. Г.**, Белова М. В., Новикова Г. В. [и др.]; патентообладатель

- тель АТУ. № 2015138179/13; заявл. 07.09.2015; опубл. 20.12.2016. Бюл. № 35.
29. Пат. 2626156 РФ, МПК А23N17/00. Радиоволновые установки для термообработки сырья / Белов А. А., Жданкин Г. В., Новикова Г. В., Михайлова О. В., **Ершова И. Г.**; патентообладатель НГСХА. № 2016133572; заявл. 15.08.2016, опубл. 21.07.2017. Бюл. № 21.
30. Пат. 2694944 РФ, МПК А47J39/00. Микроволновая установка для размораживания коровьего молозива / Поручиков Д. В., Васильев А. Н., **Ершова И. Г.**, Новикова Г. В., Белова М. В.; патентообладатель ВИМ. № 2018143727; заявл. 11.12.2018, опубл. 18.07.2019. Бюл. № 20.
31. Пат. 2752938 РФ, МПК А47J.39/00. Двухмодульная СВЧ установка непрерывно-поточного действия для размораживания и разогрева коровьего молозива / Новикова Г. В., Просвирякова М. В., Михайлова О. В., **Ершова И. Г.** [и др.]; патентообладатель НГИЭУ. № 2020141711; заявл. 17.12.2020; опубл. 11.08.2021. Бюл. № 23.
32. Пат. 2752941 РФ, МПК А47J.39/00. Радиогерметичная многорезонаторная установка для размораживания молозива животных / Новикова Г. В., Просвирякова М. В., Михайлова О. В., **Ершова И. Г.**, Зиганшин Б. Г. [и др.]; патентообладатель НГИЭУ. № 2020141715; заявл. 10.09.2020; заявл. 17.12.2020; опубл. 11.08.2021. Бюл. № 23.
33. Пат. 2753424 РФ, МПК А47J.39/00. СВЧ установка непрерывно-поточного действия с квазистационарными тороидальными резонаторами для размораживания и разогрева молозива животных / Новикова Г. В., Сторчевой В. Ф., Просвирякова М. В., Михайлова О. В., **Ершова И. Г.** [и др.]; патентообладатель НГИЭУ. № 2021104198; заявл. 19.02.2021, опубл. 16.08.2021. Бюл. № 9.
34. Пат. 2761810 РФ, МПК А47J.39/00. СВЧ установка непрерывно-поточного действия с кольцевым и коническим резонаторами для дефростации и подогрева молозива животных / Новикова Г. В., **Ершова И. Г.**, Просвирякова М. В., Михайлова О. В., Сторчевой В. Ф. [и др.]; патентообладатель НГИЭУ. № 2021113242; заявл. 11.05.2021, опубл. 13.12.2021. Бюл. № 35.
35. Пат. 2762645 РФ, МПК А47J.39/00. Двухрезонаторная СВЧ установка для дефростации и разогрева молозива животных / Новикова Г. В., **Ершова И. Г.**, Просвирякова М. В., Михайлова О. В., Сторчевой В. Ф. [и др.]; патентообладатель НГИЭУ. № 2021117344; заявл. 16.06.2021, опубл. 21.12.2021. Бюл. № 36.
36. Пат. 2775137 РФ, МПК А47J.39/00. СВЧ установка непрерывно-поточного действия с состыкованными вершинами конических резонаторов для дефростации и разогрева молозива / Просвирякова М. В., **Ершова И. Г.**, Новикова Г. В., Михайлова О. В., Сторчевой В. Ф. [и др.]; патентообладатель НГИЭУ. № 2021124890; заявл. 23.08.2021, опубл. 28.06.2022. Бюл. № 19.
37. Пат. 2777113 РФ, МПК А47J.39/00. СВЧ установка со сдвоенными кольцевыми резонаторами для дефростации и разогрева молозива животных / Новикова Г. В., Тараканов Д. А., **Ершова И. Г.**, Просвирякова М. В., Михайлова О. В., Зиганшин Б. Г. [и др.]; патентообладатель НГИЭУ. № 2021137695; заявл. 20.12.2021, опубл. 01.08.2022. Бюл. № 22.
38. Пат. 2779598 РФ, МПК А47J.39/00. СВЧ установка непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами для дефростации и разогрева молозива животных / Новикова Г. В., Тараканов Д. А., **Ершова И. Г.**, Просвирякова М. В., Михайлова О. В., Зиганшин Б. Г., Сторчевой В. Ф. [и др.]; патентообладатель НГИЭУ. № 2022101265; заявл. 20.01.2021, опубл. 12.09.2022. Бюл. № 26.
39. Пат. 2780835 РФ, МПК А47J.39/00. СВЧ установка с соосно состыкованными цилиндрическим и коаксиальным резонаторами для дефростации и разогрева молозива животных / Новикова Г. В., **Ершова И. Г.**, Просвирякова М. В., Тараканов Д. А., Михайлова О. В., Зиганшин Б. Г. [и др.]; патентообладатель НГИЭУ. № 2022101268; заявл. 20.01.2021, опубл. 04.10.2022. Бюл. № 28;

– в монографиях:

40. Установки для термообработки крови убойных животных : *монография* / Г. В. Новикова, М. В. Белова, Н. Т. Уездный, **И. Г. Ершова**. – Чебоксары : ЧГСХА, 2016. – 120 с. – ISBN 978-5-7677-1901-3.
41. **Ершова, И. Г.** Методологические основы разработки СВЧ установки для дефростации и разогрева молозива животных : *монография* / **И. Г. Ершова**, М. В. Просвирякова. – Княгинино : НГИЭУ, 2022. – 320 с. – ISBN 978-5-907454-64-4.

42. **Ершова, И. Г.** Алгоритм исследования процессов дефростации и разогрева молозива животных : *монография* / **И. Г. Ершова**. – М. : РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023. – 349 с. – ISBN 978-5-907619-39-5;
– *в сборниках научных трудов и материалов конференций (всего 35 статей)*;
43. **Ершова, И. Г.** Анализ диэлектрических параметров жиросодержащего сырья / **И. Г. Ершова**, Д. В. Поручиков, М. Г. Сорокина // Перспективы развития научных исследований в 21 веке : сб. науч. тр. по матер. IV Межд. науч.-прак. конф. – Махачкала : Апробация, 2014. – С. 29-32.
44. **Ершова, И. Г.** Техничко-экономическая оценка внедрения СВЧ-размораживателя молозива животных в фермерское хозяйство / **И. Г. Ершова** // Journal of Advanced Research in Technical Science. – Seattle, USA : SRC MS, AmazonKDP. – 2023. – Issue 35. – P. 100-106. – <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2023-35-100-106>. – ISSN 2474-5901, и др.