

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНЖЕНЕРНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Шевелев Александр Владимирович

**РАЗРАБОТКА СВЧ-ВОСКОТОПОК
С ОБОСНОВАНИЕМ ИХ ПАРАМЕТРОВ**

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование
и энергоснабжение агропромышленного комплекса

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Михайлова Ольга Валентиновна,
доктор технических наук, профессор

Княгинино – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕМЫ	13
1.1 Анализ объемов производства и требований, предъявляемых к качеству пчелиного воска	13
1.2 Обзор технических средств и способов переработки воскового сырья в условиях пасек	17
1.3 Анализ физических характеристик воскового сырья	24
1.3.1 Физико-механические свойства воскового сырья и меда	24
1.3.2 Диэлектрические характеристики воскового сырья и меда	29
1.3.3 Программа исследований технологического процесса термообработки воскового сырья	32
1.4 Выводы	34
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-ВОСКОТОПКИ	36
2.1 Особенности тепловой обработки воскового сырья	36
2.2 Расчет электродинамических параметров системы «генератор–резонатор–сырье»	42
2.3 Результаты исследования напряженности ЭП в сырье при разных объемах загрузки воскового сырья	49
2.4 Исследование динамики нагрева воскового сырья	52
2.5 Интерференция волн в полусферическом резонаторе	56
2.6 Трехмерное моделирование системы «генератор–резонатор–сырье» в программе CST Microwave Studio	59
2.6.1 Электродинамические параметры системы с полусферическими резонаторами	59
2.6.2 Электродинамические параметры системы со сферическим и кольцевым резонаторами	65

2.6.3 Электродинамические параметры системы с цилиндрическим и сферическим резонаторами	67
2.6.4 Электродинамические параметры системы с цилиндрическими резонаторами	70
2.6.5 Соответствие СВЧ-воскотопок со сдвоенными резонаторами разных конструкционных исполнений критериям проектирования	74
2.7 Выводы	75
3 РАЗРАБОТАННЫЕ ДВУХРЕЗОНАТОРНЫЕ СВЧ-ВОСКОТОПКИ НЕПРЕРЫВНО-ПОТОЧНОГО ДЕЙСТВИЯ	78
3.1 Частные методики исследований и измерительная аппаратура	78
3.2 Машинно-аппаратная схема переработки воскового сырья	80
3.3 Двухрезонаторные СВЧ-воскотопки непрерывно-поточного действия для отделения меда и вытопки пасечного воска	84
3.3.1 СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами	84
3.3.2 СВЧ-воскотопка с совмещенными сферическим и кольцевым резонаторами	87
3.3.3 СВЧ-воскотопка с совмещенными цилиндрическим и сферическим резонаторами	90
3.3.4 СВЧ-воскотопка с состыкованными цилиндрическими резонаторами	94
3.3.5 СВЧ-воскотопка непрерывно-поточного действия с тороидальным резонатором	98
3.5 Выводы	102
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫТОПКИ ПЧЕЛИННОГО ВОСКА С ОТДЕЛЕНИЕМ МЕДА	104
4.1 Алгоритм проведения экспериментальных исследований процесса вытопки воска с отделением меда в СВЧ-воскотопке с полусферическими резонаторами	104
4.2 Обоснование основных режимов работы СВЧ-воскотопок непрерывно-поточного действия	107

4.2.1 Исследования динамики нагрева воскового сырья в двухрезонаторной СВЧ-воскотопке	107
4.2.2 Результаты оценки качества вытопленного пасечного воска и меда	112
4.2.3 Эффективные режимы работы первого резонатора двухрезонаторных СВЧ-воскотопок для термообработки воскового сырья с отделением меда в непрерывном режиме	116
4.2.4 Результаты оценки рабочего процесса вытопки воскового сырья в СВЧ-воскотопках	128
4.3 Сравнение удельных энергетических затрат на вытопку пасечного воска с отделением меда в воскотопках	133
4.4 Обеспечение электромагнитной безопасности обслуживающего персонала	135
4.5 Выводы	138
5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СВЧ-ВОСКТОПКИ В УСЛОВИЯХ ПАСЕКИ	142
5.1 Затраты на вытопку пасечного воска по базовому варианту	143
5.2 Экономические показатели внедрения СВЧ-воскотопки непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами	144
5.3 Выводы	148
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	149
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	151
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	153
ПРИЛОЖЕНИЯ	173
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Акт апробирования научно-исследовательской работы в производственных условиях	173
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Акт об использовании результатов исследований в учебном процессе	175
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Порядок изготовления СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами	178

ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Хронометраж нагрева воскового сырья при разных удельных мощностях	180
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Протоколы оценки качества вытопленного воска и меда	183
ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Патенты	187
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – Дипломы	189
ПРИЛОЖЕНИЕ И – Расчет электродинамических параметров СВЧ-воскотопок	190
ПРИЛОЖЕНИЕ К – Принципиальная электрическая схема управления СВЧ-воскотопкой непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами	198
ПРИЛОЖЕНИЕ Л – Линейный многофакторный регрессионный анализ	199
ПРИЛОЖЕНИЕ М – Рекомендации по эксплуатации СВЧ-воскотопки непрерывно-поточного действия	212
Приложение Н – Протокол измерений плотности потока энергии ЭМП СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами	213

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Пчелиный воск имеет исключительно большое значение как для самого пчеловодства, так и для народного хозяйства в целом. Примерно до 80 % производимого в стране воска расходуется на нужды самого пчеловодства. Согласно реестру пчеловодов, предоставленному Министерством сельского хозяйства и продовольственных ресурсов, в Нижегородской области в 2024 году насчитывается 1387 пчеловодческих хозяйств с общим количеством пчелосемей 32424, из них с количеством 50–99 пчелосемей – 128 хозяйства, свыше 100 пчелосемей – 32. В них, согласно опросу, годовой объем перерабатываемого воскового сырья превышает 250 кг (50 пчелосемей) и 500 кг (от 100 пчелосемей). Переработка такого объема сырья с использованием паровых воскотопок, чья максимальная производительность составляет 6,5 кг/час, – достаточно длительный процесс, что в конечном итоге сказывается на эксплуатационных затратах. К восковому сырью, подлежащему переработке, помимо восковой суши относят забрус, срезаемый с рамок перед откачкой меда, а также поврежденные во время откачки соты. В данном сырье содержится 5–7 % остаточной фракции меда. Существующая технология переработки воскового сырья предусматривает использование технических средств, реализующих способ термообработки воздействием водяного пара. При этом остаточная фракция меда в восковом сырье растворяется в воде, которая в дальнейшем может использоваться в качестве подкормки пчелам. Для повышения рентабельности производства пчеловодческой продукции предлагается способ переработки воскового сырья воздействием электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) с отделением и сохранением остаточной фракции меда и вытопкой пасечного воска. Федеральный закон от 30.12.2020 г. № 490-ФЗ «О пчеловодстве в РФ» предусматривает одним из основных направлений развития пчеловодства – развитие научно-технической и инновационной деятельности в сфере пчеловодства. В связи с этим разработка СВЧ-воскотопок непрерывно-

поточного действия с обоснованными конструкционно-технологическими параметрами, реализующими способ вытопки воска при сниженных эксплуатационных затратах, позволяющий отделить из воскового сырья остаточную фракцию меда, является актуальной задачей.

Научная инновационная идея состоит в том, что технология вытопки воска из сырья с отделением и сохранением остаточной фракции меда реализована в двухрезонаторных СВЧ-воскотопках непрерывно-поточного действия при обеспечении эффективных значений удельной мощности СВЧ-генераторов и напряженности электрического поля (ЭП).

Степень разработанности темы. Значительный вклад внесли:

– в разработку перспективных электротехнологий – И.Ф. Бородин, А.М. Башилов, А.Н. Васильев, А.Г. Возмилов, А.С. Гордеев, В.М. Попов, В.И. Пахомов, Д.С. Стребков, М.А. Таранов, Д.А. Тихомиров, Н.В. Цугленок и др.;

– в теорию электромагнитного поля, в том числе объемных резонаторов, – Г.И. Атабеков, Л.А. Бессонов, С.И. Баскаков, Ю.Н. Пчельников, А.И. Рогов, А.Н. Диденко, А.В. Лыков, В.И. Нефедов и др.;

– в разработку технологического оборудования для переработки воскового сырья – А.Г. Белов, Е.В. Кудряков, В.И. Лебедев, В.Ф. Некрашевич, Ю.А. Путилов, А.К. Рублев, С.В. Оськин, В.А. Симоганов, В.А. Сыркин, Р.Л. Филиппов, а также ряд зарубежных ученых: L.Y. Gemechis, J. Morgan, R. Buchwald, M.D. Breed, W.F. Tinto и др.

Разработкой технологии и СВЧ-установки (патент 2529701) для вытопки пасечного воска в периодическом режиме занимались в ФГБОУ ВО ЧГСХА.

Анализ результатов исследований, выполненных многими авторами в области применения энергии электромагнитных волн сантиметрового диапазона для воздействия на с.-х. сырье, в том числе на воск и мед, показывает, что не в полной мере решены задачи согласования электродинамических (ЭД) параметров системы «генератор–резонатор–сырье» (напряженности ЭП в резонаторе и в сырье, собственная и нагруженная добротности) с мощностью СВЧ-генераторов, электрофизическими параметрами сырья и скоростью его нагрева. Поэтому научное

исследование, направленное на разработку двухрезонаторных СВЧ-воскотопок непрерывно-поточного действия, базирующееся на методике, позволяющей определить эффективные технологические параметры и конструктивные исполнения резонаторов, обеспечивающих равномерное распределение ЭМП в восковом сырье, считаем *актуальным*.

Цель работы – разработка двухрезонаторных СВЧ-воскотопок непрерывно-поточного действия для термообработки воскового сырья при сниженных эксплуатационных затратах с отделением остаточной фракции меда и обоснование их параметров.

Задачи исследования:

1. Исследовать динамику нагрева двухкомпонентного воскового сырья при разных напряженностях ЭП с учетом изменения физических параметров.

2. Разработать способ вытопки пасечного воска с отделением остаточной фракции меда при воздействии ЭМП СВЧ и конструктивные исполнения СВЧ-воскотопок непрерывно-поточного действия с состыкованными резонаторами.

3. Разработать методику согласования ЭД-параметров резонаторов разной конфигурации с удельной мощностью генераторов, физическими параметрами двухкомпонентного воскового сырья, скоростью его нагрева.

4. Выявить эффективные режимы тепловой обработки двухкомпонентного воскового сырья в двухрезонаторной СВЧ-воскотопке непрерывно-поточного действия.

5. Изготовить и апробировать образец СВЧ-воскотопки для функционирования в пасечных условиях. Оценить технико-экономическую эффективность применения СВЧ-воскотопки в пасечных условиях.

Объект исследования – технология термообработки двухкомпонентного воскового сырья воздействием ЭМП СВЧ и двухрезонаторные СВЧ-воскотопки непрерывно-поточного действия.

Предмет исследования – закономерности влияния размеров и конфигурации резонаторов на ЭД-параметры системы и показатели процесса вытопки воска.

Научную новизну работы составляют:

- способ вытопки пасечного воска воздействием ЭМП СВЧ, отличающийся от паровых воскотопок тем, что термообработка воскового сырья с отделением остаточного меда происходит в двухрезонаторных СВЧ-установках непрерывно-поточного действия;
- результаты исследования динамики диэлектрического нагрева двухкомпонентного воскового сырья с учетом изменения его электрофизических параметров;
- методика согласования ЭД-параметров системы «генератор–резонатор–сырье», включающая математические выражения, описывающие взаимосвязь размеров резонаторов разных конфигураций с собственной и нагруженной добротностью, напряженностью электрического поля в резонаторе и сырье, скоростью его нагрева;
- результаты исследования основных ЭД-параметров системы «генератор–резонатор–сырье» в программе CST Microwave Studio.

Техническая новизна конструкционных исполнений СВЧ-воскотопок подтверждена патентами РФ на изобретение № 2770496, № 2737142, № 2728659, № 2740095, № 2789490, № 2803541.

Теоретическая и практическая значимость работы

Предложена методика согласования ЭД-параметров системы «генератор–резонатор–сырье» с удельной мощностью генераторов, электрофизическими параметрами двухкомпонентного воскового сырья и скоростью его нагрева. Результаты исследования динамики нагрева двухкомпонентного воскового сырья в процессе воздействия ЭМП СВЧ и ЭД-параметров системы с резонаторами разной конфигурации позволяют обосновать эффективные режимы работы СВЧ-воскотопок.

Практическая значимость работы для пчеловодческих хозяйств заключается в том, что двухрезонаторные СВЧ-воскотопки, реализующие способ вытопки пасечного воска воздействием ЭМП СВЧ на двухкомпонентное сырье, позволяют снизить потери меда и эксплуатационные затраты.

Материалы и результаты научных исследований используются в учебном процессе кафедры «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО НГИЭУ при

введении дисциплин «Электрооборудование», «Электротехнологии», «Электромагнитные поля и волны».

Методология и методы исследований. Теоретические исследования базировались на теории распределения ЭМП сантиметрового диапазона в двухкомпонентном сырье с изменяющимися электрофизическими параметрами в процессе его воздействия и результатах исследований ЭД-параметров системы «генератор-резонатор-сырье». Компьютерное моделирование распределения ЭМП в резонаторах различной конфигурации проводили в программе CST Microwave Studio. Экспериментальные исследования по выявлению эффективных режимов работы СВЧ-воскотопки проводились по стандартным методикам на основе теории активного планирования трехфакторного эксперимента тип 2^3 и ротатбельного планирования. Статистическую обработку результатов экспериментальных исследований проводили в программах MS Office Excel, STATISTICA 12.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный способ вытопки пасечного воска воздействием ЭМП СВЧ позволяет отделить и сохранить остаточную фракцию меда.
2. Разработанная методика позволяет согласовать основные электродинамические параметры резонаторов различной конфигурации с удельной мощностью генераторов, электрофизическими параметрами двухкомпонентного воскового сырья и скоростью его нагрева.
3. Эффективное конструкционное исполнение СВЧ-воскотопки позволяет реализовать способ вытопки пасечного воска при сниженных эксплуатационных затратах.

Реализация результатов исследований. Исследования проводились в соответствии с планами НИР ГБОУ ВО НГИЭУ. Результаты научной работы используются в учебном процессе ГБОУ ВО «Нижегородский ГИЭУ». Изготовленный образец СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами апробирован в ООО «МАКОШЬ» Шатковского района Нижегородской области.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов базируется на доказанных и корректно использованных выводах математического анализа и компьютерного моделирования, а также подтверждена результатами экспериментальных исследований, проведенных с применением современных вычислительных программ, измерительных приборов и оборудования.

Результаты научных исследований были отмечены дипломом в XV конкурсе объектов интеллектуальной собственности на соискание премии Нижегородской области им. И. П. Кулибина, сертификатом наставника в V межвузовском конкурсе инновационных команд «Ярмарка проектов-2020», прошедшего в ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный университет водного транспорта», сертификатом участника международной научно-практической конференции «Энергообеспечение АПК», прошедшей 20–21 декабря 2023 г. на базе ФГБНУ «Федеральный научный аграрный центр ВИМ».

Основные положения диссертационной работы были опубликованы в научных журналах, доложены и обсуждены на международных научно-практических конференциях: «Безопасность и качество с.-х. сырья и продовольствия» (РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2020 г.); «Социально-экономические проблемы развития муниципальных образований» и «Актуальные направления развития техники и технологий в России и за рубежом – реалии, возможности, перспективы» (ГБОУ ВО НГИЭУ, 2020–2021 гг.); «Перспективы развития аграрных наук «AgroScience-2020».

Публикации. Результаты исследований отражены в 21 научной работе, в том числе опубликованы 9 статей в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 6 патентов на изобретения. Общий объем публикаций по теме составляет 9,08 п.л., из них авторских – 4,91 п.л. (54 %).

Личный вклад автора в работу. По теме диссертации автором лично и при его непосредственном участии выполнены все этапы работы, в том числе: теоре-

тические и экспериментальные исследования конструкционно-технологических параметров СВЧ-воскотопки с обоснованием ЭД-параметров системы «генератор–резонатор–сырье» в программе CST Microwave Studio; обоснование эффективных режимов работы СВЧ-воскотопок через регрессионные модели трехфакторных экспериментов типа 2^3 и ротатабельного планирования; подготовка и публикация статей.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка источников литературы из 164 наименований, 11 приложений, включает 76 рисунков, 36 таблиц. Объем диссертации – 150 страниц основного текста без библиографии и приложений, общий объем работы – 214 страниц.

1 ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕМЫ

1.1 Анализ объемов производства и требований, предъявляемых к качеству пчелиного воска

При переводе сельскохозяйственного производства на промышленную основу необходимо заменить устаревшие технологии на более современные, это касается и переработки продукции пчеловодства. Главным направлением в интенсификации производства, переработки и хранения должны быть технологические процессы с применением электрофизических средств, не влияющих отрицательно на окружающую среду. Среди электрофизических методов особое внимание заслуживает использование энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) в технологических процессах переработки продукции пчеловодства [11]. Это обусловлено сокращением продолжительности технологических процессов и сохранением потребительских свойств, при высоком санитарном состоянии продукта.

При СВЧ-нагреве реализуются безотходные и энергосберегающие технологии. Известно, что использование СВЧ-энергии в тепловых процессах позволяет снизить на 25–30 % удельный расход энергии, стабилизировать качество продукции при автоматизированных процессах [9; 11].

Для изготовления СВЧ-установки, предназначенной для переработки пчеловодческой продукции, необходимо проведение научно-исследовательских работ. Способность СВЧ-энергии создавать в короткое время интенсивный нагрев сырья позволяет использовать ее для стерилизации воска [42]. В некоторых научных школах разрабатываются способы распуска меда с применением СВЧ-энергии, позволяющие осуществлять эти процессы при температуре 45–50 °С [63]. Вязкость меда уменьшается в 10 раз и составляет $1,5 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$, что сокращает время ро-

спуска и откачки с 10–12 ч до 18 мин [146]. Несмотря на разнообразие технологических процессов, все они могут быть реализованы на базе многомодульной СВЧ-установки. В то же время СВЧ-установки пока не получили широкого применения прежде всего из-за недостаточного объема выполненных исследований по механизму действия ЭМП на сырье и разработке технических средств. Поэтому создание СВЧ-воскотопок, отвечающих современным требованиям, – актуальная научно-техническая задача, которая требует решения ряда вопросов:

- обоснование эффективности конструктивных исполнений рабочих органов с учетом рационального их сочетания с традиционными методами;
- анализ физических свойств компонентов сырья;
- разработка теоретических основ расчета и проектирования объемных резонаторов СВЧ-воскотопки;
- создание СВЧ-воскотопки и разработка методов комплексной оценки эффективных конструктивно-технологических параметров.

Пчелиный воск имеет исключительно большое значение как для самого пчеловодства, так и для народного хозяйства в целом [30; 32]. Примерно до 80 % производимого в стране воска расходуется на нужды самого пчеловодства. Считается, что на производство 1 кг воска пчелы затрачивают около 3,5–6 кг меда [45; 46]. Проанализировав объемы производства меда в хозяйствах РФ, начиная с 2000 г. (рис. 1.1), выяснили, что с 2020 г. наблюдается тенденция к снижению производства на 4 % [110].

Согласно реестру пчеловодов Нижегородской области [117], основная масса (71 %) пчеловодческих хозяйств – это ЛПХ с количеством пчелосемей не более 30 шт. (рисунок 1.2). Такая же картина наблюдается и по России в целом – основная масса пчелосемей сосредоточена в фермерских хозяйствах и пчеловодов-любителей (рис. 1.3) [110].

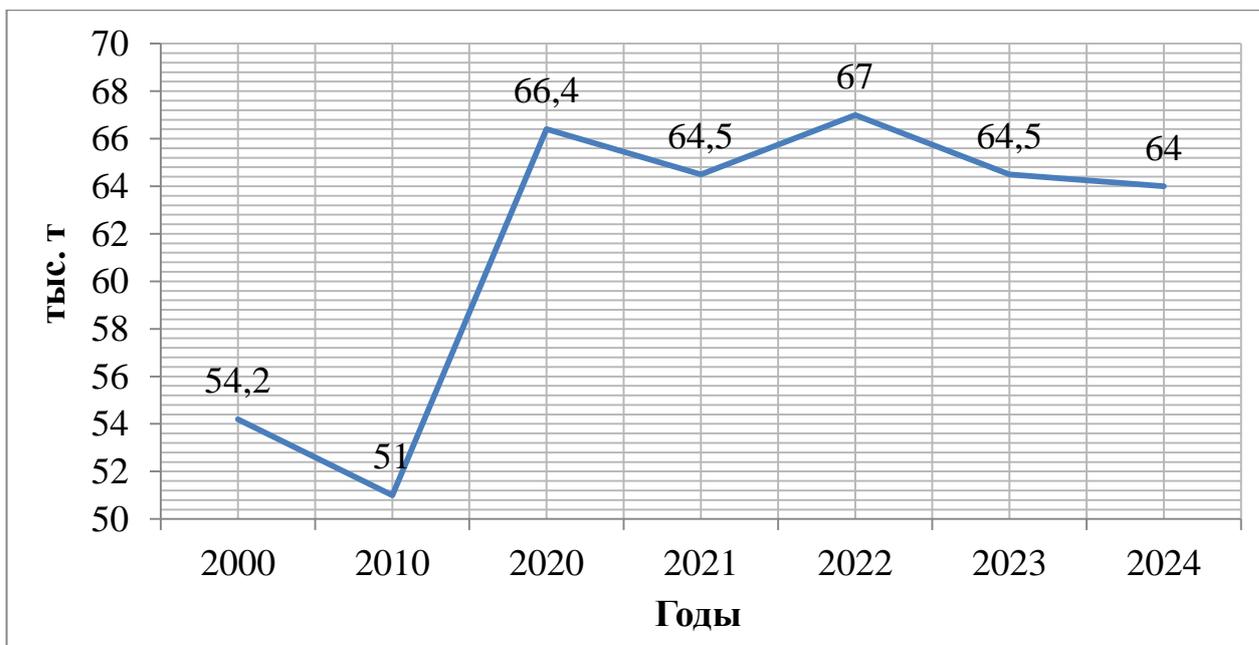


Рисунок 1.1 – Производство товарного меда в РФ, тонн:

КФХ – крестьянские фермерские хозяйства;

СХО – сельскохозяйственные организации;

ХН – хозяйства населения [110]

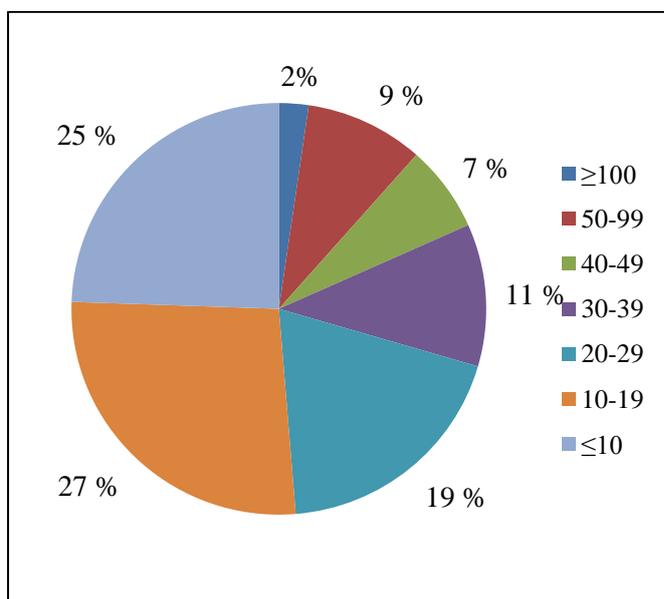


Рисунок 1.2 – Доля хозяйств Нижегородской области по количеству пчелосемей, 2024 г.

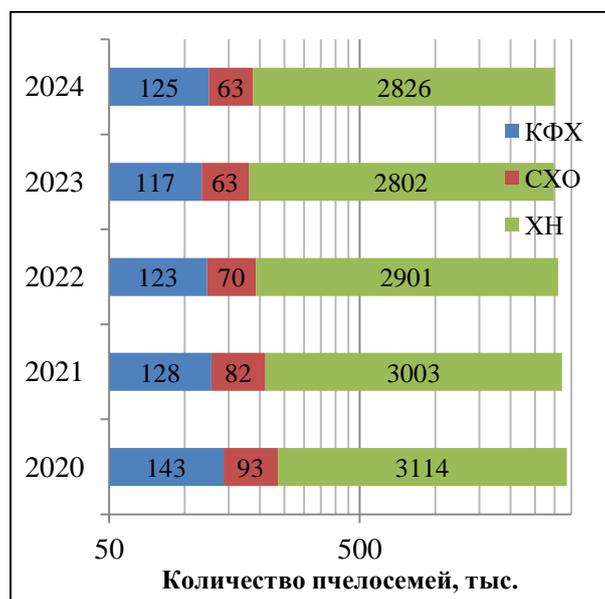


Рисунок 1.3 – Динамика изменения количества пчелосемей в России по категориям хозяйств

Существование современного пчеловодства невозможно представить без широкого применения искусственной вошины, которая вырабатывается только из

натурального пчелиного воска [114]. Пасеки в хозяйствах населения могут полностью удовлетворить спрос на пчелиный воск, если научатся сохранять и перерабатывать восковое сырье без потерь. В России производство пчелиного воска, согласно последним данным, оценивается в 9200 тонн [3]. Все это говорит о необходимости увеличения производства воска, который требует много изначального воскового сырья для переработки.

Переработка насечного воска. Вытопленный воск в чистом виде получают путем переработки первичного воскового сырья, к которому можно отнести:

- 1) выбракованные соты;
- 2) наросты воска на планках рамок и стенках ульев;
- 3) забрус, получаемый при распечатке рамок и др. [114].

Источником воска для воскобойных заводов являются, помимо вышеописанных, отходы, получаемые при переработке первичного воскового сырья, – насечная мерва [51]. Как правило, переработка воскового сырья происходит в условиях пасек сразу после медосборов либо глубокой осенью, перед тем как приступить к заготовке рамок. Необходимо акцентировать внимание на том, что переработку забруса обычно производят отдельно от остального воскового сырья. Воск, получаемый из забруса, более чистый, он отличается по цвету и запаху от остального воска, идет на производство медицинских препаратов, косметики, в пищевую индустрию.

Состав воскового сырья. Восковое сырье, получаемое с пасек, помимо самого воска содержит ряд не восковых веществ, а также обладает влажностью (до 10 %) [13; 36]. Для определения качества воскового сырья на заводах по переработке воска введен показатель *восковитости сырья* – содержание воска в сырье, в % от общего веса. Так, к примеру, восковитость свежих сот достигает 95 %, соты, в чьих ячейках расплод выводился единожды – 75 %, 3 раза – 63 %, после 10-го расплода – только 50 % [67].

1.2 Обзор технических средств и способов переработки воскового сырья в условиях пасек



Рисунок 1.4 –
Воскотопка
солнечная ВС-134

В условиях пасек применяются два способа переработки воскового сырья: при помощи воскотопок и с использованием воскопресса. Анализируем существующие воскотопки. *Воскотопка солнечная ВС-134* (рисунок 1.4) представляет собой ящик, покрытый наклонной застекленной крышкой, через которую проходят солнечные лучи. В нем находятся корыто из жести и сетка, на которую кладут восковое сырье для перетопки. Воскотопку ставят на открытое место и при этом солнечные лучи прогревают ящик до $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как температура топления воска $63\text{ }^{\circ}\text{C}$. *Недостатки:* после перетопки в остатке содержится еще много воска, перерабатывать темную сушь в ней невозможно, слишком долгий процесс, зависимость от погодных условий [49; 104; 105].



Рисунок 1.5 – Воскотопки паровые:
а – рамочная; *б* – для плавления
воска с одновременной
дезинфекцией рамок



Рисунок 1.6 –
Воскотопки ВТП

Имеются воскотопки (рисунок 1.5, *а*) паровые (загрузка 8 рамок или 1–1,5 кг воскового сырья). Недостатком является то, что невозможна качественная дезинфекция полученного воска и восковых вытопок от возбудителей пчелиных болезней.

Есть воскотопки с паровой рубашкой для плавления воска с одновременной дезинфекцией рамок (рисунок 1.5, *б*). Принцип их работы основан на применении влажного пара, образующегося от парогенератора (1,5–3 кВт) [60; 61; 62; 65; 98].

Есть высокопроизводительные паровые воскотопки (рисунок 1.6), сочетающие

в себе сухой и влажный метод переработки сырья, рассчитана примерно на 3 кг сырья и 25–30-минутный цикл работы [26].

Воскотопка паровая ВТП (рис. 1.6) предназначена для переработки воскового сырья воздействием пара. В зависимости от объема корзины для сырья выпускаются на 12, 17 и 23 литра, время переработки воскового сырья – 45–60 мин., количество вытапливаемого воска за один цикл – 1,5–5 кг [27; 139].

Воскотопка ВТП-23 (рисунок 1.7) с перфорированной алюминиевой корзиной для сырья объемом 23 л работает от 10-литрового парогенератора мощностью 3 кВт [106]. Продолжительность вытопки одного цикла – 45 мин.



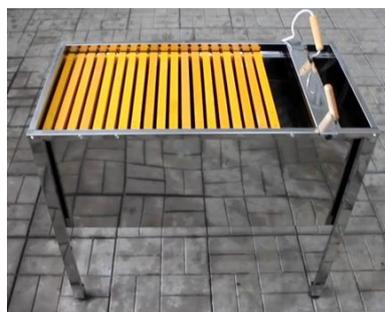
Рисунок 1.7 –
Воскотопка
паровая ВТП-23

Восковое сырье выкладывается в корзину, испаритель заполняется водой и шлангом присоединяется к воскотопке через специальный патрубок. Далее воскотопка закрывается сверху крышкой, включается парогенератор, и происходит вытопка воска. По окончании вытопки растопленный воск сливается через сливной кран. В конструкции не предусмотрено разделение воскового сырья на фракции воска и меда.

Воскотопка-воскопресс (рисунок 1.8, а). Под действием пара сырье в перфорированной чаше плавится, оседает, воск стекает в чашу-сборник. После заполнения чаши воск прессуют и сливают через краник [39; 102].



а



б



в

Рисунок 1.8 – Воскотопка: а) воскопресс Техно; б) высокотемпературная ВВТ-1П «Мелисса»; в) центрифуга-воскотопка ПВЦС-1М [100; 102; 105]

Воскотопка высокотемпературная ВВТ-1П «Мелисса» (рис. 1.8, б) предназначена для сухой высокотемпературной (140–150 °С) переработки воскового сы-

рья. Она позволяет перерабатывать любую сушь, находящуюся в рамках, восковые вытопки, обрезки сотов и другое восковое сырье [106].

Переносная паровая центрифуга-воскотопка ПВЦС-1М (рисунок 1.8, в) в своей конструкции имеет корпус, электропривод, сетчатый ротор и парообразователь (2,9 кВт) с двойными станками. Подача пара происходит через отверстия во внутренней станке парообразователя [29; 66; 68; 69; 102].



а

б

Рисунок 1.9 – Воскотопка:

- а) с капельным парогенератором;
- б) ПЛ-1

Воскотопка рамочная с капельным парогенератором (рисунок 1.9, а). Воскотопка служит для перетопки больших партий воска на пасеках, а также для перетопки сотов в рамках и дезинфицирования пчеловодного инвентаря. Рабочий объем корзины для сырья – 70 л. Загрузка кассеты рамками – 12 шт. [98].

Стерилизатор воска ПЛ-1 (рисунок 1.9, б) вытапливает из воскового сырья грязь, повышает его сортность, уничтожает спорную микрофлору. Состоит из стального кожуха, внутри которого располагается бак из пищевой нержавеющей стали. Через баки внизу проходят выводной

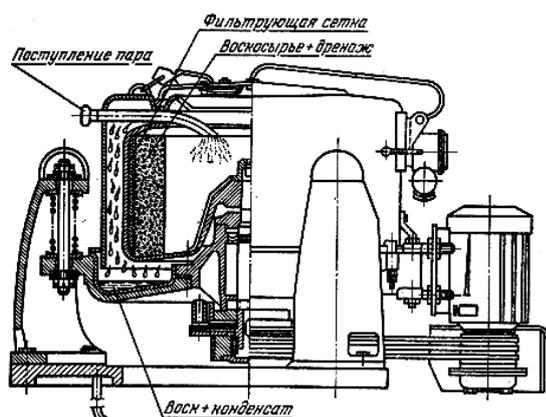


Рисунок 1.10 – Установка ТВ-600-4Н для расплавления воска с фильтрующей центрифугой

кран для слива расплавленного воска, а также отсекающий для задержки грязи, оседающей на дне. Между двумя емкостями заливается масло, которое подогревается ТЭНом. Объем внутреннего бака рассчитан на 40 л жидкого материала, мощность ТЭНа достигает 1–2 кВт. Рабочая температура 120–130 °С [125].

Производительность установки зависит от рабочих параметров ротора, от изначальной температуры сырья, его объема, загружаемого в центрифугу, структуры сырья, восковитости [69, с. 33].

Установка ТВ-600-4Н для расплавления воска с фильтрующей центрифугой (рисунок 1.10). Производительность установки

При непрерывной подаче пара (давление 20–40 кПа, температура 103–105 °С) сырье центрифугируют в течение 90–120 мин до полного прекращения выделения расплавленного воска.



Рисунок 1.11 – Паровая воскотопка Konigin

25–30 мин., производительность 6,5 кг/ч. После отделения от мервы воск сливается через выпускной кран. К преимуществам данной воскотопки можно отнести то, что рамки обеззараживаются за счет термической обработки паром.



Рисунок 1.12 – Индукционная воскотопка

Известна индукционная воскотопка (рисунок 1.12), в которой используются лучевое и конвекционное излучение [53; 54; 97; 128; 129]. Она предназначена для переработки восковой суши как отдельно, так и непосредственно в рамке. В прямоугольном корпусе имеются кронштейны для установки рамок (7–10 шт.), два электромагнитных индуктора, вентилятор охлаждения. В нижней части корпуса имеется поддон, установленный под углом, и сливной кран. С наружной стороны поддона закреплен нагревательный кабель, предназначенный для поддержания необходимой температуры расплавленного воска. Сверху контейнер закрывается крышкой. Ввиду больших энергозатрат и низкой производительности данная воскотопка не нашла широкого применения в пчеловодческих хозяйствах.

Сравнение характеристик воскотопок, применяемых в пчеловодческих хозяйствах, представлено в таблице 1.1.

К зарубежному оборудованию можно отнести паровую воскотопку «Konigin» (Венгрия) с загрузкой барабана до 30 рамок (рисунок 1.11). В нижней части установки располагается электропривод сетчатого барабана. Емкость для воды объемом 20–25 л расположена внизу бака, нагрев производится с помощью ТЭНов (3,25 кВт). Время нагрева

25–30 мин., производительность 6,5 кг/ч. После отделения от мервы воск сливается через выпускной кран. К преимуществам данной воскотопки можно

отнести то, что рамки обеззараживаются за счет термической обработки паром.

Известна индукционная воскотопка (рисунок 1.12), в которой используются лучевое и конвекционное излучение [53; 54; 97; 128; 129]. Она предназначена для переработки восковой суши как отдельно, так и непосредственно в рамке. В прямоугольном корпусе имеются кронштейны для установки рамок (7–10 шт.), два электромагнитных индуктора, вентилятор охлаждения. В нижней части корпуса имеется поддон, установленный под углом, и сливной кран. С наружной стороны поддона закреплен нагревательный кабель, предназначенный для поддержания необходимой температуры расплавленного воска.

Сверху контейнер закрывается крышкой. Ввиду больших энергозатрат и низкой производительности данная воскотопка не нашла широкого применения в пчеловодческих хозяйствах.

Сравнение характеристик воскотопок, применяемых в пчеловодческих хозяйствах, представлено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики воскотопок, применяемых
в пчеловодческих хозяйствах

Вид воскотопки	Производительность, кг/ч	Потребляемая энергия, кВт·ч	Удельные энергетические затраты, кВт·ч/кг
Воскотопка солнечная ВС-134	до 4 кг/день	-	-
ВВТ-1П «Мелисса»	до 1,5	1,5–3	0,5–1
Воскотопка паровая ВТП-23	до 5	3	0,6
Центрифуга-воскотопка ПВЦС-1М	до 5	2,9	0,58
Стерилизатор воска ПЛ-1	1,5–2	1–2	0,5–1
Паровая воскотопка Konigin	до 6,5	3,25	0,5

* составлено по результатам исследований

Согласно таблице 1.1, к недостаткам основных применяемых воскотопок можно отнести следующие пункты:

- цикличность процесса;
- низкая производительность (от 1,5 до 6,5 кг/ч);
- воск, полученный воздействием пара, содержит больше воды и загрязняющих примесей [135].

На базе ФГОУ ВО «Чувашская ГСХА» *создан проект СВЧ-воскотопки* (рисунок 1.13), (патент № 2529701 РФ, МПК А01К) [93]. Технология вытопки воска включает следующие операции: подача в рабочую зону пароводяной смеси, эндогенный нагрев сырья за счет ЭМП СВЧ в процессе центрифугирования.

СВЧ-воскотопка содержит резонатор 3 в виде вращающегося перфорированного барабана внутри экранирующего корпуса 4 и СВЧ-генератор 7. Восковое сырье подается в рабочую зону резонатора 3 нагнетательным шнеком 5. Пароводяная смесь подается через вентиль 2. В нижней части корпуса расположен ТЭН 10 для подогрева частично вытопленного сырья. Слив растопленного воска осуществляется через кран 9. Расчетная производительность установки – до 10 кг/ч.

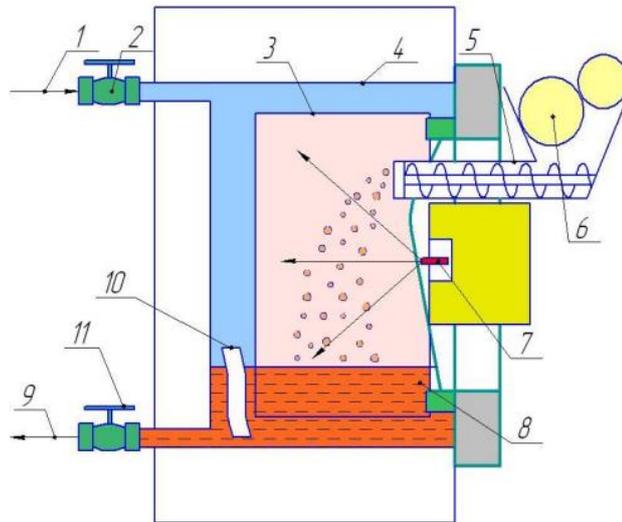


Рисунок 1.13 – СВЧ-воскотопка: 1 – горячая вода; 2 – вентиль для потока воды; 3 – резонаторная камера; 4 – экранный корпус; 5 – нагнетательный шнек; 6 – восковое сырье; 7 – СВЧ-генераторный блок с излучателем; 8 – вытопленный воск; 9 – слив вытопленного воска; 10 – ТЭН; 11 – вентиль [93]



Рисунок 1.14 – СВЧ-установка для разжижения меда УРМ-4

Известна *СВЧ-установка для разжижения вязких продуктов* УРМ-4 (рисунок 1.14) [63] и ее предшественники УРМ-1, УРМ-2 и УРМ-3 [88; 136], предназначенная для роспуска закристаллизованного меда. Имеет рабочую камеру, на дно которой устанавливается перевернутый контейнер с закристаллизованным медом. СВЧ-излучение от 2 магнетронов воздушного охлаждения к контейнеру передается по волноводу, нижний конец которого перфорирован. Через него распустившийся мед вытекает в приемную емкость, не успевая перегреться. Заявленная производительность установки – до 180 кг/ч, мощность СВЧ-излучения – 2 кВт, потребляемая энергия установки – до 3 кВт·ч, режим работы – повторно-непрерывный.

Известно, что в целях сушки вошинной ленты Р. Л. Филиппов использовал энергию ЭМПСВЧ [137]. Сущность состоит в предварительном удалении влаги с вошинной ленты сжатым воздухом, а затем досушивание ее в меандровой камере ЭМПСВЧ. С учетом диэлектрической проницаемости вошины, равной 1,27, иссле-

додал распределение ЭМП СВЧ на структуре специальной камеры при досушивании вошинной ленты в процессе ее производства. В своей работе [137] он доказал возможность стерилизации получаемого воска воздействием ЭМИ СВЧ.

Разработкой СВЧ-установки для переработки и стерилизации воскового сырья с применением энергии СВЧ-диапазона также занимался Киреев Ю. В. [42]. Он доказал, что внедрение технологии переработки воска с помощью энергии ЭМП СВЧ позволяет значительно сократить затраты электроэнергии.

Проанализировав применяемые в условиях пасек технологии и технические средства, пришли к выводу, что процесс вытопки воска осуществляется в основном путем воздействия на него горячим паром. При этом воскотопки работают по периодическому циклу и реализуют технологию термообработки, не предусматривающую сохранение содержащейся в восковом сырье остаточной фракции меда (5–7 %). В таблице 1.2 представлены значения затрат времени и приблизительные потери меда при переработке воскового сырья в пчеловодческих хозяйствах при использовании паровых воскотопок.

Таблица 1.2 – Параметры процесса переработки воскового сырья в пчеловодческих хозяйствах с использованием паровых воскотопок

Количество пчелосемей в хозяйстве	Годовой объем перерабатываемого воскового сырья, кг	Время на переработку воскового сырья, ч	Приблизительные потери меда, кг
10–20	30–50	$\geq 4,5$	≤ 1
20–30	50–100	5–15	3
30–40	100–150	15–23	4,5
40–50	150–200	23–30	6
50–100	200–550	30–84	9–17
≥ 100	≥ 550	≥ 84	≥ 18

В связи с этим разработка СВЧ-воскотопок непрерывно-поточного действия с обоснованными конструктивно-технологическими параметрами, реализующими способ вытопки воска при сниженных эксплуатационных затратах, позволяющими отделить от воскового сырья остаточную фракцию меда, является актуальной задачей.

1.3 Анализ физических характеристик воскового сырья

1.3.1 Физико-механические свойства пчелиного воска и меда

Восковое сырье является веществом светло-желтого цвета, получаемым в процессе жизнедеятельности медоносных пчел, выделяемым ими через восковые железы и используемым ими для постройки сотов. После откачки меда соты отправляют на вытопку для получения чистого продукта – воска. Влажность воскового сырья зависит от его восковитости [36; 41; 67].

Сырье с высокой восковитостью обладает наименьшей влажностью. Если влажность воскового сырья превышает 10 %, то долго его хранить нельзя, оно начинает плесневеть [67; 138]. Такое сырье рекомендуется быстрее отправить на переработку.

Сорта воскового сырья. Существует восковое сырье: первичное пасечное, пасечные вытопки, пасечная мерва, заводская мерва. Восковое сырье разных категорий отличается по качеству. В основу оценки воскового сырья положено содержание воска, не восковых компонентов и примесей [118].

Первичное пасечное восковое сырье включает: сушь-соты, непригодные для вывода расплода или складывания меда и перги. Это – поврежденные соты при извлечении меда, дырявые, плесневелые, старые. Восковитость в свежих сотах составляет 97–98 %. После однократного выведения расплода их восковитость снижается до 75,3 %, после трехкратного – до 63,4, а после девятикратного – до 49,6 %. По органолептическим признакам сушь всех сортов должна быть сухой, без меда, плесени, не пораженной молью [47].

Пасечные вытопки относятся к побочному продукту пчеловодческих хозяйств, применяющих сухой способ переработки воскового сырья. При этом их

восковитость может достигать 58 % при 6–8 % влажности. На воскобойных заводах из вытопок получают 20–30 % воска [35].

Пасечная мерва, так же как и вытопки, относится к побочному продукту, но уже влажной перетопки воскового сырья (паром или развариванием непосредственно в воде) с последующим отжимом при помощи прессов. При вытапливании воскового сырья с использованием пара восковитость мервы колеблется от 18 до 30 %. На заводах из мервы получают 18–20 % воска [38].

Сушь получается из выбракованных сот, непригодных для расплода. В зависимости от состояния сушь может быть трех сортов: 1 сорт – восковитость ≈ 70 %, 2 сорт – 55–69 %, 3 сорт 49–55 %, если ниже 49 % – сушь приравнивается к вытопкам [34].



Рисунок 1.15 –
Вид и цвет воска

К физическим свойствам пчелиного воска (рисунок 1.15) относят температуру плавления, температуру кристаллизации, плотность, теплоемкость и другие свойства. Цвет и запах воска обуславливаются содержанием в нем незначительных количеств красящих и ароматических веществ. Окраска воска от светло-желтого до темно-желтого цвета, при температуре ниже 20 °С он хрупкий, упруго-пластичный. С повышением температуры его упругость снижается, и при 35–38 °С воск становится пластичным. Температура плавления воска составляет 64 °С. В процессе нагрева воск меняет свою окраску на более интенсивную. Особенно если в его составе присутствуют мед, пыльца, прополис.

При достижении температуры нагрева 95–105 °С из воска начинает испаряться влага, при превышении 140 °С структура воска разрушается [34; 118; 138]. Относительная плотность пчелиного воска составляет 0,95–0,97, при температуре 20 °С. С повышением температуры его плотность снижается. Твердый воск плавает на поверхности воды, однако тонет в расплавленном воске [36].

Свойство пчелиного воска противостоять изменению формы под действием внешних сил характеризуется *коэффициентом твердости*, изменяющимся под действием температуры. Так, при повышении температуры воска с 15 до 45 °С ко-

эффициент твердости снижается. При дальнейшем нагревании воск становится все более пластичным и теряет способность противостоять деформации. При температуре плавления (64 °С) воск теряет свою форму и становится жидким. При температуре кипения (300 °С) воск разлагается и выделяет углекислый газ.

эффицент твердости уменьшается более, чем в 10 раз, воск становится пластичным. Далее при нагревании воска до температуры плавления $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ коэффициент твердости снижается до $1,78\text{ с/мм}$ [36; 118].

Вязкость. Консистенция расплавленного воска характеризуется вязкостью. При температуре плавления вязкость воска составляет $25,61\text{ мПа}$, а при температуре $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижается до $16,37\text{ мПа}$ [69]. С повышением температуры вязкость воска уменьшается (рис. 1.16) [34; 36; 69; 72]. Поэтому во время его переработки для улучшения его выхода из воскового сырья производят нагрев до как можно более высокой температуры, чтобы увеличить его текучесть [69; 80]. Для отделения из воскового сырья фракции меда необходимо увеличить его текучесть. Вязкость меда зависит от влажности, но в большей степени от температуры.

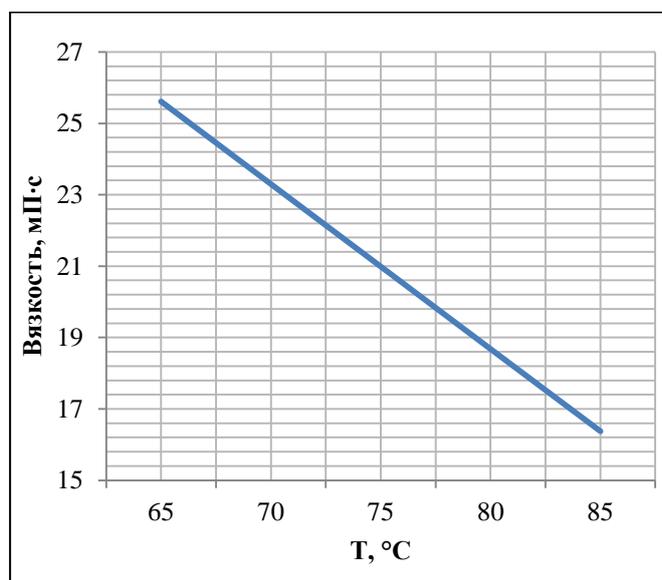


Рисунок 1.16 – Зависимость вязкости расплавленного воска от температуры нагрева [69]

ниже и выше температуры плавления воска $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ изменяется от $0,5$ до $0,6$ и соответственно от $0,7$ до $0,8$ на каждый градус температуры [130].

Согласно исследованию [164], начальная плотность воскового сырья составляет 442 кг/м^3 , а при нагревании до температуры $65\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивается более, чем в 2 раза (рис. 1.18).

Влажность меда не должна превышать 21% при температуре хранения $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Плотность пчелиного воска колеблется от $930\text{--}970\text{ кг/м}^3$ при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, при нагревании незначительно снижается [69].

Так при нагревании воска до $60\text{--}62\text{ }^{\circ}\text{C}$ его плотность снижается равномерно, но при достижении температуры плавления резко падает (рисунок 1.17). Температурный коэффициент плотности при температурах

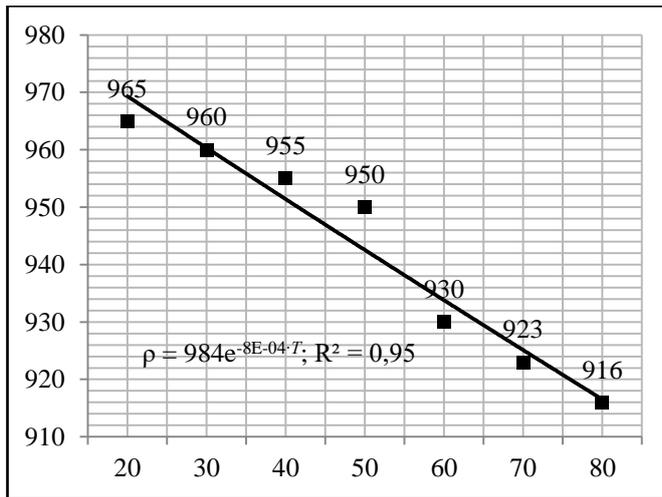


Рисунок 1.17 – Изменение плотности пчелиного воска в зависимости от температуры нагрева

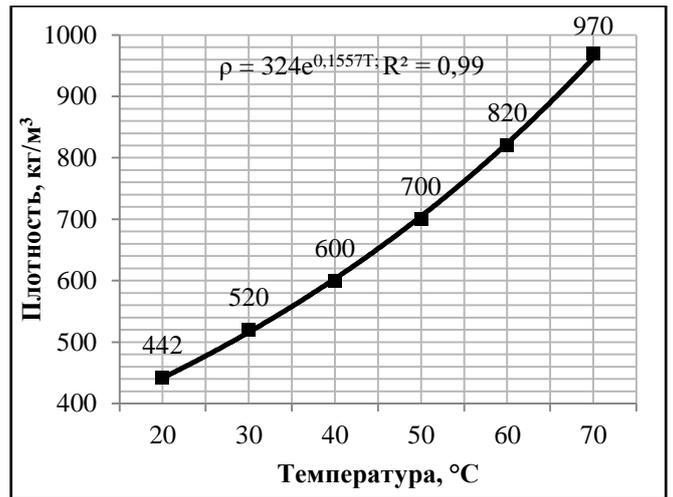


Рисунок 1.18 – Изменение плотности воскового сырья в зависимости от температуры нагрева

Теплоемкость воскового сырья зависит от агрегатного состояния, влажности и температуры. Начальная теплоемкость забруса находится в пределах 1,05 кДж/кг при 20 °C, а с повышением температуры увеличивается и при температуре 70 °C достигает от 2,44 до 3,34 кДж/кг·°C [69] (принимая значение 2,93 Дж/г·°C – значение для вытопленного воска) (рисунок 1.19).

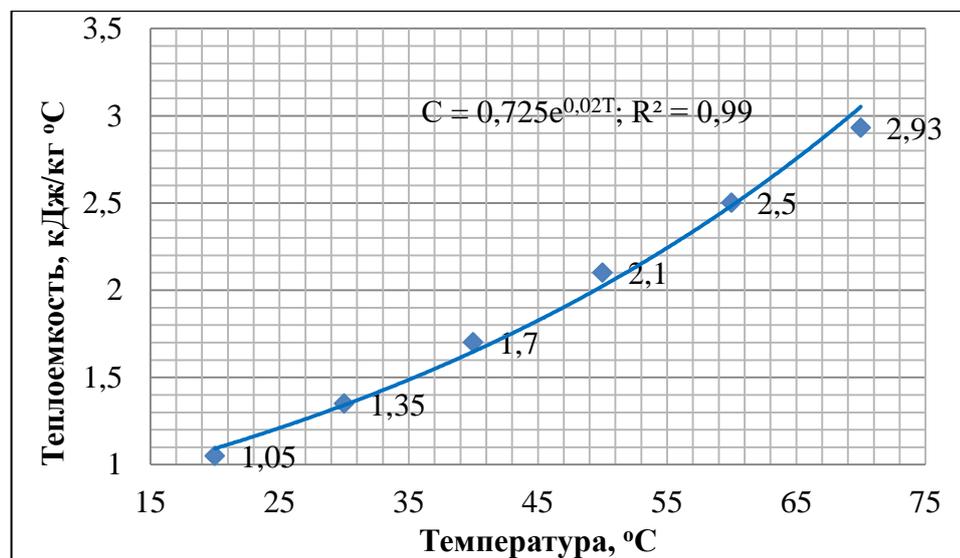


Рисунок 1.19 – Изменение теплоемкости воска в зависимости от температуры нагрева [69]

Эмпирические выражения, описывающие:

- изменение плотности (ρ) пчелиного воска в зависимости от температуры нагрева:

$$\rho = 984 \cdot e^{-8E-04 \cdot T}, \text{ кг/м}^3; \quad (1.1)$$

- изменение плотности (ρ^I) воскового сырья в зависимости от температуры нагрева:

$$\rho_I = 324 \cdot e^{0,0156 \cdot T}, \text{ кг/м}^3; \quad (1.2)$$

- изменение теплоемкости (C , Дж/г·°С) воскового сырья от температуры нагрева (T):

$$C = 0,725 \cdot e^{0,02 \cdot T}, \text{ кДж/кг} \cdot \text{°С}. \quad (1.3)$$

Физико-механические свойства пчелиного воска и меда:

1. Плотность меда – 1350 кг/м³.
2. Плотность воска – 930–970 кг/м³.
3. Начальная плотность воскового сырья – 442 кг/м³.
4. Теплоемкость воска – 2,93 кДж/кг·°С.
5. Теплоемкость воска при нагревании изменяется от 1,05 до 2,93 кДж/кг·°С.

Исследованием значений физических свойств воска и воскового сырья занимался Рогов А. А. [119]. В этом исследовании установлено, что плотность измельченного воскового сырья составляет при размере частиц менее 2 мм – 308 кг/м³, при размере частиц до 7 мм – до 251 кг/м³. При этом угол естественного откоса воскового сырья находился в пределах 33–35 градусов, а влажность – 4–4,5 %. При нагревании увеличивается коэффициент трения воскового сырья, при этом, чем меньше его частицы, тем больше коэффициент трения. Так при температуре 5–25 °С коэффициенты трения частиц сырья 2–4,5 и 4,5–7 мм практически равны и находятся в пределах 0,62–0,926 в покое и 0,249–0,59 в движении [119].

Также в [119] исследовалась липкость воскового сырья с учетом изменения температуры: при температуре 5 °С – 0,31 кПа; при 25 °С – 2,18 кПа.

Значение вязкости воскового сырья в расплавленном состоянии в диапазоне температур 70–90 °С уменьшается с 13,9 до 12,2 мПа·с.

Исследованы теплофизические параметры воскового сырья:

1) 24–32 °С восковое сырье с размерами частиц менее 2 мм имеет следующие значения параметров: температуропроводность увеличивается с $8,7 \cdot 10^8$ до $38,1 \cdot 10^8$ м²/с; коэффициент теплопроводности – с 0,032 до 0,29 Вт/(м·°С); удельной теплоемкости – с 1,05 до 1,18 кДж/(кг·°С) [119].

2) в диапазоне температур от 24 до 32 °С восковое сырье с размерами частиц 4,5–7 мм: температуропроводность увеличивается с $14,9 \cdot 10^8$ до $49,1 \cdot 10^8$ м²/с; коэффициент теплопроводности – с 0,08 до 0,42 Вт/(м·°С); удельная теплоемкость – с 1,05 до 1,64 кДж/кг·°С [119].

Сводная таблица параметров пчелиного воска приведена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Сводная таблица параметров пчелиного воска

Параметры воска	Значение	
	воск	восковое сырье
Температура плавления, °С	64–66	
Плотность, кг/м ³ при 20 °С	950	442
Теплоемкость при температуре 20 °С, кДж/кг·°С	2,93	1,05
Теплопроводность, Вт/м·°С	0,36	0,032–0,29
Температуропроводность, м ² /с	4,6–10	$8,7–38,1 \cdot 10^8$

1.3.2 Диэлектрические характеристики пчелиного воска и меда

Знание электрофизических параметров пчелиного воска в широком диапазоне частот и температур необходимо для выбора частоты электромагнитных колебаний, разработки технологического процесса вытопки сырья и установки, позволяющей реализовать данный процесс с эффективными конструкционно-технологическими параметрами. Ввиду того, что пчелиный воск относится к группе капиллярно-пористых коллоидных тел, поглощение и рассеивание ЭМИ в нем будет осуществляться за счет резонансного поглощения излучения молекулами сухого вещества и молекулами связанной воды [75]. Поведение в электромаг-

нитном поле пчелиного воска становится более ясным в результате анализа диэлектрических параметров в зависимости от частоты и температуры.

Изменения диэлектрических параметров (диэлектрической проницаемости ϵ , фактора диэлектрических потерь k , тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$) пчелиного воска в зависимости от частоты ЭМП (от 10 до 10 000 МГц) и от температуры (25 и 65 °С) приведены на рисунках 1.20 и 1.21 [148].

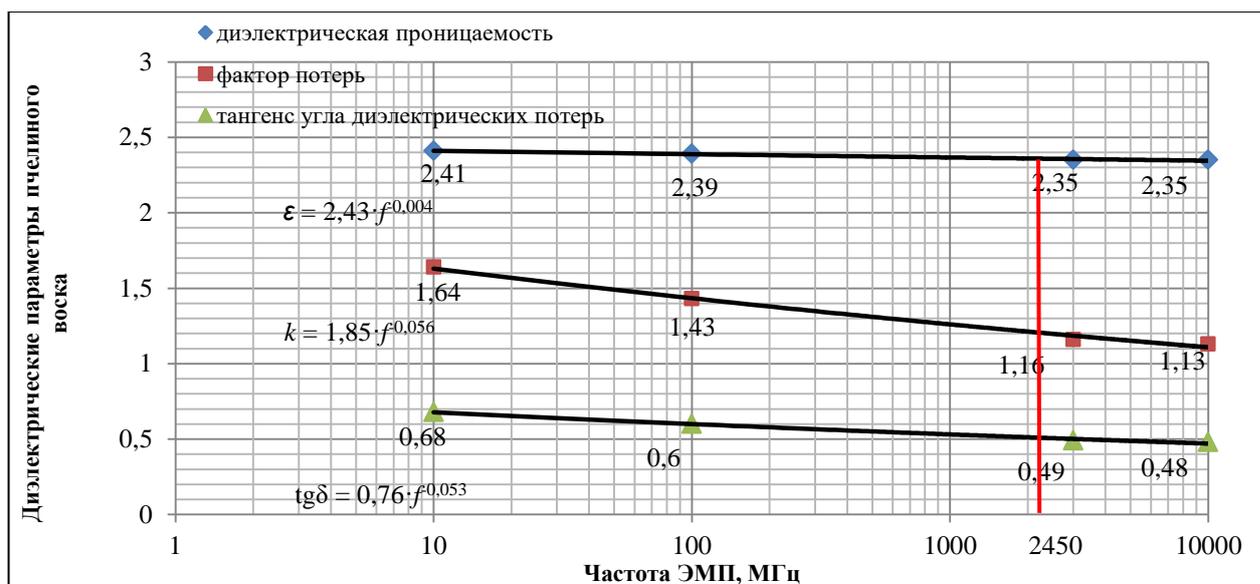


Рисунок 1.20 – Зависимость диэлектрических параметров пчелиного воска от частоты ЭМП [148, с. 90]

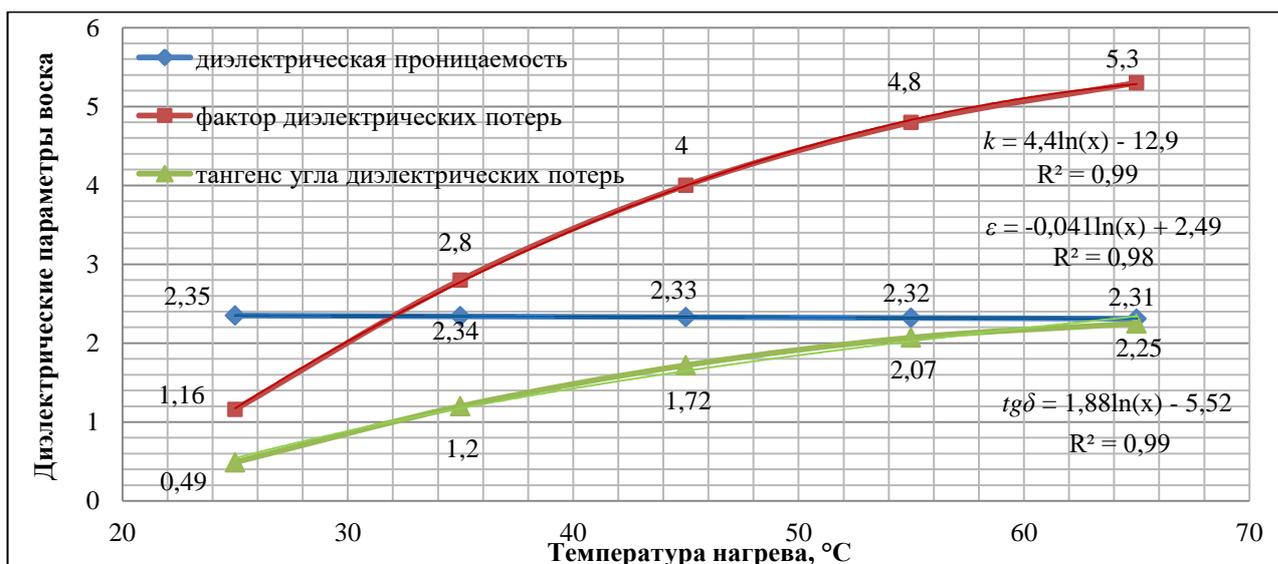


Рисунок 1.21 – Зависимость диэлектрических параметров пчелиного воска в диапазоне температур 25–65 °С [148, с. 90]

Согласно перечню частот, предназначенных для применения в промышленных, научных, медицинских и бытовых высокочастотных установках, утвержденному государственной комиссией по радиочастотам при Министерстве связи РФ, разрешенные частоты, на которых возможно создать объемный резонатор для СВЧ-установки, составляют 915 и 2450 МГц, с соответствующими длинами волн 32,78 и 12,24 см. Для частоты 915 МГц используются магнетроны водяного охлаждения, при этом удельная мощность, генерируемая в единице объема, уменьшается в 2,5 раза в сравнении с магнетронами, работающими на частоты 2450 МГц. Согласно данным Рогова И. А. (рис. 1.20) диэлектрические характеристики сырья на рассматриваемых частотах почти не отличаются.

Величина ε_r показывает, во сколько раз напряженность ЭП в сырье меньше напряженности ЭП в вакууме, k характеризует степень рассеивания энергии, другими словами, это показатель потерь энергии в сырье, $tg\delta$ характеризует отношение энергии (мощности), запасенной за период электромагнитных колебаний [75].

Диэлектрические параметры пчелиного воска в исследуемом диапазоне частот (от 10 до 10000 МГц) изменяются незначительно (рисунок 1.20) и характеризуются следующими эмпирическими выражениями:

$$\varepsilon_r = 2,43 \cdot f^{0,004}; \quad k = 1,85 \cdot f^{0,056}; \quad tg\delta = 0,76 \cdot f^{0,053}. \quad (1.4)$$

На выбранной частоте 2450 МГц при температуре 25 °С значения диэлектрических параметров пчелиного воска, по данным А. И. Рогова, следующие [148]:

$$\varepsilon_r = 2,35; \quad k = 1,16; \quad tg\delta = 0,49. \quad (1.5)$$

При нагревании пчелиного воска его диэлектрические параметры будут изменяться в соответствии с рисунком 1.21.

Диэлектрическая проницаемость пчелиного воска колеблется в пределах 2,35–2,31, фактор потерь – от 1,16 до 5,3, тангенс угла диэлектрических потерь – от 0,49 до 2,25 при изменении температуры с 25 до 65 °С.

Эмпирические выражения, описывающие зависимость диэлектрических параметров (k – фактора диэлектрических потерь, ε – диэлектрической проницаемости, $tg\delta$ – тангенса угла диэлектрических потерь) пчелиного воска от температуры нагрева T , °С:

$$k = 4,4\ln(T) - 12,9; \varepsilon = -0,041\ln(T) + 2,49; \operatorname{tg}\delta = 1,88\ln(T) - 5,52. \quad (1.6)$$

Знание диэлектрических параметров воска, меда и воскового сырья, а также динамики их изменения в процессе воздействия ЭМП СВЧ дает представление о том, как будет происходить процесс их термической обработки в создаваемой СВЧ-воскотопке.

1.3.3 Программа исследований технологического процесса термообработки воскового сырья

Исследование технологического процесса вытопки пасечного воска с отделением меда проводили в следующей последовательности:

1. Анализ физических параметров воскового сырья и меда.
2. Теоретические исследования динамики нагрева воскового сырья и меда в электромагнитном поле сантиметрового диапазона с учетом изменения электрофизических параметров воскового сырья от температуры при разных удельных мощностях генератора.
3. Разработка технологических схем воскотопки и 3D-модели четырех вариантов конструкционного исполнения двухрезонаторных СВЧ-воскотопок, предназначенных для вытопки пасечного воска с отделением остаточного меда с резонаторами нестандартных конструкций, линейные размеры которых в 5–6 раз превышают длину волны генератора.
4. Исследование собственной и нагруженной добротности резонаторов, напряженности электрического поля в сырье и резонаторах, реализованных в СВЧ-воскотопках двумя способами:

- 1) путем теоретических расчетов собственной добротности как удвоенное отношение объема резонатора, в котором запасается энергия ЭМП, к объему, за-

нимаемому поверхностным слоем резонатора с учетом толщины поверхностного слоя из алюминия с удельной проводимостью $35 \cdot 10^6$ См/м;

2) путем исследования основных ЭД-параметров системы «генератор–резонатор–сырье» в программе CST Microwave Studio.

5. Экспериментальные исследования динамики нагрева воскового сырья с содержанием меда от 5 до 7 % в ЭМПСВЧ (в микроволновой печи) при разных удельных мощностях генератора для выявления рациональных режимов работы СВЧ-воскотопок с разными конструктивными исполнениями резонаторов, путем решения регрессионных моделей в виде зависимостей температуры нагрева, удельных энергетических затрат от варьируемых факторов.

6. Создание опытного образца СВЧ-воскотопки непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами, фторопластовым винтовым шнеком, магнетронами воздушного охлаждения и запердельными волноводами, реализующего выявленные рациональные режимы работы.

7. Проведение экспериментальных исследований динамики нагрева воскового сырья и меда в опытном образце в выявленном рациональном режиме и сравнение с результатами теоретических исследований динамики нагрева сырья.

8. Исследование микробиологических и органолептических показателей вытопленного воска базового и проектного вариантов в Государственном бюджетном учреждении Нижегородской области «Государственное ветеринарное управление Княгининского района».

9. Обоснование режимов работы СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами с общим основанием и электроприводным винтовым шнеком, удовлетворяющих критериям проектирования СВЧ-техники: обеспечения электромагнитной безопасности при непрерывном режиме работы; снижения удельных энергетических затрат на вытопку воскового сырья; соответствия качества вытопленного воска по органолептической и микробиологической оценке.

1.4 Выводы

1. Анализ ресурсов и объемов производства меда в условиях пасеки в различных хозяйствах РФ показал, что наибольшее его количество (94 %) производится в хозяйствах населения, в которых сосредоточена основная масса пчелосемей. При этом доля мелких пчеловодческих хозяйств с количеством пчелосемей до 20 составляет 52 %, средних (20–49 пчелосемей) – 37 %, больших (до 100 пчелосемей) – 9 %, особо крупных (более 100 пчелосемей) – 2 %.

2. Анализ существующих устройств, предназначенных для вытопки пчелиного воска в пасечных условиях, показывает, что они достаточно эффективно работают только при подаче пара. Такой способ увеличивает выход воска, при этом энергетические затраты находятся в пределах от 0,5 до 1 кВт·ч/кг, значительная часть энергии идет на нагрев воды и образование пара. При этом все они обладают производительностью 1,5–6,5 кг/ч и в условиях больших и особо крупных пчеловодческих хозяйств не способны в короткие сроки переработать годовой объем воскового сырья (от 250 кг).

3. Анализ диэлектрических параметров пасечного воска ($\epsilon_r = 2,35$; $k = 1,16$; $\operatorname{tg}\delta = 0,49$), меда ($\epsilon_r = 2,94$, $k = 0,29$; $\operatorname{tg}\delta = 0,1$) и воскового сырья ($\epsilon_r = 2,39$) показывают, что использование ЭМПСВЧ в качестве источника энергии при переработке воскового сырья позволит снизить энергетические затраты на технологический процесс его вытопки и получение качественной продукции.

Знание электрофизических свойств воска и меда в широком диапазоне температур необходимо для разработки моделей взаимодействия сырья с ЭМПСВЧ и технологических процессов, а также для конструирования воскотопок с СВЧ-энергоподводом в объемные резонаторы.

В настоящее время слабо систематизированы, объединены результаты многочисленных исследований и не исчерпаны возможности дальнейшего совершенствования методик и СВЧ-техники для термообработки сельскохозяйственного сырья. Появлению новых областей применения СВЧ-техники способствует ряд

специфических свойств диэлектрического нагрева, которые позволяют существенно улучшить технологический процесс вытопки воскового сырья с отделением остаточного меда.

СВЧ-диапазон позволяет изменить конструкцию резонаторов так, чтобы электромагнитные поля полностью возбуждались внутри неполностью замкнутых неферромагнитных объемов, при этом сырье в них передвигалось бы в непрерывном режиме при ограничении излучений за счет реализации запердельных волноводов с заданными размерами.

Ввиду отсутствия широкого распространения СВЧ-энергии в технологических процессах агропредприятий считаем целесообразным реализацию микроволновой технологии переработки воскового сырья в СВЧ-воскотопках непрерывно-поточного действия.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-ВОСКОТОПКИ

2.1 Особенности тепловой обработки воскового сырья

Особенности нагрева сырья в ЭМПСВЧ. Мощность, выделяемая в сырье, помещенное в ЭМПСВЧ, определяется по тем же формулам, что и при нагреве в высокочастотном электрическом поле. Однако имеются особенности СВЧ-нагрева, связанные с тем, что глубина проникновения (Δ) ЭМПСВЧ становится не соизмеримой с размерами обрабатываемого сырья. Размер сырья не должен превышать 2 глубины проникновения волны. Сырье, измельченное, диаметром d и высотой h при $d = (2-5) \cdot h$, наилучшим образом удовлетворяет условиям СВЧ-нагрева [4; 5; 14; 15; 115; 127].

Рабочей камерой, разрабатываемой СВЧ-воскотопки, в которой происходит воздействие ЭМП на сырье, является резонаторная электродинамическая система. Такая электродинамическая (ЭД) система должна обеспечить необходимую мощность и напряженность электрического поля, высокую собственную добротность резонатора и выполнение требований, предъявляемых к технологическому процессу вытопки пчелиного воска с отделением остаточного меда. При этом необходимо реализовать необходимый температурный режим обработки. Резонаторная ЭД-система должна иметь устройства для непрерывной подачи сырья и выгрузки готовой продукции, обеспечивающие электромагнитную безопасность для обслуживающего персонала, например, заградительные волноводы. Рабочей камерой при этом служит объемный резонатор, обладающий резонансными свойствами, где установится стоячая волна (или бегущая волна в кольцевом резонаторе), образованная в результате многократных отражений электромагнитной волны от

его неферромагнитных стенок. Объемные резонаторы представляют собой колебательные системы, собственные частоты которых совпадают с резонансными частотами [4; 40]. Однако резонатор имеет множество собственных колебаний. Это зависит от числа полуволн, укладываемых вдоль стенок резонатора, и типа волны. Для стандартных конфигураций резонаторов имеются формулы, позволяющие определить резонансные длины волн в зависимости от конструктивных размеров, с учетом целого числа стоячих полуволн. Основными характеристиками объемного резонатора являются: резонансная частота, активная проводимость, собственная добротность, характеризующая отношение энергии, накопленной в резонаторе, к энергии, рассеянной в резонаторе за период колебаний [4; 40].

При расчете и конструировании резонансной электродинамической системы основными задачами являются: согласование рабочей полосы частот резонатора и генератора; обеспечение необходимой равномерности нагрева сырья; согласование объема загрузки сырья с мощностью генератора и со скоростью нагрева. При большой загрузке нагрузочная добротность резонатора падает, но согласовать ввод энергии в резонатор легче. Спектр собственных частот резонатора с большим объемом сырья с малыми значениями диэлектрической проницаемости почти не отличается от спектра резонатора без нагрузки. Для обеспечения максимальной добротности линейные размеры объемного резонатора СВЧ-воскотопки желательно должны быть кратными 5–6 раз длинам волны генератора (12,24 см) [4; 40]. Для увеличения равномерности нагрева сырья можно возбудить несколько собственных видов колебаний (*изменяя параметры резонатора*), имеющих различное расположение узлов и пучностей электрического поля. Можно вблизи ввода волны в резонатор располагать *диссектор*, который изменяет фазу отраженной волны, что, в свою очередь, вызывает изменение частоты, генерируемой магнетроном [4; 5; 40; 57]. Тогда еще более увеличивается число видов колебаний в резонаторе, а это обеспечивает более равномерное распределение электрического поля по объему резонатора. Для увеличения равномерности нагрева пчелиного воска можно возбуждать ЭМП в резонаторе 2–3 магнетронами, работающими на одной частоте 2450 МГц, соответственно длина волны 12,24 см. Применяя два и

более магнетрона, можно увеличить число возбуждаемых в данном частотном диапазоне видов колебаний, и значит увеличить равномерность электрического поля в резонаторе. Чтобы исключить выбивание одного магнетрона другим, необходимо обеспечить развязку между ними. Это возможно, если каждый излучатель СВЧ-энергии располагать вблизи узла магнитного поля колебаний, возбуждаемых другим излучателем [4; 5; 14; 15; 40]. Например, в тороидальном резонаторе три излучателя следует располагать с пространственным сдвигом на 120 градусов в конденсаторной части.

Проанализированы изменения диэлектрических параметров на частоте 2450 МГц от температуры нагрева воска (рисунок 1.21). Эмпирические выражения, описывающие зависимость диэлектрических параметров пчелиного воска от температуры нагрева T , °С:

$$k = 4,4 \cdot \ln(T) - 12,9; \varepsilon = -0,041 \cdot \ln(T) + 2,49; \operatorname{tg} \delta = 1,88 \cdot \ln(T) - 5,52. \quad (2.1)$$

Диэлектрические параметры **пчелиного воска** на при температуре 25 °С, по данным А. И. Рогова [148]: $\varepsilon_r = 2,35$; $k = 1,16$; $\operatorname{tg} \delta = 0,49$.

Плотность **пчелиного воска** 930–970 кг/м³ при температуре 20 °С.

Исходные данные меда:

Электропроводность основных сортов меда (в нашем случае липовый) $\sigma = 0,1$ – $0,4$ См/м, каштанового меда $\sigma = 1,2$ См/м [149].

Диэлектрическая проницаемость меда при электропроводности $\sigma = 0,4$ См/м:

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma}{(\omega \cdot \varepsilon_0)} = \frac{0,4}{(2 \cdot \pi \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12})} = 2,94, \quad (2.2)$$

для каштанового меда ($\sigma = 1,2$) диэлектрическая проницаемость равна 8,81.

Тангенс угла диэлектрических потерь меда [131, с. 230]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10} \cdot \sigma (\text{См} / \text{см})}{\varepsilon_r \cdot f} = \frac{1,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,4}{2,94 \cdot 2450 \cdot 10^6} = 0,1. \quad (2.3)$$

Фактор диэлектрических потерь меда:

$$k = \varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta = 2,94 \cdot 0,1 = 0,294. \quad (2.4)$$

Диэлектрические потери в восковом сырье

Представим диэлектрические потери в восковом сырье как потери в композиционных диэлектриках. Рассмотрим основные закономерности, используемые для расчета параметров смеси заданного состава (в восковом сырье 5–7 % меда). Считаем, что компоненты воскового сырья (пчелиный воск и мед) не вступают друг с другом в химические реакции, и они однородные по всему объему. Эффективная диэлектрическая проницаемость воскового сырья определяется по формуле [131, с. 167]:

$$\varepsilon_r = x_1 \cdot \varepsilon_{r1} + x_2 \cdot \varepsilon_{r2}, \quad (2.5)$$

где x_1, x_2 – доли объемного содержания (объемные концентрации) компонентов; $\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}$ – диэлектрические проницаемости компонентов воскового сырья.

Широкое применение имеет формула (2.6) Лихтенеккера (логарифмический закон смешивания):

$$\ln \varepsilon_r = x_1 \cdot \ln \varepsilon_{r1} + x_2 \cdot \ln \varepsilon_{r2}. \quad (2.6)$$

Для расчета диэлектрической проницаемости двухфазной смеси воска с медом (воскового сырья) как мелкодисперсной смеси с хорошо перемешанными компонентами формула (2.6) примет вид:

$$\ln \varepsilon_{\text{сырья}} = 0,07 \cdot \ln 2,94 + (1 - 0,07) \cdot \ln 2,35 = 0,87, \quad (2.7)$$

тогда диэлектрическая проницаемость воскового сырья равна $\varepsilon_{\text{сырья}} = 2,39$.

Диэлектрическая проницаемость воскового сырья с каштановым медом:

$$\ln \varepsilon_{\text{сырья}} = 0,07 \cdot \ln 8,81 + (1 - 0,07) \cdot \ln 2,35 = 0,947, \quad \varepsilon_{\text{сырья}} = 2,81. \quad (2.8)$$

Итак, диэлектрическая проницаемость пчелиного воска при температуре 25 °С равна 2,35, меда – 2,94, воска с медом – 2,39, с каштановым медом – 2,81.

Далее в расчетах принимаем, что в первом резонаторе воздействию ЭМП СВЧ подвергается восковое сырье, представленное как мелкодисперсная смесь компонентов воска и меда. Значения диэлектрических характеристик сырья при нагревании (20–45 °С) находим по формуле Лихтенеккера (2.6) в соответствии с рисунком 1.21. Для второго резонатора учитываем, что компоненты меда отделились из вос-

кового сырья, поэтому значения диэлектрических характеристик принимаем в соответствии с рисунком 1.21 в диапазоне температур 45–65 °С.

Согласование шага нагнетательного шнека с глубиной проникновения волны в восковое сырье. Для достижения равномерного нагрева сырья необходимо согласовать шаг нагнетательного шнека с глубиной проникновения волны в сырье, которую определяем по формуле [148, с. 105]:

$$\Delta = 2 \cdot c / \omega \cdot \sqrt{\varepsilon_r} \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (2.9)$$

где c – скорость распространения света в вакууме; $\omega = 2\pi \cdot f$ – частота ЭМП; ε , $\operatorname{tg} \delta$ – диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь воскового сырья (рисунок 1.28).

Расчетные значения глубины проникновения ЭМП в восковое сырье в зависимости от температуры приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Расчетные значения глубины проникновения ЭМП
в восковое сырье

Температура, °С	Глубина проникновения ЭМП в восковое сырье, м
25	$\Delta = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot \pi \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{2,39} \cdot 0,49} = 5 \text{ см}$
35	$\Delta = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot \pi \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{2,39} \cdot 1,2} = 2 \text{ см}$
45	$\Delta = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot \pi \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{2,33} \cdot 1,72} = 1,5 \text{ см}$
55	$\Delta = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot \pi \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{2,32} \cdot 2,07} = 1,2 \text{ см}$
65	$\Delta = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot \pi \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{2,31} \cdot 2,25} = 0,75 \text{ см}$
Глубина проникновения ЭМП в мед	
	$\Delta = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 3,14 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{2,94} \cdot 0,1} = 2,2 \text{ см}$

С изменением температуры нагрева воска изменяются диэлектрические параметры, следовательно, изменяется и глубина проникновения волны в восковое сырье (рисунок 2.1).

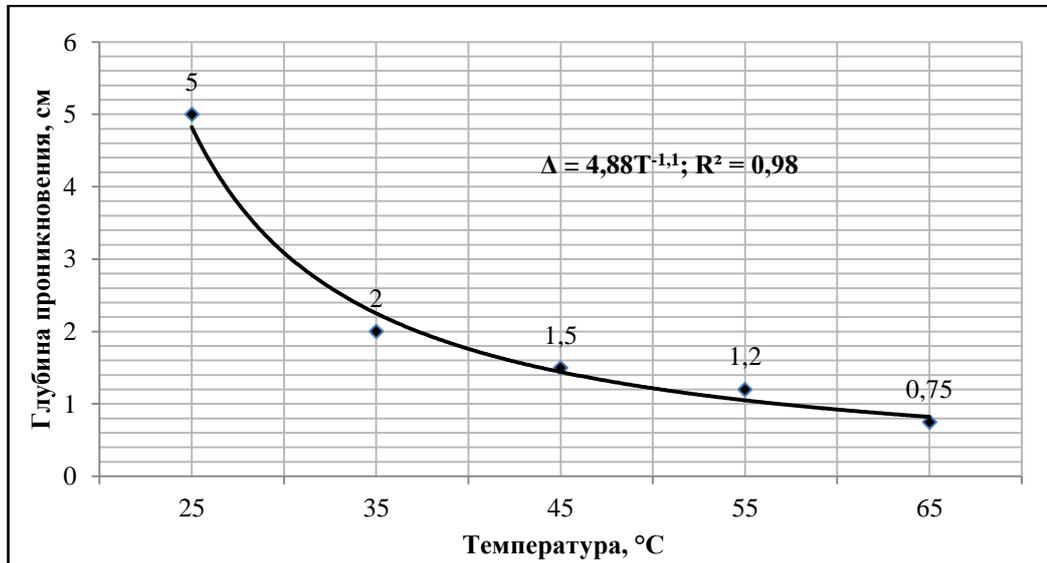


Рисунок 2.1 – Изменение глубины проникновения волны в восковое сырье

График изменения глубины проникновения волны в восковое сырье с изменением температуры описывается степенной зависимостью:

$$\Delta = 4,88 \cdot T^{-1,1} \text{ см.}$$

При определении производительности ($Q_{\text{шн}}$) нагнетательного шнека следует рассчитывать шаг винта как две глубины проникновения волны:

$$Q_{\text{шн}} = 0,785 \cdot (D^2 - d^2) \cdot s \cdot \rho \cdot \psi \cdot n \cdot 60, \quad (2.10)$$

где D – наружный диаметр винта, м; d – диаметр вала, м; s – шаг между винтами, м; ρ – объемная масса воскового сырья, кг/м³; ψ – коэффициент заполнения шнека (0,8–0,9), n – частота вращения вала шнека, мин.⁻¹.

Тогда

$$Q_{\text{шн}} = 0,785 \cdot (D^2 - d^2) \cdot 2 \cdot \Delta \cdot \rho \cdot \psi \cdot n \cdot 60 = 94,2 \cdot (D^2 - d^2) \cdot \Delta \cdot \rho \cdot \psi \cdot n, \text{ кг/ч.} \quad (2.11)$$

Сводные электрофизические параметры меда и воска и предварительные режимы работы установки приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Сводные электрофизические параметры меда и воска

Наименование	Мед	Воск	Восковое сырье
Теплоемкость, Дж/кг·°С	1553	2930	1050–2930
Температура плавления, °С	45	63,5–63,7	64–65
Плотность, кг/м ³	1350	961–968	442–970
Диэлектрическая проницаемость	2,94	2,31–2,39 ($\epsilon_r = -0,041\ln(T) + 2,49$)	
Фактор диэлектрических потерь ($T = 25–55$ °С)	0,29	1,16–5,3 ($k = 4,4\ln(T) - 12,9$)	
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,1	0,49–2,25 ($\text{tg}\delta = 1,88 \cdot \ln(T) - 5,52$)	
Глубина проникновения волны, см	2,2	5,0–0,75 (20–65 °С)	

2.2 Расчет электродинамических параметров системы «генератор–резонатор–сырье»

Известно, что колебательные контуры ВЧ-диапазона из сосредоточенных элементов в микроволновом диапазоне применить невозможно. Размеры контура при увеличении частоты ЭМП становятся соизмеримы с длиной волны. Контур начинает сильно излучать энергию, накапливание энергии становится невозможным, возникают потери. При наличии потерь энергии резонанс менее выражен, поэтому применению подлежат колебательные системы, состоящие из элементов с распределенными параметрами. В этом случае энергия системы остается в пределах ограниченного объема [127]. Переменное электрическое поле возбуждает переменное магнитное поле, и наоборот. Электрическое и магнитное поля непрерывно обмениваются энергией в любой точке пространства. При устранении излучения и исключении потерь, то указанный обмен между электрическим и магнитным полем будет долгосрочным. Поэтому в закрытом объемном резонаторе, заполненном средой, будет протекать незатухающий колебательный процесс. Закрытые резонаторы применимы только для сантиметровых волн, так как в нем

устанавливаются стоячие волны, поле которых не изменяется по фазе и в пространстве [4; 5]. Уравнения Максвелла свидетельствуют о постоянном фазовом сдвиге во времени электрического и магнитного полей на 90° . Есть резонаторы бегущих волн, поле которых можно создать в замкнутом объеме, образовав из направляющей системы замкнутую цепь. Это кольцевой и тороидальный резонаторы, в сечении которых находятся источники, возбуждающие волну, распространяющуюся по кольцу только в одном направлении. Если средняя длина кольца равна целому числу волн в линии, то фаза волны, прошедшей по кольцу, совпадает в сечении с фазой волны, возбуждаемой источником. Происходит синфазное сложение волн и, следовательно, увеличение амплитуды поля [5; 127]. Строгий электродинамический анализ возможен для объемных резонаторов, ограниченных проводящей оболочкой простой геометрической формы. На практике применяются резонаторы сложной геометрии. Их расчет производят приближенными методами. Одним из таких методов является замена объемного резонатора эквивалентным контуром, имеющим ту же собственную длину волны, что позволяет рассматривать их как обычные колебательные контуры с сосредоточенными параметрами, например для *тороидального* резонатора. Причем те части объема, где концентрируется энергия электрического и магнитного полей, эквивалентны соответственно емкостному и индуктивному элементам контура [4; 5]. Также при моделировании установки может быть применен метод частичных областей, когда резонатор сложной формы условно разбивается на ряд простых областей. В каждой такой области находится поле или соответствующие эквивалентные параметры. После этого на границах раздела проводится «сшивание» результатов, соответствующих граничным условиям. Это может быть: непрерывность тангенциальных составляющих поля, равенство потоков мощности через поверхности раздела, равенство характеристических сопротивлений на границе раздела, равенство абсолютных значений входных сопротивлений на границе раздела соседних областей и т. д. [55].

Анализируя особенности существующих воскотопок, разработаны четыре варианта исполнения двухрезонаторных СВЧ-воскотопок, предназначенных для отде-

ления фракции меда и вытопки пасечного воска, отличающиеся конструктивными исполнениями объемных резонаторов.

Первая воскотопка содержит две неферромагнитные полусферы, состыкованные с общим основанием (патент № 2770496) [87].

Во *второй воскотопке* сферический резонатор установлен внутри кольцевого резонатора (патент № 2737142) [85].

Третья воскотопка содержит взаимосвязанные резонаторы в виде цилиндра и сферы (патент № 2728659) [84].

В *четвертой воскотопке* два цилиндрических резонатора состыкованы последовательно, внутри которых расположены фторопластовые электроприводные винтовые шнеки (патент № 2740095) [86].

Для отделения меда от воскового сырья необходимо увеличить текучесть за счет диэлектрического нагрева до 45 °С. Если нагреть мед выше 45 °С, в нем разрушаются ферменты и витамины, так как у меда начинает меняться структура – становится более текучей и темнеет. Все эти рекомендации предусмотрены в разработанных и описанных ниже установках.

Итак, результатом расчетов и теоретических исследований должно быть обоснование соотношения геометрических размеров резонатора, обеспечивающих равномерный нагрев сырья, максимальную собственную добротность и эффективную напряженность электрического поля в резонаторе и в сырье.

Проведен теоретический расчет электродинамических параметров резонаторов двухмодульных СВЧ-воскотопок, а именно: собственной и нагруженной их добротности, напряженности электрического поля в резонаторах и сырье. Для этого на основании формул Пчельникова Ю. Н., Корчагина Ю. В., Стрекалова А. В. и др. выработана методика согласования ЭД-параметров резонаторов разной конфигурации с мощностью СВЧ-генераторов, электрофизическими параметрами сырья и скоростью его нагрева, представленная в таблице 2.3 [48; 115; 127].

Таблица 2.3 – Методика согласования ЭД-параметров резонаторов с удельной мощностью генераторов, электрофизическими параметрами сырья и скоростью его нагрева

№	Последовательность согласования
1	Вычислить объем ($V, \text{м}^3$) и площадь ($S, \text{м}^2$) поверхности резонатора и выбрать мощность генератора ($P_{ген}, \text{Вт}$)
2	<p>Вычислить собственную добротность (Q) объемного резонатора:</p> $Q = \frac{2 \cdot V}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot S}, \quad (2.12)$ <p>где $1,716 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ – толщина поверхностного слоя алюминиевого корпуса резонатора</p>
3	<p>Вычислить напряженность электрического поля ($E, \text{кВ/см}$) в резонаторе с учетом мощности генератора ($P, \text{Вт}$), частоты ЭМП ($f, \text{Гц}$) и диэлектрической проницаемости вакуума $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ по методике Ю. Н. Корчагина [48]:</p> $E = \frac{Q \cdot P_{ген}}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \epsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_{рез}} \quad (2.13)$
4	Определить зависимость диэлектрической проницаемости (ϵ_r) и фактора диэлектрических потерь (k) воска от температуры по данным Рогова И. А. [148]
5	<p>Вычислить диэлектрические параметры меда через его удельную электропроводность ($\sigma, \text{См/см}$) по методике И. А. Рогова [148]:</p> $\epsilon_r = \frac{\sigma}{(2 \cdot \pi \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12})}, \quad k = \frac{\sigma}{(\omega \cdot \epsilon_0 \cdot tg\delta)}, \quad (2.14)$ <p>где $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь</p>
6	<p>Вычислить диэлектрическую проницаемость двухкомпонентной смеси (воска с медом), используя формулу Лихтенеккера. Для мелкодисперсной смеси с хорошо перемешанными компонентами:</p> $\ln \epsilon_r = x_1 \cdot \ln \epsilon_1 + (1 - x_1) \cdot \ln \epsilon_2, \quad (2.15)$ <p>где x_1 – объемная концентрация меда (7 %); $(1 - x_1)$ – объемная концентрация воска (1-0,07); ϵ_1, ϵ_2 – диэлектрические проницаемости меда и воска соответственно</p>
7	<p>Вычислить нагруженную добротность резонаторов (Q_m) с учетом диэлектрической проницаемости сырья (ϵ_r) (воск или воск с медом):</p> $Q_m = \frac{Q}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.16)$

Продолжение таблицы 2.3

8	<p>Вычислить напряженность ЭП в сырье (E_m, кВ/см) объемом (V_m, см³). Варьировать объем загружаемого сырья с соответствующими значениями диэлектрической проницаемости:</p> $E_m = \frac{Q_m \cdot P_{ген}}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m} \quad (2.17)$
9	<p>Вычислить удельную мощность, генерируемую в единице объема сырья (Вт/см³) по методике А. В. Лыкова [58]:</p> $P_{y\partial} = 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot k \cdot E_m^2 = 1362,2 \cdot 10^{-6} \cdot k \cdot E_m^2, \text{ Вт} / \text{ м}^3 =$ $= 1362,2 \cdot 10^{-6} \cdot k \cdot E_m^2 \cdot 10^6, \text{ Вт} / \text{ см}^3 = 1362,2 \cdot k \cdot E_m^2. \quad (2.18)$
10	<p>Вычислить при удельной мощности генератора ($P_{y\partial}$, кВт/см³) продолжительность воздействия ЭМП СВЧ (τ) с учетом напряженности ЭП (E_m, кВ/см):</p> $\Delta\tau = 1,67 \cdot \frac{\Delta T}{P_{y\partial}} \cdot \rho \cdot C = \frac{1,67 \cdot \rho \cdot C \cdot \Delta T}{1362,2 \cdot k \cdot E_m^2} \quad (2.19)$
11	<p>Вычислить производительность (Q, кг/ч) воскотопки как отношение массы загрузки сырья к продолжительности воздействия ЭМП СВЧ:</p> $Q = G \div \tau \quad (2.20)$
12	<p>Оценить эффективную конструкцию двухрезонаторной СВЧ-воскотопки сравнением собственных добротностей, напряженностей ЭП в резонаторе и в сырье, потребляемой мощности, удельных энергетических затрат, компактности</p>

Получены эмпирические выражения, характеризующие зависимость напряженности электрического поля в воске от температуры нагрева при равном объеме загрузки 0,009 м³ в разные конфигурации резонаторов (для второго резонатора воскотопок).

1. Полусферический резонатор:

$$E_m = 40,72 \cdot (-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49)^{-1,5} \frac{\text{кВ}}{\text{см}}. \quad (2.21)$$

2. Кольцевой резонатор:

$$E_m = 36,65 \cdot (-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49)^{-1,5} \text{ кВ} / \text{ см}. \quad (2.22)$$

3. Сферический резонатор:

$$E_m = 48,70 \cdot (-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49)^{-1,5} \frac{\text{кВ}}{\text{см}}. \quad (2.23)$$

4. Цилиндрический резонатор:

$$E_m = 40,72 \cdot (-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49)^{-1,5} \text{ кВ} / \text{ см}. \quad (2.24)$$

Результаты вычисления электродинамических параметров системы «генератор–резонатор–сырье» приведены в таблицах 2.4–2.5. Расчеты ЭД-параметров резонаторов различной конфигурации представлены в приложении И.

Таблица 2.4 – Сравнительные электродинамические параметры резонаторов разных конструкций при мощности генератора **850 Вт**, объеме $0,06 \text{ м}^3$ и загрузке воскового сырья объемом $0,009 \text{ м}^3$ (первый резонатор СВЧ-воскотопки)

Параметры резонаторов	Резонаторы			
	Полусферический, патент № 2770496	Сферический, патент № 2737142	Цилиндрический, патент № 2728659	Цилиндрический, патент № 2740095
Радиус ($r, R, \text{м}$), высота ($H, \text{м}$) и площадь поверхности ($S, \text{м}^2$)	$R = 0,306,$ $S = 0,882$	$R = 0,244,$ $S = 0,748$	$R = 0,306,$ $H = 0,204,$ $S = 0,98$	$R = 0,1836,$ $H = 0,5508,$ $S = 0,8472$
Собственная добротность, Q	79254	94794	71329	80224
Напряженность ЭП в резонаторе, кВ/см	3,05	3,65	2,75	3,09
Нагруженная добротность, Q_m	49246	58878	44304	49226
Напряженность ЭП в сырье, кВ/см	4,88	5,84	4,4	5,57

Таблица 2.5 – Сравнительные электродинамические параметры резонаторов разных конструкций при общей мощности 2 генераторов **1700 Вт**, объеме $0,06 \text{ м}^3$ и загрузке сырья (воск) объемом $0,009 \text{ м}^3$ (второй резонатор СВЧ-воскотопки)

Параметры резонаторов	Резонаторы			
	Полусферический, патент № 2770496	Кольцевой, патент № 2737142	Сферический, патент № 2728659	Цилиндрический, патент № 2740095
Радиус ($r, R, \text{м}$), высота ($H, \text{м}$), длина ($L, \text{м}$) и площадь поверхности ($S, \text{м}^2$)	$R = 0,306,$ $S = 0,882.$	$r = 0,1224 \text{ м},$ $R = 0,2031,$ $L = 1,2755,$ $S = 0,981$	$R = 0,244,$ $S = 0,7478$	$R = 0,1836,$ $H = 0,5508,$ $S = 0,8472$
Собственная добротность, Q	79254	71329	94794	80224
Напряженность ЭП в резонаторе, кВ/см	6,11	5,5	7,31	6,18
Нагруженная добротность, Q_m	51699... 52175	46529... 46927	61836... 62364	52332... 52783
Напряженность ЭП в восковом сырье, кВ/см	11,3...11,37	10,17...10,44	13,51...13,87	11,5...11,64

Примечание. В процессе нагрева с 20 до $65 \text{ }^\circ\text{C}$ диэлектрическая проницаемость воска ϵ_r изменяется в пределах значений $2,35...2,31$ или описывается эмпирическим выражением $\epsilon_r = -0,041 \cdot \ln(T) + 2,49$.

Результаты исследования электродинамических параметров системы с восковым сырьем с диэлектрической проницаемостью 2,39 (первый резонатор) показывают, что:

1) максимальной собственной добротностью 94794 обладает сферический резонатор, а минимальной 71329 – кольцевой резонатор;

2) нагруженная добротность с восковым сырьем при температуре 20 °С равна:

- полусферического резонатора 49246;
- сферического резонатора 58878;
- цилиндрического резонатора 44304 ($R = 0,306$ м, $H = 0,204$ м);
- цилиндрического резонатора 49226 ($R = 0,1836$ м, $H = 0,5508$ м);

3) напряженность электрического поля в восковом сырье:

- в полусферическом резонаторе 4,88 кВ/см;
- в сферическом резонаторе 5,84 кВ/см;
- в цилиндрическом резонаторе 4,4 кВ/см ($R = 0,306$ м, $H = 0,204$ м);
- в цилиндрическом резонаторе 5,57 кВ/см ($R = 0,1836$ м, $H = 0,5508$ м).

Результаты исследования электродинамических параметров системы показывают, что разработанные конструкции резонаторов, размеры которых рекомендованы теорией электромагнитного поля [115, с. 50] при частоте 2450 МГц пятикратными длине волны 12,24 см, при равных их объемах ($0,06$ м³) для термообработки воскового сырья при температуре 45–65 °С с диэлектрической проницаемостью 2,35–2,31, показывают, что:

- максимальной собственной добротностью 94794 обладает сферический резонатор, минимальной 71329 – кольцевой резонатор;

- напряженность электрического поля в сферическом резонаторе 7,31 кВ/см, в кольцевом 5,5 кВ/см (из-за низкой собственной добротности), в полусферическом 6,1 кВ/см, в цилиндрическом резонаторе 6,18 кВ/см;

- нагруженная добротность в процессе нагрева воска увеличивается в среднем на 0,85–0,92 %: в сферическом резонаторе 61836–62364; полусферическом 51699–52175; цилиндрическом 52332–52783, в кольцевом 46529–46927;

- напряженность электрического поля в восковом сырье в процессе нагрева в полусферическом резонаторе 11,3–11,37 кВ/см; в кольцевом резонаторе 10,17–10,44 кВ/см; в сферическом резонаторе 13,51–13,87 кВ/см; в цилиндрическом резонаторе 11,5–11,64 кВ/см, такая напряженность электрического поля ниже половины пробивной напряженности электрического поля в воздухе 15 кВ/см.

2.3 Результаты исследования напряженности ЭП в сырье при разных объемах загрузки воскового сырья

Все расчеты проведены на основании алгоритма, указанного в таблице 2.3.

1. Объем сырья $V_m = 0,0045 \text{ м}^3$ (загрузка шнека 50 %), общая масса вместе с шнеком 2725 г, удельная мощность **0,62** Вт/г (объем сырья и фторопластового шнека составит $0,0055 \text{ м}^3$).

Напряженность ЭП в пчелином воске при объеме загрузки $0,0045 \text{ м}^3$:

$$E_m = \frac{Q_m \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m} = \frac{(51699...51141) \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (2,35...2,31) \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,0055} = 18,49 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}. \quad (2.25)$$

Рекомендуется работать при напряженности электрического поля менее 15 кВ/см. Следовательно, следует загружать в резонатор сырье большего объема или уменьшить мощность генератора.

2. Объем сырья $V_m = 0,0054 \text{ м}^3$ (загрузка шнека 60 %), общая масса вместе с шнеком 2870 г, удельная мощность **0,59** Вт/г (объем сырья и фторопластового шнека составит $0,0063 \text{ м}^3$).

Напряженность ЭП в восковом сырье составит:

$$E_m = \frac{(51699...51141) \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (2,35...2,31) \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,0063} = 15,97 - 16,15 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}. \quad (2.26)$$

3. Объем сырья $V_m = 0,0063 \text{ м}^3$ (загрузка шнека 70 %), общая масса вместе с шнеком 3015 г, удельная мощность **0,56 Вт/г** (объем сырья и фторопластового шнека составит $0,0072 \text{ м}^3$).

$$E_m = \frac{(51699...51141) \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (2,35...2,31) \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,0072} = 13,97 - 14,12 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}. \quad (2.27)$$

Снижение напряженности ЭП в сырье ниже рекомендованного значения 15 кВ/см происходит при удельной мощности 0,36 Вт/г, следовательно загружать шнек необходимо минимум на 70 %.

4. Объем сырья $0,0072 \text{ м}^3$ (загрузка шнека 80 %), общая масса вместе с шнеком 3160 г, удельная мощность **0,53 Вт/г** (объем сырья и фторопластового шнека составит $0,0081 \text{ м}^3$).

$$E_m = \frac{(51699...51141) \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (2,35...2,31) \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,0081} = 12,42 - 12,56 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}. \quad (2.28)$$

5. Объем сырья $0,0081 \text{ м}^3$ (загрузка шнека 90 %), общая масса вместе с шнеком 3305 г, удельная мощность **0,51 Вт/г** (объем сырья и фторопластового шнека составит $0,009 \text{ м}^3$).

$$E_m = \frac{(51699...51141) \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (2,35...2,31) \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,009} = 11,18 - 11,3 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}. \quad (2.29)$$

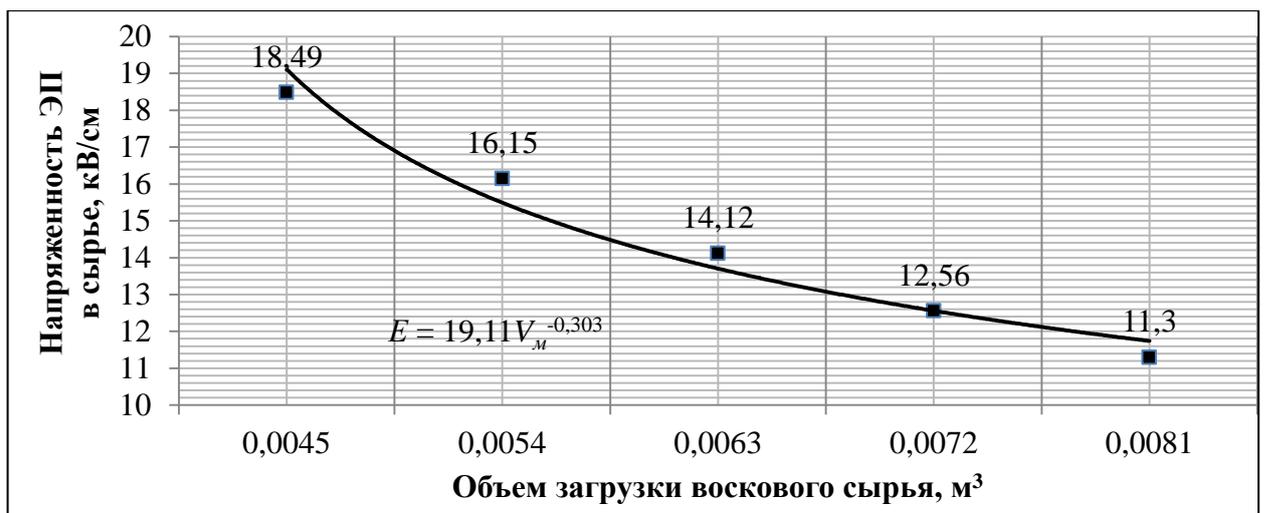


Рисунок 2.2 – Зависимость напряженности ЭП в восковом сырье от объема его загрузки в резонатор объемом $0,06 \text{ м}^3$ при мощности генератора 1700 Вт

Зависимость напряженности электрического поля в восковом сырье от объема его загрузки в резонатор объемом $0,06 \text{ м}^3$ при мощности генератора 1700 Вт приведена на рисунке 2.2.

Результаты получены на основании расчетов, проведенных в соответствии с алгоритмом, приведенным в таблице 2.3. График описан эмпирическим выражением, в виде уравнения тренда

$$E = 19,11 \cdot V_M^{-0,303} \text{ кВ/см.} \quad (2.30)$$

График зависимости удельной мощности генератора от объема загрузки воскового сырья в резонатор объемом $0,06 \text{ м}^3$ при мощности генератора 1700 Вт приведен на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Зависимость удельной мощности генератора от объема загрузки воскового сырья в резонатор объемом $0,06 \text{ м}^3$ при мощности генератора 1700 Вт

Эмпирическое выражение, описывающее зависимость удельной мощности генератора от объема загрузки пчелиного воска в резонатор:

$$P_{уд} = 0,44 \cdot V_M^{-0,21}. \quad (2.31)$$

График зависимости напряженности ЭП от массы загрузки воскового сырья в резонатор объемом $0,06 \text{ м}^3$ при мощности генератора 1700 Вт приведен на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Зависимость напряженности ЭП от массы загрузки воскового сырь в резонатор объемом 0,06 м³ при мощности генератора 1700 Вт

Эмпирическое выражение, описывающее зависимость напряженности ЭП от массы (G) загрузки воскового сырь в резонатор:

$$E_m = 19,11 \cdot G^{-0,303}. \quad (2.32)$$

Оптимальной считаем загрузку шнека на 90 %, при которой удельная мощность генератора составляет 0,51 Вт/г, среднее значение напряженности ЭП в сырье – 11,3 кВ/см.

2.4 Исследование динамики нагрева воскового сырь

Для исследования динамики нагрева пасечного воскового сырь необходимо учесть изменения его электрофизических параметров в процессе воздействия ЭМП СВЧ. Анализировалось, как изменяется в зависимости от температуры диэлектрическая проницаемость (ϵ), тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$), фактор диэлектрических потерь (k), теплоемкость (C , Дж/кг·°С) и плотность (ρ , г/см³)

воска и меда. Изменения диэлектрических параметров в зависимости от температуры изучал И. А. Рогов [148]. В первом разделе нами анализированы диэлектрические параметры сырья (см. раздел 1, рисунки 1.17–1.21).

Эмпирические выражения, описывающие зависимость диэлектрических параметров пчелиного воска от температуры:

$$- k = 4,4 \ln(x) - 12,9 \text{ (фактор диэлектрических потерь);}$$

$$- \varepsilon_r = -0,041 \ln(x) + 2,49 \text{ (диэлектрическая проницаемость);}$$

$$- \operatorname{tg} \delta = 1,8818 \ln(x) - 5,52 \text{ (тангенс угла диэлектрических потерь).}$$

Плотность воскового сырья изменяется в пределах 440–960 кг/м³ при нагревании с 20 до 65 °С.

По величине диэлектрической проницаемости можно оценить способность пчелиного воска накапливать энергию. Фактор диэлектрических потерь характеризует степень рассеивания энергии в воске, а тангенс угла диэлектрических потерь определяет отношение энергии, затраченной на нагрев воска, и энергии, запасенной за период электромагнитных колебаний, т. е. является мерой потерь энергии в воске [17, с. 259].

Для определения количества теплоты, выделяемой в единице объема воска, надо рассчитать удельные диэлектрические потери, т. е. потери мощности в единице объема ($P_{уд}$) по формуле 2.33 [17, с. 259]. Удельные диэлектрические потери зависят от параметров электрического поля, а именно от частоты ЭМП (f , Гц) и квадрата напряженности (E , В/см), а также от фактора диэлектрических потерь (k) (значение k для воскового сырья принимаем 4–5,3 в соответствии с рисунком 1.21).

$$\begin{aligned} P_{уд} &= 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot k \cdot E^2 \text{ (В / см)} = \\ &= 1362,2 \cdot 10^{-6} \cdot k \cdot E^2, \text{ (Вт / м}^3\text{)} = 1362,2 \cdot 10^{-6} \cdot (4 \dots 5,3) \cdot (11300)^2 = \\ &= (695757 \dots 921878) \text{ Вт / м}^3 = 0,69 \dots 0,92 \text{ Вт / см}^3. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Расчет динамики нагрева воскового сырья в первом резонаторе позволил получить данные, представленные в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Динамика нагрева воскового сырья в первом резонаторе

Температура, °С	20	35	45
Плотность, г/см ³	0,442	0,55	0,58
Фактор диэлектрических потерь воскового сырья (воск и мед)	3	3,5	4
Удельная мощность $P_{уд1}$, Вт/см ³	0,69	0,8	0,92
Продолжительность нагрева, мин		1,0	0,67
		Итого	1,67 мин

Расчетное время, за которое фракция меда отделится от воскового сырья в первом полусферическом резонаторе СВЧ-воскотопки, составляет 1 минута 40 секунд.

С учетом теплоемкости воскового сырья 1,7–2,93 Дж/г·°С в диапазоне температур 45–65 °С и его плотности $\rho = 0,6–0,97$ г/см³ через выражения удельной мощности (формула 2.20) вычислена продолжительность вытопки воскового сырья. Расчетные данные сведены в таблицу 2.7.

Таблица 2.7 – Динамика нагрева воскового сырья во втором резонаторе

Диапазон температур нагрева, °С	Продолжительность нагрева, с / мин (среднее значение)
45–50	13,5/0,22
50–55	28,7/0,47
55–60	51,1/0,85
60–65	107,3 /1,78
Общее время	200,6/3,34

Принимаем расчетное время продолжительности нагрева воскового сырья во втором полусферическом резонаторе с 45 до 65 °С равным 200,6 с (3 мин 20 секунд). Динамика нагрева воскового сырья в первом и втором резонаторах представлена на рисунке 2.5.

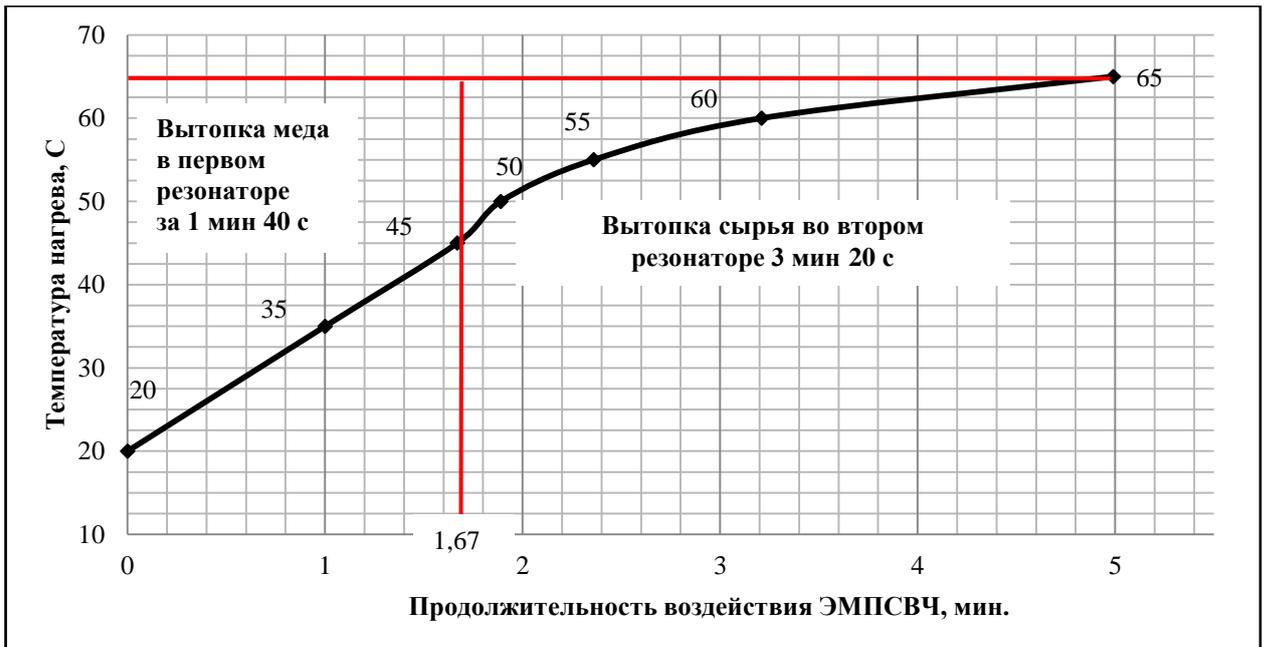


Рисунок 2.5 – Динамика нагрева воскового сырья в первом (0,85 кВт) и втором (1,7 кВт) полусферических резонаторах

Итак, восковое сырьё с содержанием 5–7 % меда в первом резонаторе разогревается до 45 °C за 1,67 мин, а во втором резонаторе вытопка воска из сырья происходит за 3,34 мин. Общая продолжительность термообработки составляет 5 мин. При загрузке шнека на 90 % общая масса воскового сырья в обоих резонаторах составит 2,3 кг. Из-за непрерывного режима работы лабораторного образца СВЧ-воскотопки каждые пять минут выгрузке подлежат 2,3 кг готового продукта, тем самым, путем расчетов, определена производительность установки, равной 27,6 кг/ч.

Время вытопки воскового сырья во втором резонаторе в 2 раза больше времени, затрачиваемого на вытопку фракции меда. Поскольку шаг винта во втором резонаторе не должен превышать 1,5 см (2 глубины проникновения ЭМП в сырьё), шаг витка в первом резонаторе принимаем 3 см при скорости вращения шнека 6 об./мин.

2.6 Интерференция волн в полусферическом резонаторе

По методике Яворского Б. М. [150] проводили вычисление интерференции волн двух излучателей, расположенных во втором резонаторе с определенным сдвигом (рисунок 2.6). Принимаем в расчет, что во втором резонаторе использовались магнетроны одной марки (работающие на одинаковой частоте, одной мощности, имеющие одинаковое анодное напряжение).

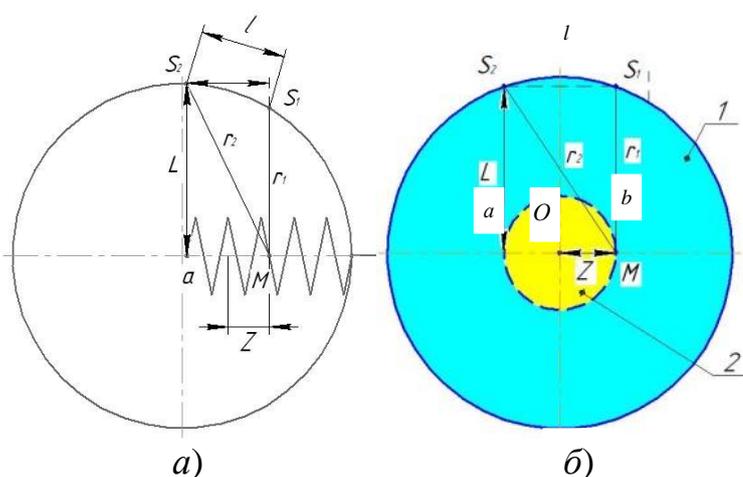


Рисунок 2.6 – Схема расположения двух источников излучения на полусферическом резонаторе с фторопластовым шнеком: а) вид сбоку; б) вид со стороны основания; 1 – полусферический резонатор; 2 – фторопластовый шнек

При интерференции волн (наложении) происходит их взаимное усиление во времени в одних точках пространства резонатора, и ослабление в других точках, в зависимости от соотношения между фазами волн (разность фаз не зависит от времени). Для обоснованного выбора **месторасположения двух магнетронов на полусферическом резонаторе** с диаметром пятикратным длине волны (61,2 см), необходимо определить как будут интерферировать волны. Волны, возбуждаемые от излучателей S_1 и S_2 , описываются выражениями [150, с. 290]:

$$S_1 = E_1 \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot r_1 + \alpha_1\right), \quad S_2 = E_2 \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot r_2 + \alpha_2\right), \quad (2.34)$$

где E_1, E_2 – амплитуды напряженностей электрических полей соответствующих излучателей; ω – частота; a_2, a_1 – начальные фазы волн; r_1, r_2 – ход соответствующих волн; $r_2 - r_1$ – разность хода волн; λ – длина волны, см ($\lambda = 12,24$ см); $(2 \cdot \pi / \lambda)$ – волновое число.

Разность начальных фаз волн ($a_2 - a_1$) не зависит от времени и является постоянной величиной. Результат интерференции двух волн в точке М зависит от величины максимумов амплитуды напряженностей ЭП. Сумма волн:

$$S = S_1 + S_2. \quad (2.35)$$

При этом амплитуда напряженности электрического поля (E , В/см) в точке М:

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \cos[(2 \cdot \pi / \lambda) \cdot (r_2 - r_1) - (a_2 - a_1)]. \quad (2.36)$$

При наложении двух волн происходит сложение квадрата их амплитуд:

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2. \quad (2.37)$$

Максимум и минимум амплитуды результирующих напряженностей ЭП можно оценить по выражениям:

$$E_{\text{макс}} = E_1 + E_2, \quad E_{\text{мин}} = |E_1 - E_2|. \quad (2.38)$$

Максимальная амплитуда напряженности ЭП в точке М (в восковом сырье) будет достигнута при условии:

$$(2 \cdot \pi / \lambda) \cdot (r_2 - r_1) - (a_2 - a_1) = 2 \cdot m \cdot \pi, \quad (2.39)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$ – порядок интерференционного максимума.

Минимальная интерференционная амплитуда напряженности ЭП в точке М будет достигнута при условии:

$$(2 \cdot \pi / \lambda) \cdot (r_2 - r_1) - (a_2 - a_1) = (2 \cdot m - 1) \cdot \pi, \quad (2.40)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$ – порядок интерференционного минимума.

Условия интерференционных максимумов и минимумов двух волн сантиметрового диапазона:

$$r_2 - r_1 = \pm m \cdot \lambda + \frac{a_2 - a_1}{2 \cdot \pi} \cdot \lambda \quad (\text{максимумы}), \quad (2.41)$$

$$r_2 - r_1 = \pm (2 \cdot m - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} + \frac{a_2 - a_1}{2 \cdot \pi} \cdot \lambda \quad (\text{минимумы}). \quad (2.42)$$

Если начальные фазы волн равны ($a_2 = a_1$), то условия интерференционных максимумов и минимумов волн упрощаются: $r_2 - r_1 = m \cdot \lambda = 12,24$ см (максимум) и

$$r_2 - r_1 = (2 \cdot m - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} = (2 \cdot 1 - 1) \cdot \frac{12,24}{2} = 6,12 \text{ см (минимум)}. \quad (2.43)$$

Максимум волн нулевого порядка ($m = 0$) находится в точке O , равноудаленной от излучателей S_1 и S_2 . Эта точка расположена на прямой ab , проходящей параллельно линии источников излучений S_1 и S_2 на расстоянии L от нее. Если расстояние (l) между излучателями меньше L , т. е. $l < L$, разность хода волн составляет:

$$r_2 - r_1 = l \cdot Z / L. \quad (2.44)$$

Если считать, что L равен радиусу полусферического резонатора (30,6 см), то расстояние между излучателями S_1 и S_2 должно быть меньше 30,6 см и кратное половине длины волны, т. е. можно принять 24,48 см. Угол сдвига излучателей 44 градуса. Тогда максимумы волн m -го и $(m+1)$ -го порядка соответствуют следующим значениям:

$$Z_m = \frac{m \cdot \lambda \cdot L}{l} = \frac{1 \cdot 12,24 \cdot 30,6}{24,48} = 15,3 \text{ см}, \quad (2.45)$$

$$Z_{m+1} = \frac{(m+1) \cdot \lambda \cdot L}{l} = \frac{2 \cdot 12,24 \cdot 30,6}{24,48} = 30,6 \text{ см}, \quad (2.46)$$

а разность хода волн кратна длине волны:

$$r_2 - r_1 = l \cdot Z / L = 24,48 \cdot 15,3 \div 30,6 = 12,24 \text{ см}.$$

$$r_2 - r_1 = l \cdot Z / L = 24,48 \cdot 30,6 \div 30,6 = 24,48 \text{ см}. \quad (2.47)$$

Расстояние между соседними максимумами волн равно:

$$\lambda \cdot L / l = 12,24 \cdot 30,6 \div 24,48 = 15,3 \text{ см}. \quad (2.48)$$

В центре полусферического резонатора, диаметром пятикратным длине волны (61,2 см), при расположении излучателей от магнетронов по периметру на расстоянии 24,48 см (две длины волны) волны интерферируются, и максимумы волн будут соответствовать 15,3 см и 30,6 см при соответствующих разностях ходов волн 12,24 см и 24,48 см.

2.6 Трехмерное моделирование системы «генератор–резонатор–сырье» в программе CST Microwave Studio

Моделирование распределения ЭМП в проектируемых резонаторах с визуализацией его распределения проводилось в программе трехмерного моделирования СВЧ-структур CST Microwave Studio [153] при помощи модуля *Eigen mode*. Данный модуль реализует расчет собственных мод резонансных структур, потерь и добротности для каждой моды, анализирует характеристики электромагнитного поля для каждой моды в замкнутой структуре. Для этого в процессе проектирования объемных резонаторов указываются материал резонаторной камеры, местоположения источников излучения, задаются единицы измерения величин, граничные условия, диапазон частот. При запуске модуля *Eigen mode* происходит разбиение всего пространства резонаторной камеры на сетку, в каждой точке которой будет анализироваться ЭМП на выбранной частоте [22; 23; 116; 153]. Данная программа позволяет проанализировать параметры резонаторов различных конструктивных исполнений и выявить наиболее оптимальные решения на стадии их проектирования. Анализировались следующие ЭД-параметры системы: создаваемая напряженность ЭП в сырье, поверхностные токи, потери мощности, собственная и нагруженная добротности.

2.6.1 Электродинамические параметры системы с полусферическими резонаторами

СВЧ-воскотопка непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами (патент № 2770496) содержит две полусферы, состыкованные с общим кольцевым диском. Особенности конструкции и описание технологического процесса вытопки воска приведено далее (см. подраздел 3.3.1).

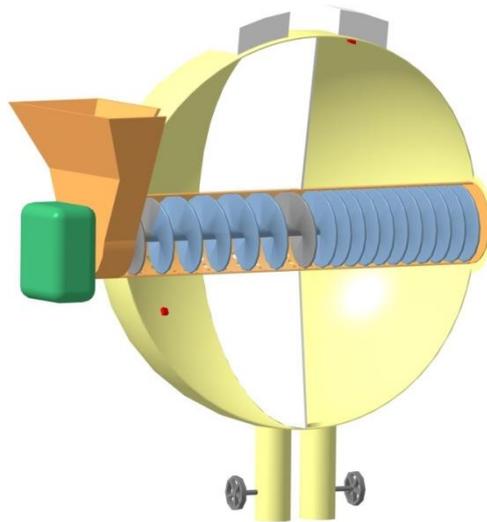


Рисунок 2.7 – Трехмерная модель СВЧ-воскотопки непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами

Основываясь на проведенных ранее исследованиях диэлектрических и физико-механических характеристик воска и меда на выбранной частоте электромагнитного поля, вычисляем:

- а) коэффициент затухания и глубину проникновения ЭМИ в сырье – для определения массы загружаемого сырья в резонаторную камеру;
- б) продолжительность нагрева воскового сырья;
- в) напряженность электрического поля, соответствующая удельной мощности генератора;
- г) собственные добротности резонаторов, согласованные с их объемами.

Схематическое изображение процесса вытопки воска в СВЧ-воскотопке представлено на рисунке 2,8, а конструкционно-технологические параметры установки – на рисунке 2.8, б.

Количество теплоты, затрачиваемое на вытопку воскового сырья, складывается из: количества теплоты, необходимое для разогревания воскового сырья, для нагревания диэлектрических узлов, количество теплоты, необходимое для компенсации потерь в окружающую среду, вытесненной при подаче воскового сырья.

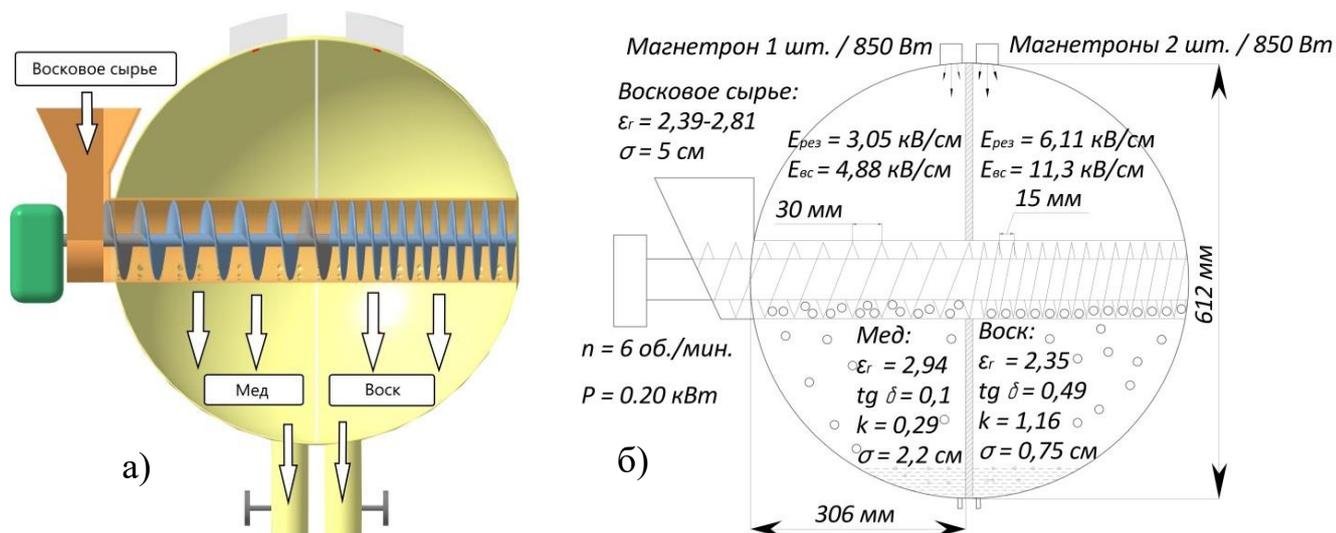


Рисунок 2.8 – Схематическое изображение процесса в СВЧ-воскотопке непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами:

- а) схематическое изображение процесса вытопки воска;
 б) конструкционно-технологические параметры

Результаты трехмерного моделирования полусферического резонатора без сырья в программе CST Microwave Studio приведены на рисунке 2.9.

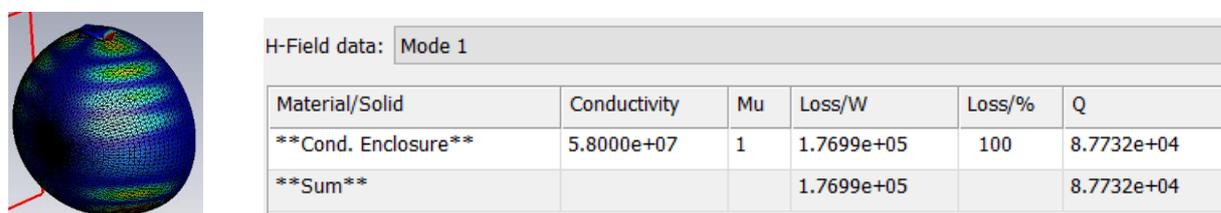


Рисунок 2.9 – Добротность полусферического резонатора без нагрузки, вычисленная в программе CST Microwave Studio

Вычисления показывают, что добротность пустого полусферического резонатора составляет 87732, при том, что теоретические расчеты показывают значение 79254. Это объясняется тем, что при расчете собственной добротности по формуле (2.12) не учитываются потери в элементах связи резонатора с источниками колебаний.

Результаты вычислений основных ЭД-параметров первого полусферического резонатора при мощности одного магнетрона 850 Вт с расположенными внутри шнеком и восковым сырьем представлены на рисунке 2.10.

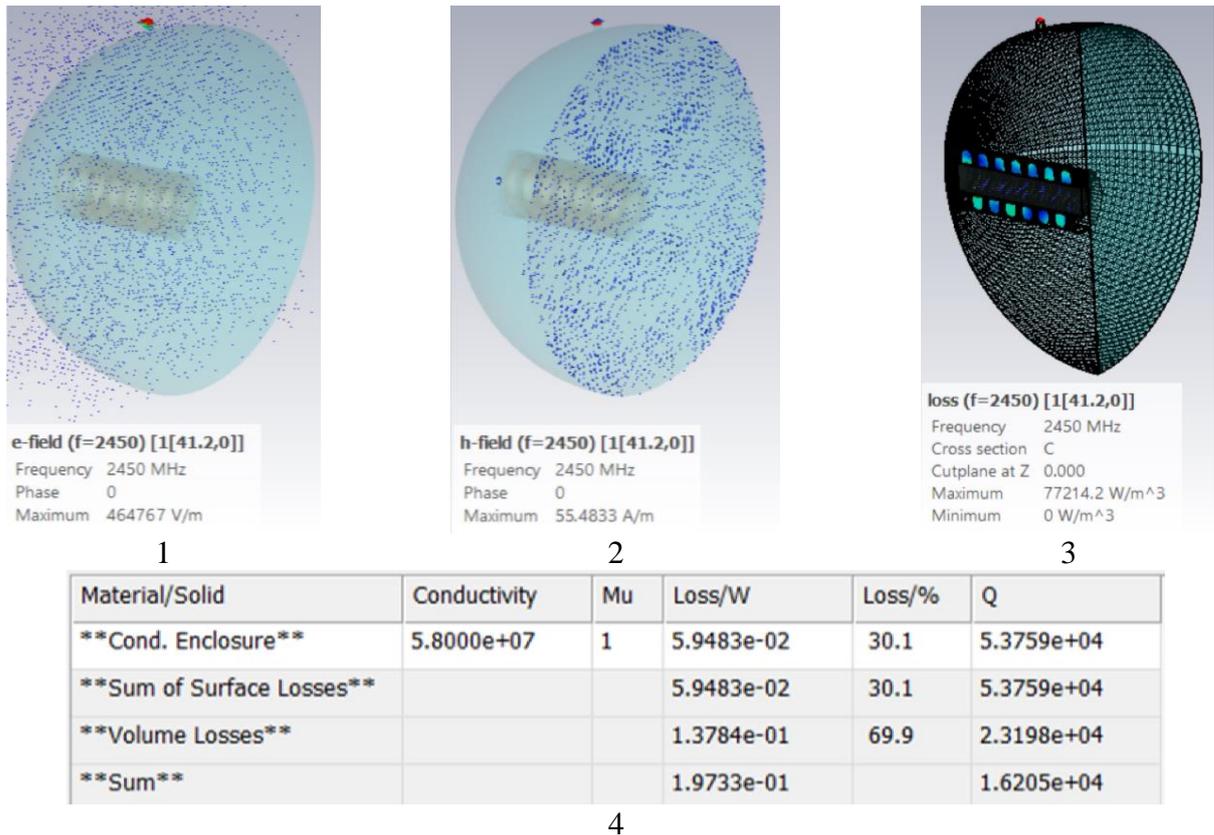


Рисунок 2.10 – ЭД-параметры первого нагруженного полусферического резонатора, полученные в программе CST Microwave Studio:

- 1 – создаваемая напряженность ЭП в сырье, В/м;
 2 – плотность поверхностных токов, А/м; 3 – удельная мощность, Вт/м³;
 4 – нагруженная добротность резонатора

Результаты вычислений ЭД-параметров первого полусферического резонатора в программе CST Microwave Studio показывают, что максимальная напряженность ЭП в сырье достигает 4,64 кВ/см, максимальная плотность поверхностных токов – 0,5 А/см, удельная мощность – 0,77 кВт/см³, нагруженная добротность – 53759.

Для второго полусферического резонатора СВЧ-установки определили наиболее эффективное расположение магнетронов на поверхности. Для этого в программе CST Microwave Studio вычислили ЭД-параметры полусферических резонаторов с расположением магнетронов под углами 44°, 90° и 180°. Результаты вычислений представлены на рисунках 2.11 и 2.12.

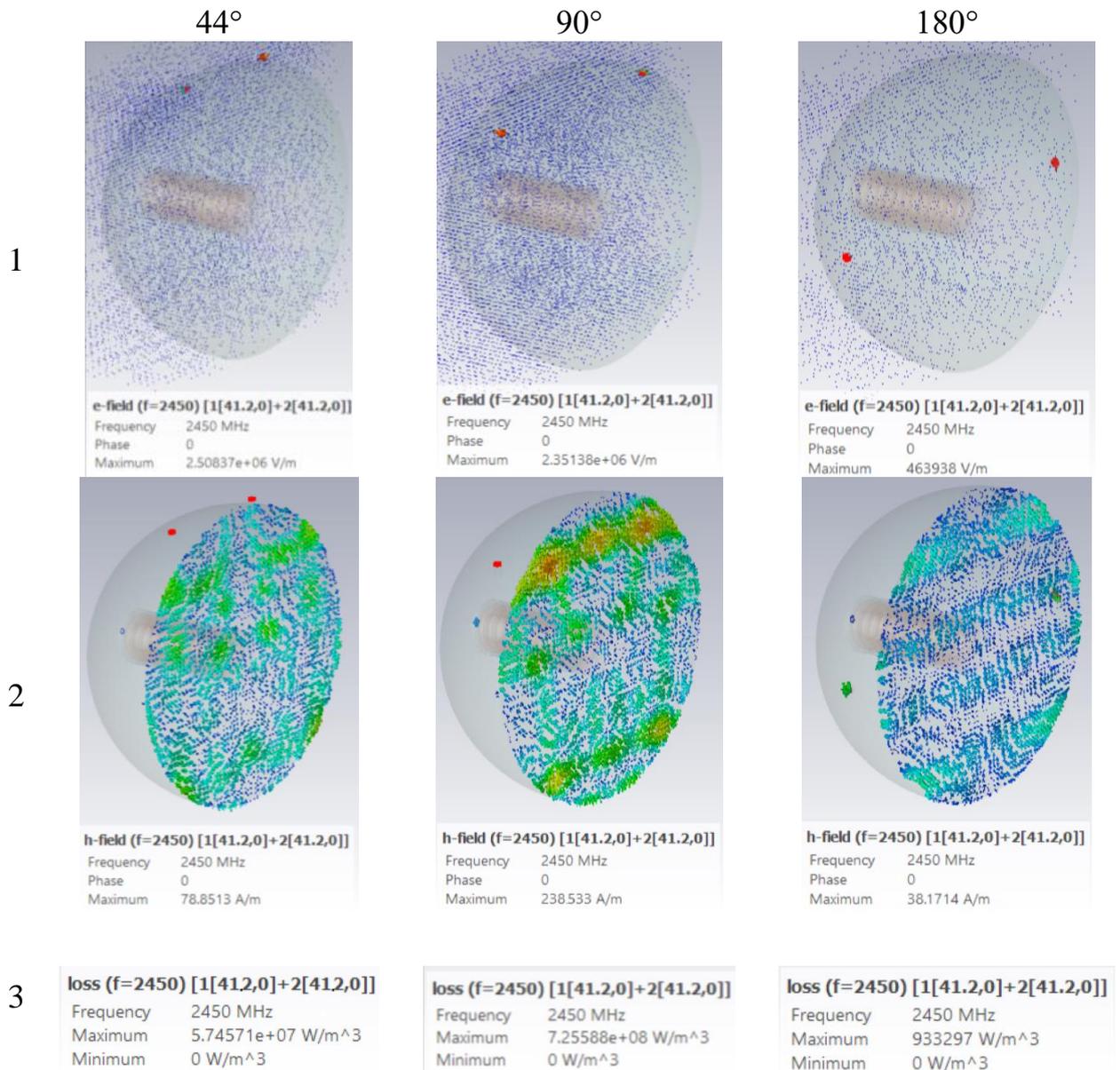


Рисунок 2.11 – ЭД-параметры второго нагруженного полусферического резонатора, полученные в программе CST Microwave Studio:

- 1 – создаваемая напряженность ЭП в сырье, В/м;
 2 – плотность поверхностных токов, А/м; 3 – удельная мощность, Вт/м³

Результаты вычислений ЭД-параметров второго полусферического резонатора при разном расположении магнетронов на поверхности в программе CST Microwave Studio показывают, что максимальная напряженность ЭП в сырье достигается при угле 44° – 25 кВ/см, при 90° – 23,5 кВ/см, минимальная напряженность ЭП 4,6 кВ/см – при 180°. Наибольшая плотность поверхностных токов наблюдается при расположении магнетронов под углом 90° – 2,4 А/см, при 44° – 0,8 А/см, при

180° – 0,4 А/см. Максимальное значение удельной мощности в некоторых точках сырья, согласно полученным расчетам, наблюдается при расположении магнетронов углом 90° – 38 кВт/см³, при 44° – 5,7 кВт/см³, при 180° – 0,9 кВт/см³.

44°	Material/Solid	Conductivity	Mu	Loss/W	Loss/%	Q
	Cond. Enclosure	5.8000e+07	1	1.4331e-01	0.281	5.5765e+04
	Sum of Surface Losses			1.4331e-01	0.281	5.5765e+04
	Volume Losses			5.0916e+01	99.7	4.4372e+02
	Sum			5.1060e+01		4.4247e+02
90°	Material/Solid	Conductivity	Mu	Loss/W	Loss/%	Q
	Cond. Enclosure	5.8000e+07	1	7.0875e-01	0.257	5.5067e+04
	Sum of Surface Losses			7.0875e-01	0.257	5.5067e+04
	Volume Losses			2.7532e+02	99.7	2.4473e+02
	Sum			2.7602e+02		2.4410e+02
180°	Material/Solid	Conductivity	Mu	Loss/W	Loss/%	Q
	Cond. Enclosure	5.8000e+07	1	4.0708e-05	9.56	7.0004e+03
	Sum of Surface Losses			4.0708e-05	9.56	7.0004e+03
	Volume Losses			3.8531e-04	90.4	7.3961e+02
	Sum			4.2601e-04		6.6893e+02

Рисунок 2.12 – Результаты исследования нагруженной добротности второго полусферического резонатора в зависимости от угла расположения магнетронов

Наивысшая нагруженная добротность полусферического резонатора достигается при расположении магнетронов под углом 44° – 55765, под углом 90° – 55067, при расположении магнетронов друг напротив друга значение нагруженной добротности составляет 7000.

Полученные результаты подтверждают теоретические расчеты, представленные в подразделе 2.6. Размещение по периметру полусферического резонатора двух излучателей от магнетронов на расстоянии две длины волны (угол расположения 44°) обеспечивает максимальную напряженность ЭП в сырье.

2.6.2 Электродинамические параметры системы со сферическим и кольцевым резонаторами

Вторая СВЧ-воскотопка (патент № 2737142) [85] содержит сферический резонатор, плотно прилегающий к поверхности горизонтально расположенного кольцевого резонатора по малому периметру, и общие отверстия, на месте стыка, диаметром менее $1/4$ длины волны (рисунок 2.13). Особенности конструкции и описание технологического процесса вытопки воска приведено далее (см. п.п. 3.3.2).

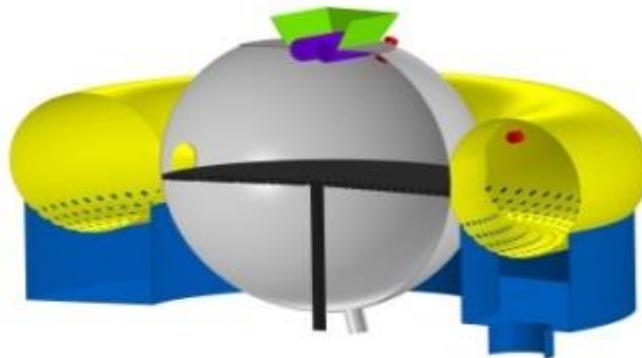
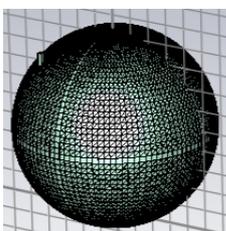


Рисунок 2.13 – Трехмерная модель СВЧ-воскотопки, содержащей сферический резонатор внутри кольцевого резонатора

Результаты моделирования сферического и кольцевого резонаторов в программе CST Microwave Studio приведены на рисунках 2.14–2.17.



H-Field data: Mode 1					
Material/Solid	Conductivity	Mu	Loss/W	Loss/%	Q
Cond. Enclosure	5.8000e+07	1	1.1733e+05	100	1.3253e+05
Sum			1.1733e+05		1.3253e+05

Рисунок 2.14 – Добротность сферического резонатора без нагрузки, вычисленная в программе CST Microwave Studio

Добротность первого сферического резонатора без нагрузки, вычисленная в программе CST Microwave Studio, составляет 132530.

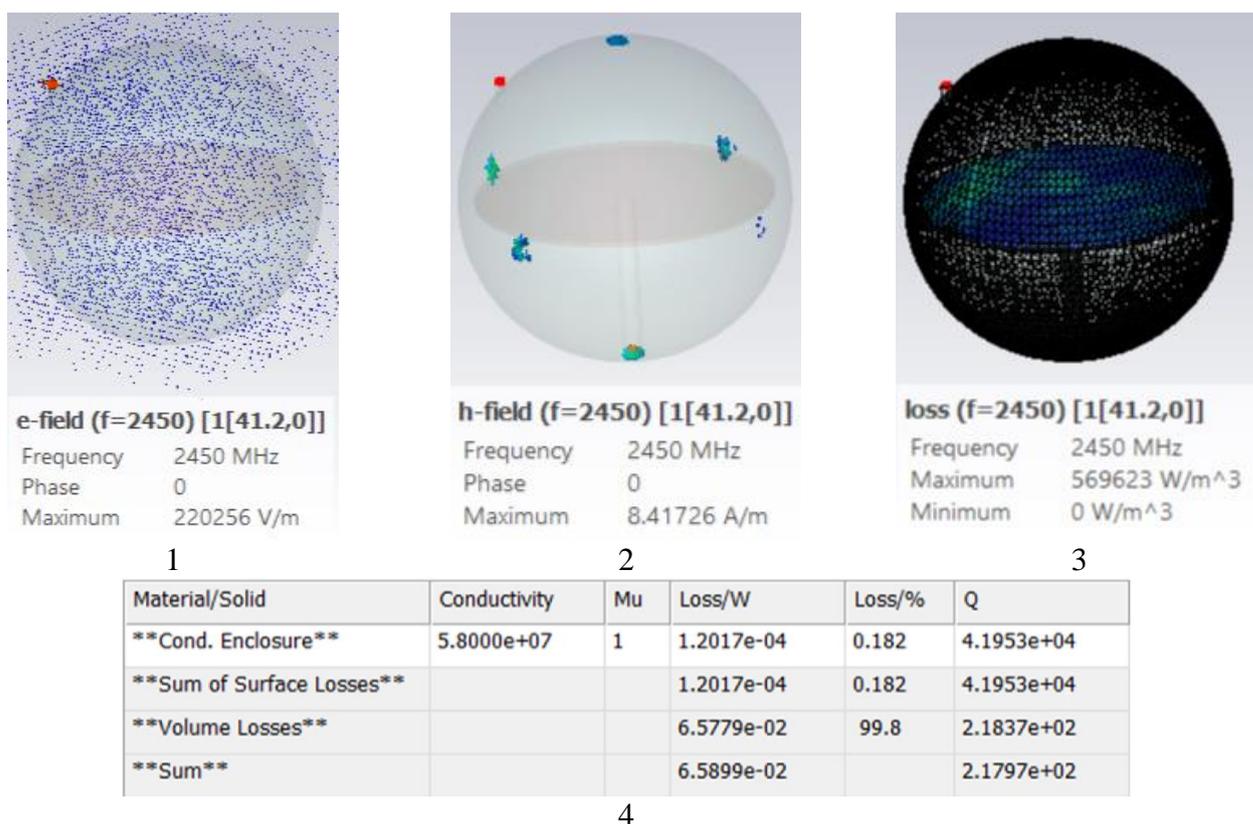
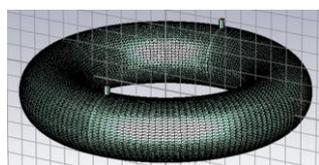


Рисунок 2.15 – ЭД-параметры первого нагруженного сферического резонатора, полученные в программе CST Microwave Studio:
 1 – создаваемая напряженность ЭП в сырье, В/м;
 2 – плотность поверхностных токов, А/м; 3 – удельная мощность, Вт/м³;
 4 – нагруженная добротность резонатора

Результаты вычислений ЭД-параметров первого сферического резонатора в программе CST Microwave Studio показывают, что максимальная напряженность ЭП в сырье достигает 2,2 кВ/см, максимальная плотность поверхностных токов – 0,08 А/см, удельная мощность – 0,57 кВт/см³, нагруженная добротность – 41953.



H-Field data: Mode 1					
Material/Solid	Conductivity	Mu	Loss/W	Loss/%	Q
Cond. Enclosure	5.8000e+07	1	2.9734e+05	100	5.1838e+04
Sum			2.9734e+05		5.1838e+04

Рисунок 2.16 – Добротность кольцевого резонатора без нагрузки, вычисленная в программе CST Microwave Studio

Добротность второго кольцевого резонатора без нагрузки, вычисленная в программе CST Microwave Studio, составляет 51838.

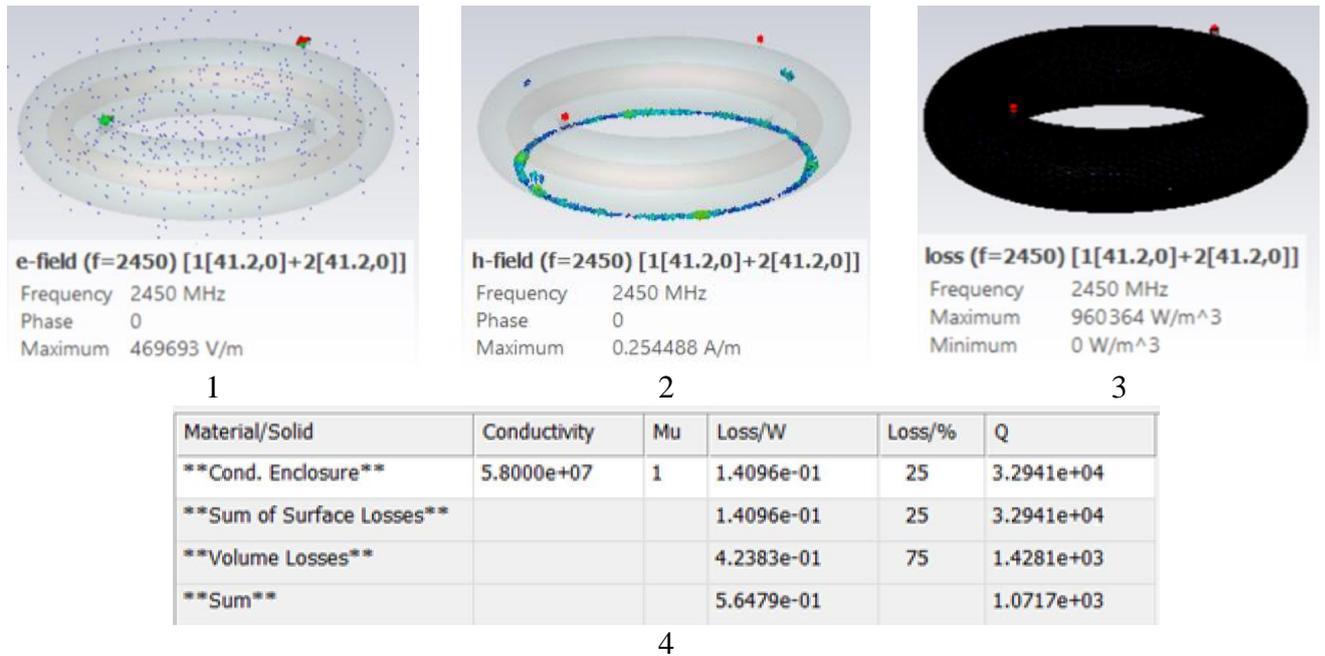


Рисунок 2.17 – ЭД-параметры второго нагруженного кольцевого резонатора, полученные в программе CST Microwave Studio:

- 1 – создаваемая напряженность ЭП в сырье, В/м;
 2 – плотность поверхностных токов, А/м; 3 – удельная мощность, Вт/м³;
 4 – нагруженная добротность резонатора

Результаты вычислений ЭД-параметров второго кольцевого резонатора в программе CST Microwave Studio показывают, что максимальная напряженность ЭП в сырье достигает 4,7 кВ/см, максимальная плотность поверхностных токов – 0,002 А/см, удельная мощность – 0,96 кВт/см³, нагруженная добротность – 32941.

2.6.3 Электродинамические параметры системы с цилиндрическим и сферическим резонаторами

Третья СВЧ-установка для термообработки пчелиного воскового сырья (патент № 2728659) состоит из двух модулей (рисунок 2.18) [84]. Первый модуль представлен в виде цилиндрического резонатора с электроприводным терочным ос-

нованием и предназначен для диэлектрического нагрева сырья и отделения меда от воскового сырья центрифугированием. Второй модуль предназначен для вытопки и обеззараживания пчелиного воска в сферическом резонаторе, где возбуждается электромагнитное поле сверхвысокой частоты [121]. Особенности конструкции и описание технологического процесса вытопки воска приведено далее (см. подраздел 3.3.3).

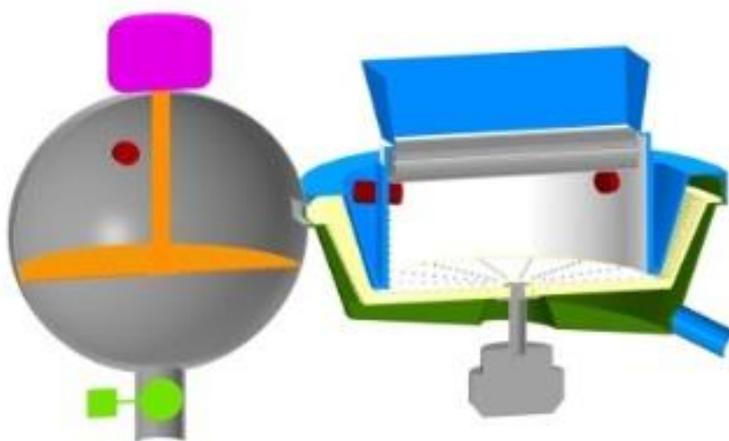
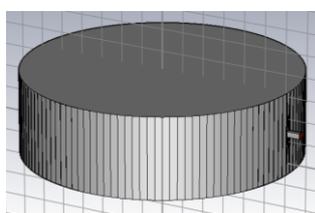


Рисунок 2.18 – СВЧ-воскотопка с цилиндрическим и сферическим резонаторами

Результаты моделирования цилиндрического и сферического резонаторов для СВЧ-воскотопки № 3 приведены на рисунках 2.19–2.22.



H-Field data: Mode 1					
Material/Solid	Conductivity	Mu	Loss/W	Loss/%	Q
Cond. Enclosure	5.8000e+07	1	2.7924e+05	100	5.5294e+04
Sum			2.7924e+05		5.5294e+04

Рисунок 2.19 – Добротность цилиндрического резонатора без нагрузки, вычисленная в программе CST Microwave Studio

Добротность первого цилиндрического резонатора без нагрузки, вычисленная в программе CST Microwave Studio, составляет 55300.

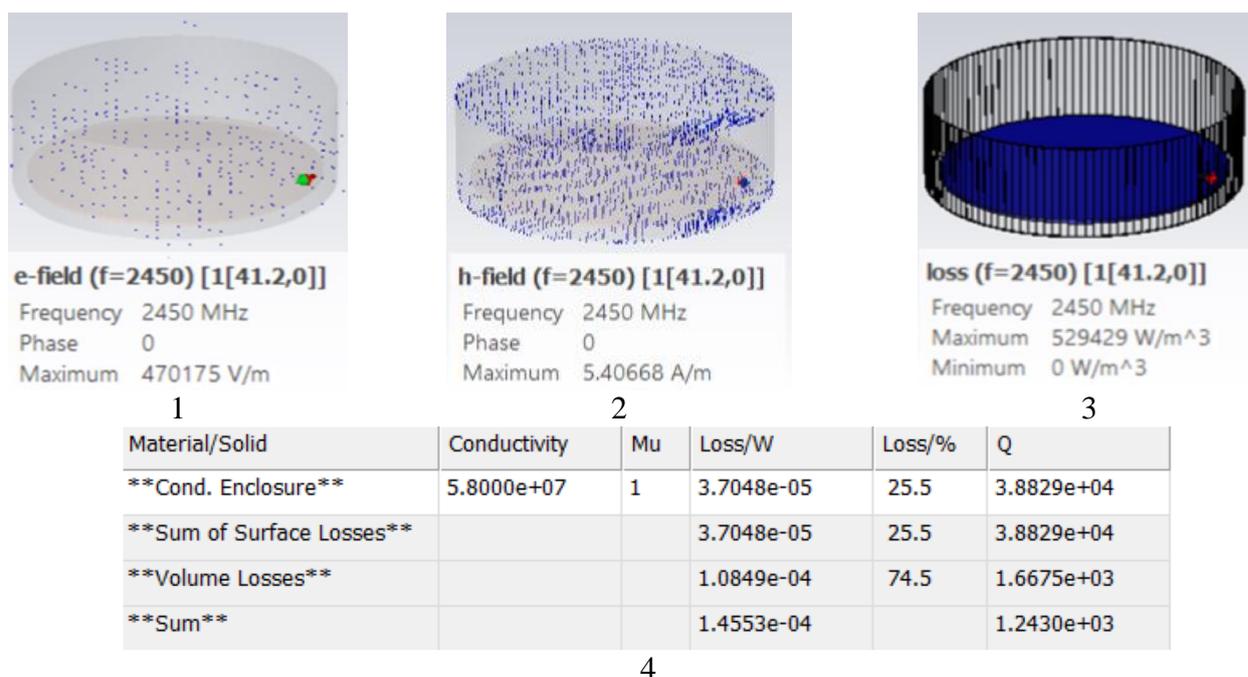
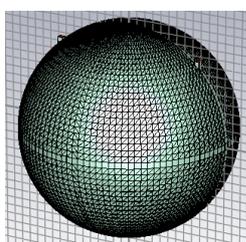


Рисунок 2.20 – ЭД-параметры первого нагруженного цилиндрического резонатора, полученные в программе CST Microwave Studio:

- 1 – создаваемая напряженность ЭП в сырье, В/м;
 2 – плотность поверхностных токов, А/м; 3 – удельная мощность, Вт/м³;
 4 – нагруженная добротность резонатора

Результаты вычислений ЭД-параметров первого цилиндрического резонатора в программе CST Microwave Studio показывают, что максимальная напряженность ЭП в сырье достигает 4,7 кВ/см, максимальная плотность поверхностных токов – 0,05 А/см, удельная мощность – 0,53 кВт/см³, нагруженная добротность – 38800.



H-Field data: Mode 1

Material/Solid	Conductivity	Mu	Loss/W	Loss/%	Q
Cond. Enclosure	5.8000e+07	1	1.1733e+05	100	1.3253e+05
Sum			1.1733e+05		1.3253e+05

Рисунок 2.21 – Добротность сферического резонатора без нагрузки, вычисленная в программе CST Microwave Studio

Добротность второго сферического резонатора без нагрузки, вычисленная в программе CST Microwave Studio, составляет 132530.

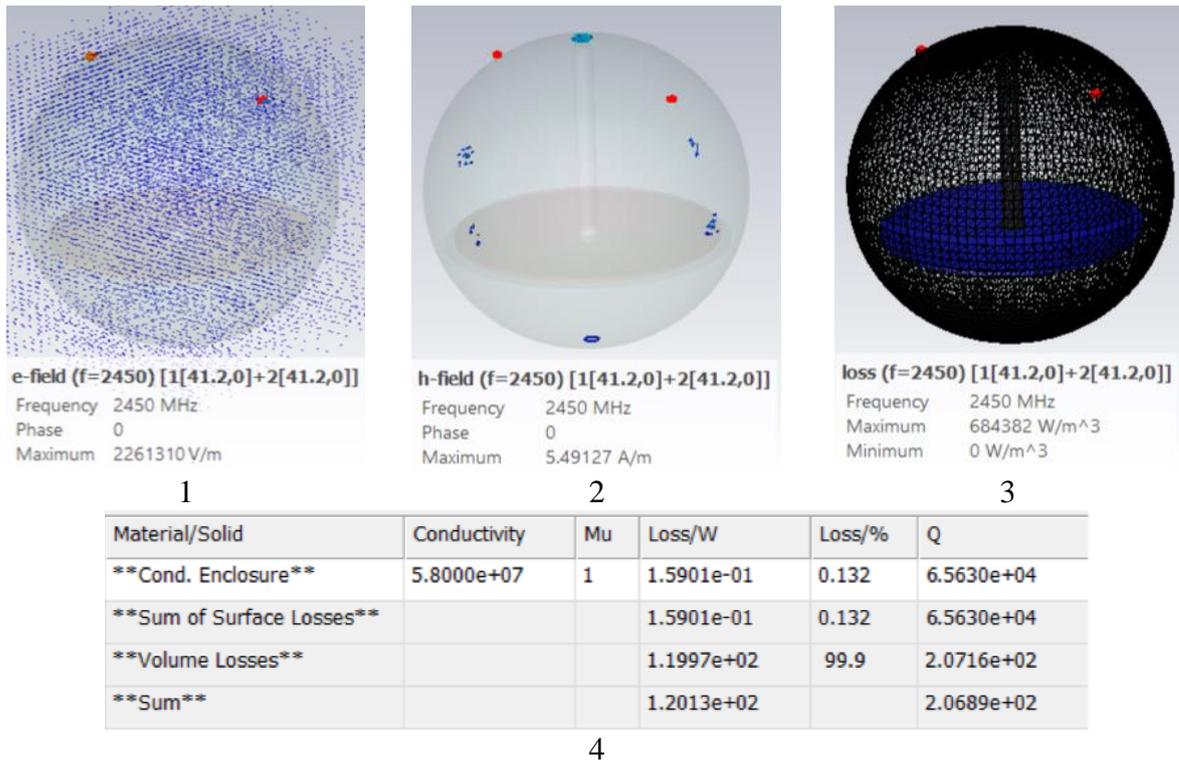


Рисунок 2.22 – ЭД-параметры второго нагруженного сферического резонатора, полученные в программе CST Microwave Studio:

- 1 – создаваемая напряженность ЭП в сырье, В/м;
 2 – плотность поверхностных токов, А/м; 3 – удельная мощность, Вт/м³;
 4 – нагруженная добротность резонатора

Результаты вычислений ЭД-параметров второго сферического резонатора в программе CST Microwave Studio показывают, что максимальная напряженность ЭП в сырье достигает 22,6 кВ/см, максимальная плотность поверхностных токов – 0,05 А/см, удельная мощность – 0,68 кВт/см³, нагруженная добротность – 65630.

2.6.4 Электродинамические параметры системы с цилиндрическими резонаторами

Четвертая СВЧ-воскотопка (патент № 2740095) содержит перфорированные цилиндрические резонаторы, состыкованные между собой с помощью прижимного кольца с измельчающим механизмом (рисунок 2.23). Внутри резонато-

ров последовательно на одном валу расположены два нагнетательных фторопластовых шнека. Особенности конструкции и описание технологического процесса вытопки воска приведено далее (см. подраздел 3.3.4).

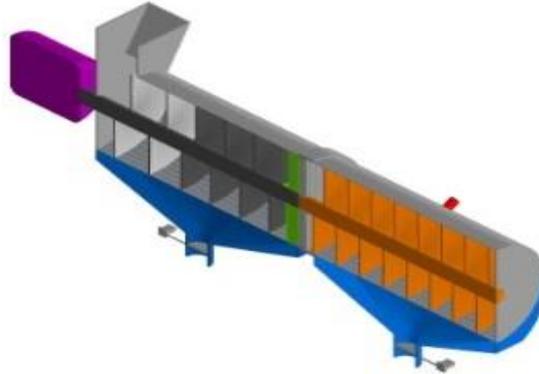


Рисунок 2.23 – СВЧ-воскотопка с цилиндрическими резонаторами непрерывно-поточного действия

На рисунках 2.24–2.26 наглядно представлены результаты моделирования электродинамических параметров системы «генераторы–резонатор» в программе CST Microwave Studio.

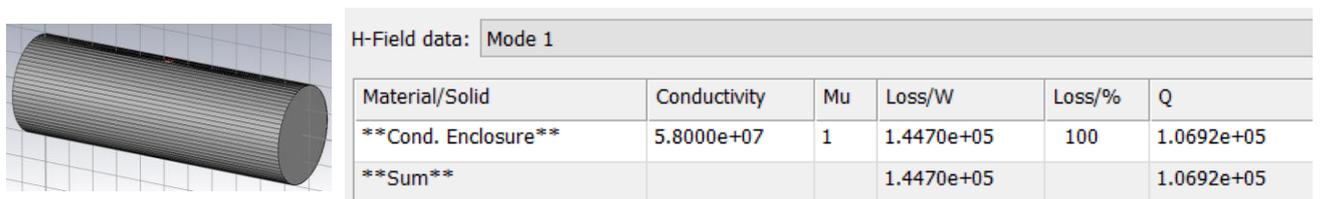


Рисунок 2.24 – Добротность цилиндрического резонатора без нагрузки, вычисленная в программе CST Microwave Studio

Добротность цилиндрического резонатора без нагрузки, вычисленная в программе CST Microwave Studio, составляет 106920.

Результаты вычислений ЭД-параметров первого цилиндрического резонатора в программе CST Microwave Studio показывают, что максимальная напряженность ЭП в сырье достигает 4,9 кВ/см, максимальная плотность поверхностных токов – 0,3 А/см, удельная мощность – 0,32 кВт/см³, нагруженная добротность – 38457.



Рисунок 2.25 – ЭД-параметры первого нагруженного цилиндрического резонатора, полученные в программе CST Microwave Studio:

- 1 – создаваемая напряженность ЭП в сырье, В/м;
 2 – плотность поверхностных токов, А/м; 3 – удельная мощность, Вт/м³;
 4 – нагруженная добротность резонатора

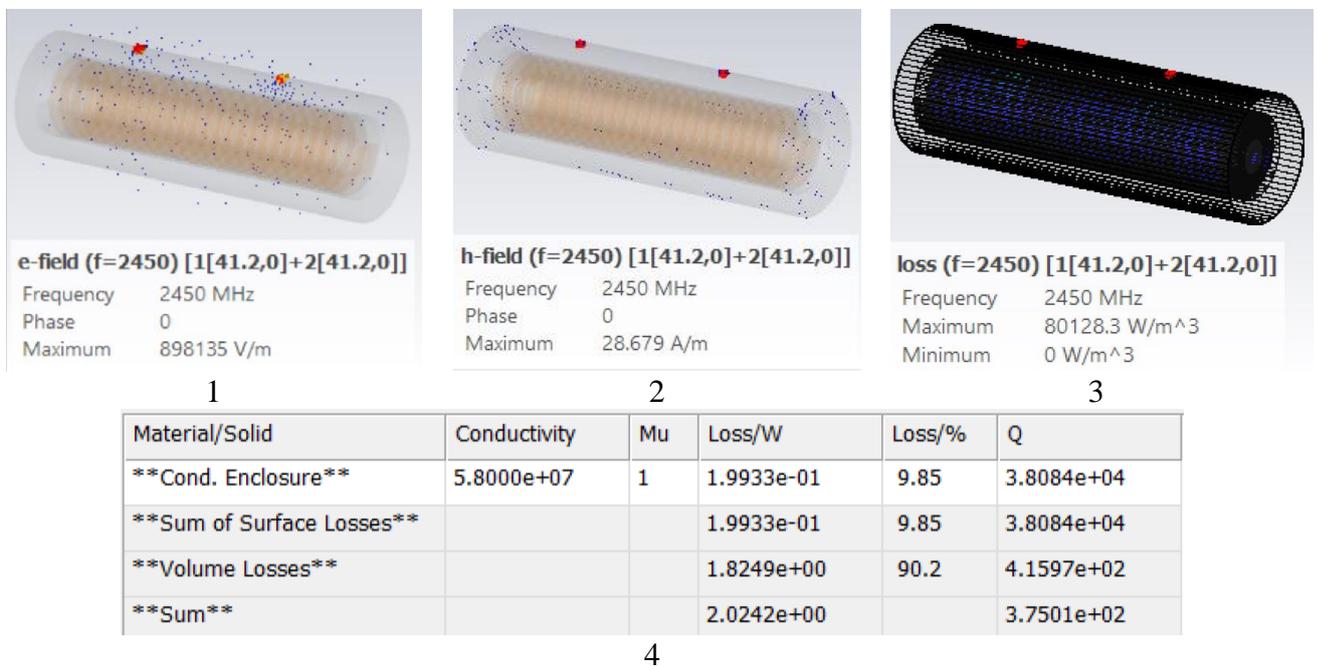


Рисунок 2.26 – ЭД-параметры второго нагруженного цилиндрического резонатора, полученные в программе CST Microwave Studio:

- 1 – создаваемая напряженность ЭП в сырье, В/м;
 2 – плотность поверхностных токов, А/м; 3 – удельная мощность, Вт/м³;
 4 – нагруженная добротность резонатора

Результаты вычислений ЭД-параметров первого цилиндрического резонатора в программе CST Microwave Studio показывают, что максимальная напряженность ЭП в сырье достигает 8,9 кВ/см, максимальная плотность поверхностных токов – 0,3 А/см, удельная мощность – 0,8 кВт/см³, нагруженная добротность – 38084.

Сводные значения собственных добротностей резонаторов приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Сводная таблица электродинамических параметров СВЧ-воскотопок со сдвоенными резонаторами

<i>СВЧ-воскотопки с результатами исследования электродинамических параметров</i>		
1. Патент № 2770496		
<i>СВЧ-воскотопка с полусферическими резонаторами.</i>		
	Расчетное значение	Значение, полученное в программе CST Microwave Studio
Собственная добротность первого/второго резонаторов	79254	87732
Нагруженная добротность первого/второго резонаторов	49246/ 51699...52175	53759/55765
Напряженность электрического поля в первом/втором резонаторах, кВ/см	3,06/6,11	
Напряженность электрического поля в сырье первого/второго резонаторов, кВ/см	4,88/ 11,3...11,37	4,64/25
2. Патент № 2737142		
<i>СВЧ-воскотопка совмещенными сферическим и кольцевым резонаторами</i>		
Собственная добротность первого/второго резонаторов	71329/94794	132530/51838
Нагруженная добротность первого/второго резонаторов	58878/71329	41953/32941
Напряженность электрического поля в первом/втором резонаторах, кВ/см	3,65/5,5	
Напряженность электрического поля в сырье первого/второго резонаторов, кВ/см	5,84/10,17...10,44	2,2/4,7
3. Патент № 2728659		
<i>СВЧ-воскотопка с цилиндрическим и сферическим резонаторами</i>		
Собственная добротность первого/второго резонаторов	94794/71329	55300/132530
Нагруженная добротность первого/второго резонаторов	44304/ 61836...62364	38800/65630
Напряженность электрического поля в первом/втором резонаторах, кВ/см	2,75/7,31	
Напряженность электрического поля в сырье первого/второго резонаторов, кВ/см	4.4/13,51...13,87	4,7/22,6

Продолжение таблицы 2.8

4. Патент № 2740095 <i>СВЧ-воскотопки с состыкованными цилиндрическими резонаторами</i>		
Собственная добротность первого/второго резонаторов	80224	106920
Нагруженная добротность первого/второго резонаторов	49226/ 52332...52783	38457/38084
Напряженность электрического поля в первом/втором резонаторах, кВ/см	3,09/6,18	
Напряженность электрического поля в сырье первого/второго резонаторов, кВ/см	5,57/ 11,5...11,64	4,9/8,9

Значения напряженности ЭП в сырье, полученные по формуле (2.17) и в программе CST Microwave Studio различаются. Это связано с тем, что приведенные значения напряженностей ЭП, полученные в программе CST Microwave Studio, являются максимальными в некоторых точках сырья, в то время как теоретические расчеты показывают среднее значение напряженности ЭП во всем объеме сырья. Собственная добротность резонаторов, рассчитанная по формуле (2.12), в сравнении с добротностью, полученной в программе CST Microwave Studio, имеет значительные отклонения, так как не учитываются потери в элементах связи резонатора с источниками колебаний.

2.6.5 Соответствие СВЧ-воскотопок со сдвоенными резонаторами разных конструкционных исполнений критериям проектирования

Проведена сравнительная оценка СВЧ-воскотопок непрерывно-поточного действия с разными исполнениями состыкованных резонаторов по основным технологическим параметрам (таблица 2.9).

Таблица 2.9 – Оценка СВЧ-воскотопок по основным параметрам

Параметр	Номера СВЧ-воскотопок (в соответствии с табл. 2.9)			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Напряженность ЭП в резонаторе, кВ/см	6,11	5,5	7,31	6,18
Напряженность ЭП в сырье, кВ/см	11,3	10,4	13,8	11,6
Собственная добротность первого резонатора, $\times 10^3$	7,9	9,4	7,1	8,0
Собственная добротность второго резонатора, $\times 10^3$	7,9	7,1	9,4	8,0
Производительность СВЧ-воскотопки, кг/ч	27	19	21	24
Потребляемая мощность воскотопки, кВт	3,58	3,85	4,17	3,78
Удельные энергетические затраты на вытопку воска с отделением меда, Вт·ч/кг	0,13	0,21	0,18	0,14
Площадь, занимаемая установкой, м ²	0,72	1	0,72	1,2
<i>Значение отклонения</i>	<i>0,072</i>	<i>0,306</i>	<i>0,110</i>	<i>0,198</i>

Анализ показывает, что наименьшим отклонением от идеальных параметров обладает СВЧ-воскотопка непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами (под номером 1). При этом следует оптимизировать массогабаритные характеристики элементов и узлов СВЧ-воскотопок путем совмещения узлов и их компоновки внутри объемного резонатора, размеры которых зависят от длины волны.

2.7 Выводы

1. Структурные схемы процесса вытопки воска и отделения меда в двухрезонаторных СВЧ-воскотопках, реализующие основные технологические и эксплуатационные критерии, предусматривают:

- взаимосвязь двух объемных резонаторов с высокой собственной добротностью (80–94 тыс.), позволяющей оценить термический КПД воскотопок, конфигу-

рация которых способствует возбуждению электрического поля высокой напряженности 5,5–7,3 кВ/см при мощности магнетронов 1700 Вт;

- механизмы, транспортирующие восковое сырье через резонаторы, толщиной, не превышающей две глубины проникновения волны, изменяющейся от 5 до 0,7 см при изменении температуры нагрева от 20 до 65 °С, для чего реализован электроприводной винтовой шнек с разным шагом, с возможностью плавного регулирования частоты вращения;

- механизмы для измельчения в виде перфорированных терочных дисков;

- запердельные волноводы, предотвращающие излучения через сливные патрубки, диаметром менее четверти длины волны.

2. Задача оптимизации размеров и конструкции резонаторов сводилась к выбору таких размеров и конструкций резонатора, при которых в нем возбуждаются только определенные виды колебаний. Для обеспечения равномерного распределения электромагнитного поля сантиметрового диапазона во втором резонаторе каждой воскотопки, линейные размеры которых не превышают 5–6 длин волн, размещены по два магнетрона, общей мощностью 1700 Вт. При размещении по периметру полусферического резонатора, диаметром пятикратным длине волны (61,2 см), двух излучателей от магнетронов на расстоянии две длины волны (угол расположения 44 градуса), волны интерферируются и обеспечивают равномерное электрическое поле по объему резонатора.

3. Результаты исследования динамики нагрева воскового сырья с учетом изменения его диэлектрических и теплофизических параметров в процессе воздействия ЭМП СВЧ позволили обосновать скорость его нагрева и продолжительность технологического процесса при нагреве до 45 и 65 °С соответственно в первом и втором резонаторах, при напряженности электрического поля в сырье соответственно 4,88 и 11,3 кВ/см.

4. Путем моделирования восьми резонаторов в программе CST Microwave Studio оценены их ЭД-параметры: напряженность электрического поля в сырье, В/м; плотность поверхностных токов, А/м собственная и нагруженная добротности резонаторов. По результатам теоретических расчетов параметров электроди-

намической системы обоснован выбор состыкованных полусферических резонаторов для эффективного функционирования СВЧ-воскотопки. ЭД-параметры *первого* полусферического резонатора: собственная добротность – 87732, нагруженная добротность 53759; максимальная напряженность ЭП в некоторых точках сырья – 4,64 кВ/см. ЭД параметры *второго* полусферического резонатора: собственная добротность – 87732, нагруженная добротность – 55765; максимальная напряженность ЭП в некоторых точках сырья – 25 кВ/см.

5. Сравнительный анализ значений собственных добротностей резонаторов разных конструкционных исполнений при равных объемах ($0,06 \text{ м}^3$), полученных в результате моделирования в программе CST Microwave Studio показывает, что самой максимальной добротностью (132600) обладает сферическое исполнение, на втором месте – цилиндрическое (106920), на третьем месте – полусферическое (87700), добротность кольцевого резонатора (51800). На основании оценки всех ЭД-параметров, компактности и металлоемкости преимущественнее полусферические резонаторы для изготовления образца СВЧ-воскотопки.

6. При использовании одного магнетрона мощностью 850 Вт в первом полусферическом резонаторе и двух магнетронов (1700 Вт) во втором полусферическом резонаторе в СВЧ-воскотопке для отделения меда и вытопки воска расчетная производительность составит 27,6 кг/ч.

3 РАЗРАБОТАННЫЕ ДВУХРЕЗОНАТОРНЫЕ СВЧ-ВОСКОТОПКИ НЕПРЕРЫВНО-ПОТОЧНОГО ДЕЙСТВИЯ

3.1 Частные методики исследований и измерительная аппаратура

Экспериментальные исследования в лабораторных условиях проводились в соответствии с частными методиками. Программа работ содержит основные этапы исследований. Экспериментальные исследования по выявлению эффективных режимов работы СВЧ-воскотопки проводились по стандартным методикам на основе теории активного планирования трехфакторного эксперимента тип 2^3 и ротатабельного планирования. При этом обоснован состав факторов и диапазоны их варьирования, определена последовательность проведения опытов, исходя из уровня достоверности результатов $R = 0,95$.

Температуру воскового сырья, скорость вращения электроприводного фторопластового винтового шнека фиксировали посредством современных сертифицированных электроизмерительных приборов, оценку структуры вытопленного воска и меда проводили через органолептические, физико-химические показатели по методикам, рекомендованным соответствующими ГОСТ.

Источниками СВЧ-энергии служили магнетроны (2М253К(ЖТ)), излучатели которых направлены через волноводы в объем резонатора, где возбуждаются электромагнитные волны сантиметрового диапазона (частота 2450 МГц, длина волны 12,24 см), Принцип действия магнетронов основан на торможении электронов в скрещённых магнитных и электрических полях. Использовали магнетроны мощностью 850 Вт с принудительным воздушным охлаждением от вентиляторов ввиду их широкой распространенности, дешевизне, возможности работы при переменной нагрузке, большому сроку службы, сравнительно низкому анодному напряжению (4,5 кВ).

Измерение плотности потока энергии электромагнитного поля около установки осуществляли при помощи прибора ПЗ-33-М (рисунок 3.1, а). Частоту вращения фторопластового винтового шнека замеряли с помощью фототахометра DT-2234В (рисунок 3.1, в). Учет массы сырья осуществляли с помощью электронных весов M-ER 326 AFU (рисунок 3.1, г). Исследование распределения теплового потока по поверхности воскового сырья проводили тепловизором FLIR T335 (рисунок 3.1, б) и инфракрасным пирометром Testo 845 (рисунок 3.1, д), предназначенным для мгновенного бесконтактного измерения температур.

Частоту вращения мотор-редуктора (100YT200WGV22B) изменяли при помощи преобразователя частоты «WANSHSIN 0,2 кВ» (рисунок 3.1, е). Учет массы воскового сырья осуществляли с помощью электронных весов SF-400.



Рисунок 3.1 – Измерительные приборы: а – измеритель плотности потока ЭМП ПЗ-33-М; б – тепловизор FLIR T335; в – фототахометр DT-2234В; г – электронные весы M-ER 326 AFU; д – измеритель температуры Testo 845; е – преобразователь частоты WANSHSIN 0,2 кВт

Для трехмерного моделирования объемных резонаторов СВЧ-воскотопок (резонаторы сферической, полусферической, цилиндрической и

кольцевой конфигурации) использовали программу CST Microwave Studio в режиме переходного процесса для:

- реализации TEM волн в многоэлементных портах;
- адаптивного разбиения трехмерной сетки в пространстве расчета;
- расчета рационального рассеяния RCS по поверхности;
- визуализации характеристик электромагнитного типа: электрического поля, поверхностных токов, потоков мощности, собственной и нагруженной добротности разработанных резонаторов [22; 23; 153].

Апробацию технологического процесса отделения меда и вытопки воска осуществляли с помощью изготовленной СВЧ-воскотопки непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами и диэлектрическим нагнетательным шнеком, с возможностью регулирования скорости вращения с помощью преобразователя частоты типа WANSHSIN.

Эффективные режимы работы установок обоснованы через регрессионные модели, полученные по плану активного планирования экспериментов типа 2^3 (план Хартли) и ротатбельное планирование второго порядка.

3.2 Машинно-аппаратная схема переработки воскового сырья

Известно, что технология пасечной переработки воскового сырья включает (рисунок 3.2): распечатку рамок с сотами; отстаивание снятого с рамок забруса в специализированном отстойнике, где стекают излишки меда; загрузка его в паровую воскотопку.

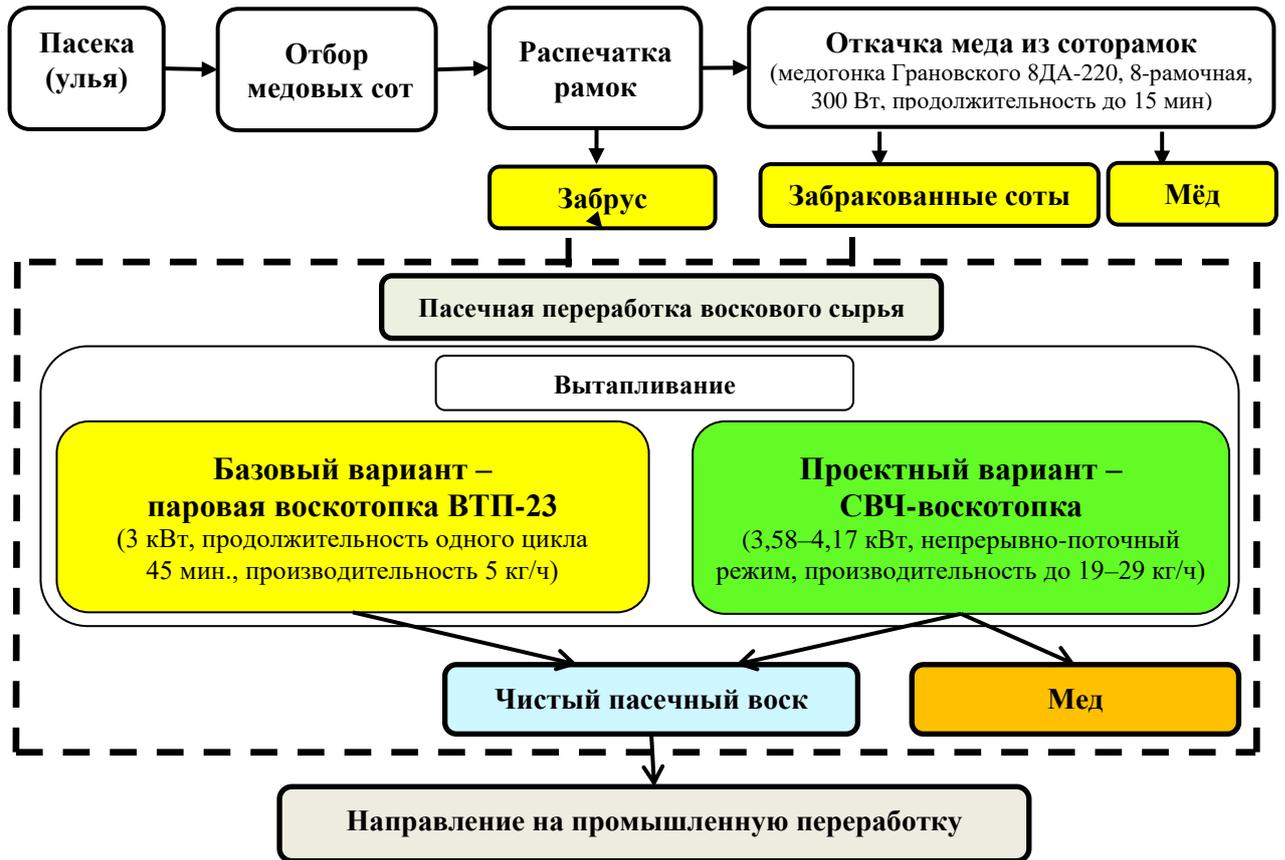


Рисунок 3.2 – Операционно-технологическая схема переработки продукции пчеловодства

В ней восковое сырье под действием острого пара нагревается и вытапливается, смешивается с водой, образуя водно-восковую суспензию. Полученную смесь сливают в тару, воск, находящийся в воде, поднимается вверх и застывает. Находящиеся в забресе остатки меда растворяются в воде, образуя сладковатую эмульсию, которая в дальнейшем может использоваться для подкормки пчел, в некоторых случаях – для подпитки огородных растений, зачастую данная эмульсия утилизируется. Восковую основу (сушь), остающуюся на рамках после откачки меда, перерабатывают отдельно после ее высыхания. Нами предлагается машинно-аппаратная схема вытопки воска и отделения меда (рисунок 3.3) с использованием четырех вариантов СВЧ-воскотопок (рисунок 3.4).

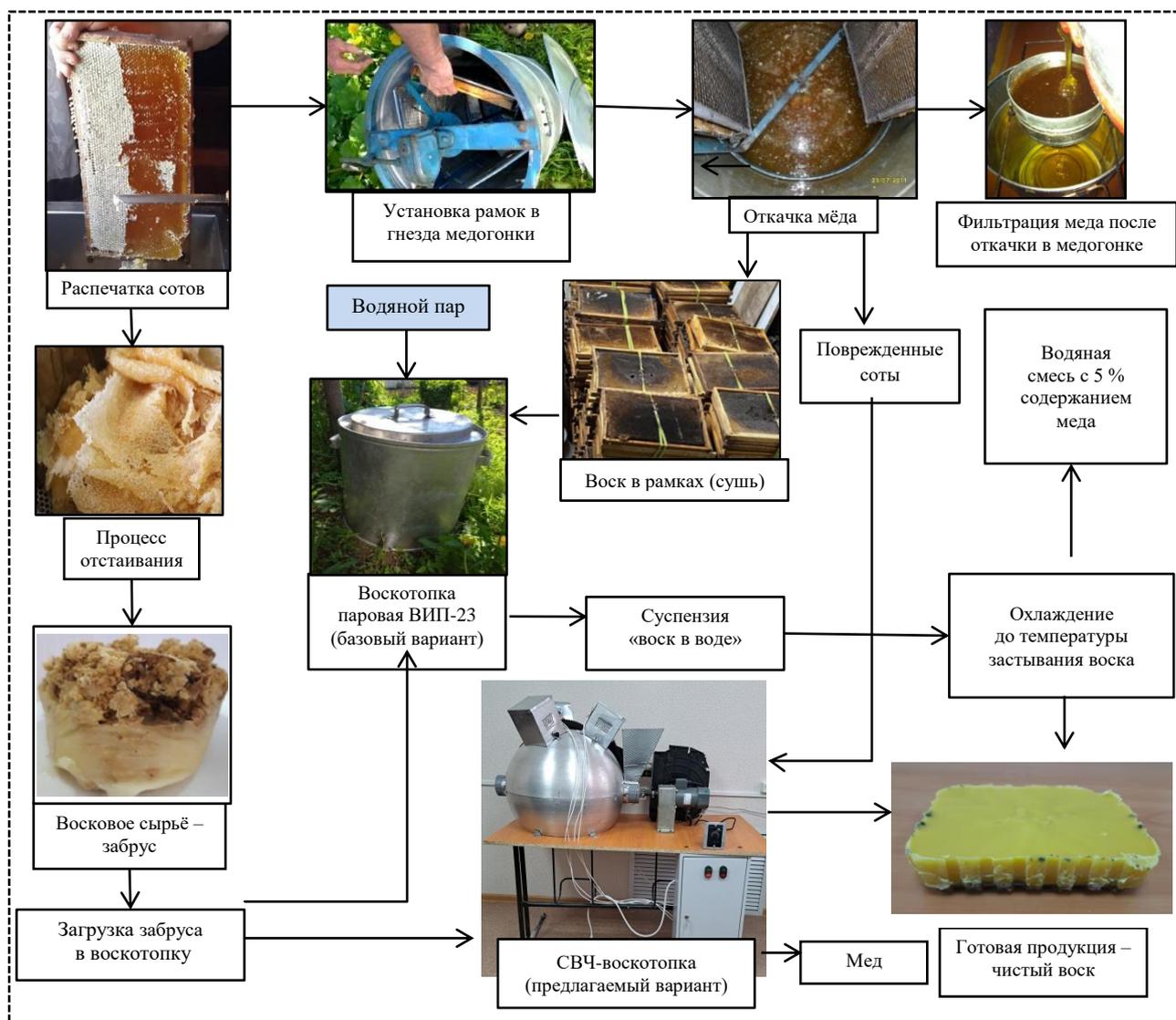


Рисунок 3.3 – Базовая и проектируемая машинно-аппаратные схемы переработки воскового сырья в условиях пасеки

Базовая схема предполагает отдельную вытопку забруса и остального воскового сырья (сушь). Отличие проектной схемы от базовой заключается в том, что старые и поврежденные во время откачки мёда соты перерабатываются вместе с забрусом в СВЧ-воскотопке. При выборе варианта исполнения СВЧ-воскотопки (рисунок 3.4) пчеловодческим хозяйствам стоит ориентироваться на производительность установок и объемы перерабатываемого в хозяйстве воскового сырья. Каждое конструктивное исполнение следует оценить с точки зрения реализации основных критериев проектирования СВЧ-техники для пчеловодческих хозяйств.

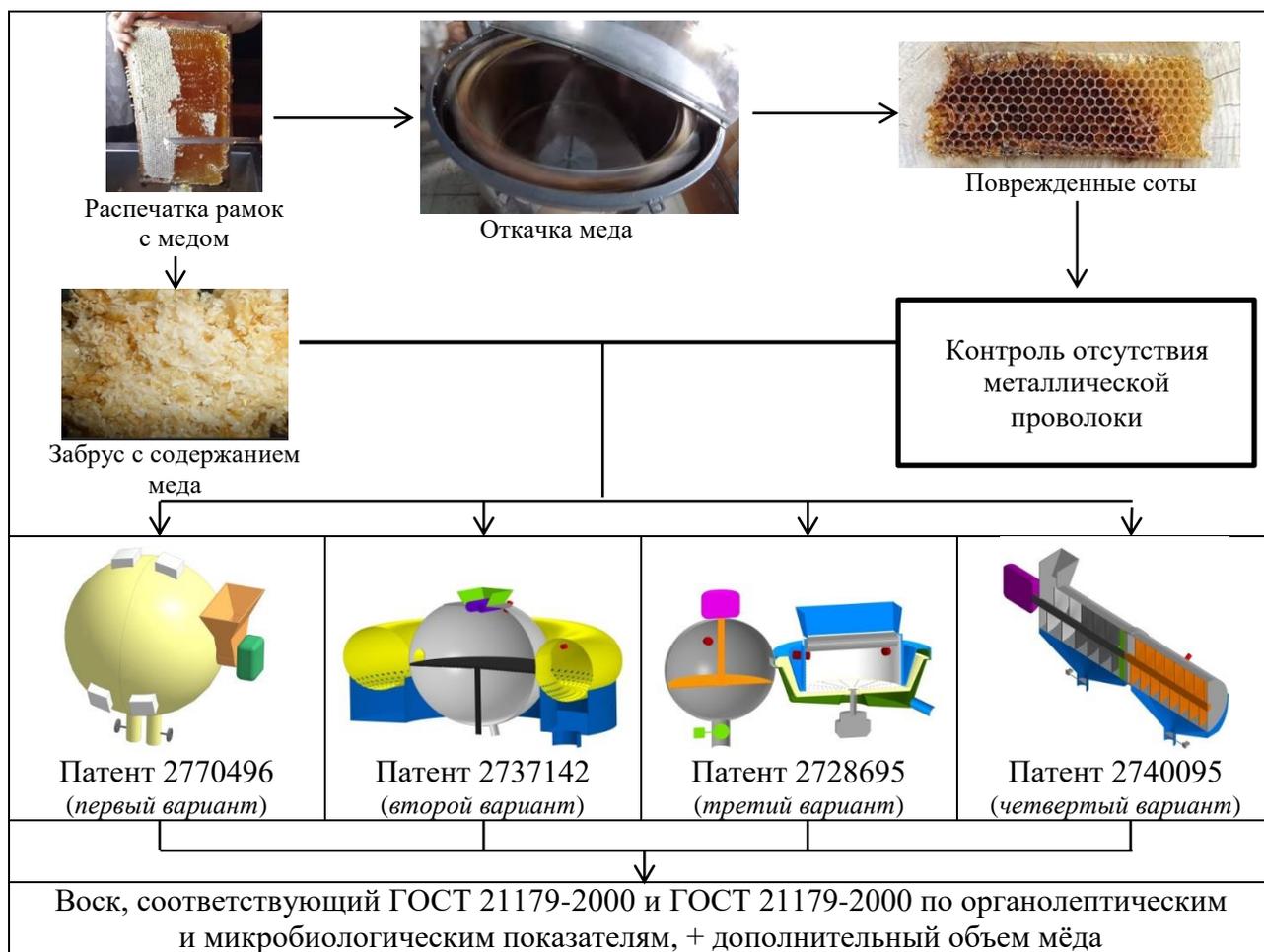


Рисунок 3.4 – Варианты предлагаемой технологической линии вытопки воска и отделения меда с использованием двухрезонаторных СВЧ-воскотопок непрерывно-поточного действия

Первый и четвертый варианты предлагаемой технологической линии вытопки воска предусматривают использование СВЧ-воскотопок, в которых перемещение сырья осуществляется нагнетательным шнеком, что обеспечивает высокую производительность установок с низкими удельными затратами электроэнергии. Во втором и третьем вариантах предлагаемой технологической линии используются СВЧ-воскотопки, в которых перемещение сырья обеспечивается за счет центробежной силы, что снижает их производительность, при этом удельные затраты электроэнергии выше, чем в 1-м и 4-м вариантах. В связи с этим 1-й и 4-й варианты рекомендуются для крупных пчеловодческих хозяйств и пасек, в которых объем перерабатываемого воскового сырья превышает 500 кг, 2-й и 3-й варианты – для хозяйств с меньшим объемом переработки сырья.

3.3 Двухрезонаторные СВЧ-воскотопки непрерывно-поточного действия для отделения меда и вытопки пасечного воска

3.3.1 СВЧ-воскотопка с полусферическими резонаторами

Установка предназначена для отделения меда и вытопки воска из пчелиного воскового сырья в пасечных условиях (патент 2770496) [83; 87], (рисунок 3.5). С учетом требований, предъявляемых к технологии переработки воскового сырья, разработана СВЧ-воскотопка, состоящая из двух резонаторов, позволяющая совмещать процессы отделения имеющегося в сырье меда, вытапливать и обеззараживать воздействием ЭМП СВЧ пчелиный воск.

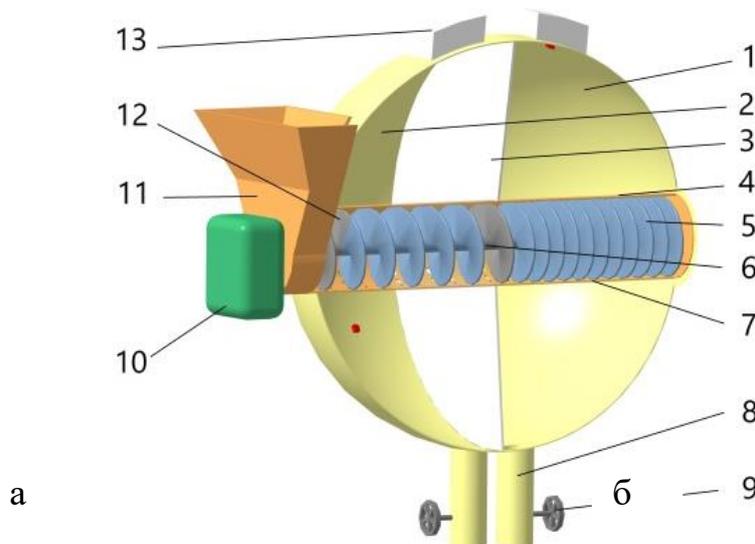


Рисунок 3.5 – СВЧ-воскотопка непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами для вытопки пасечного воска с отделением меда: 1, 2 – перфорированные полусферические резонаторы; 3 – кольцевой диск; 4 – фторопластовый корпус шнека; 5 – фторопластовые витки шнека; 6 – фторопластовый вал; 7 – перфорированная часть фторопластового корпуса; 8 – запердельные волноводы; 9 – шаровые краны; 10 – электропривод нагнетательного шнека; 11 – неферромагнитная приемная емкость с заслонкой; 12 – неферромагнитные витки нагнетательного шнека; 13 – магнетроны

Из-за того, что кристаллизованный мед начинает плавиться при температуре 44–45 °С, а пчелиный воск плавится при температуре 64 °С, в одном резонаторе осуществить эти процессы сложно. Поэтому технической задачей является разработка установки, обеспечивающей вытопку воскового сырья воздействием ЭМП СВЧ соответствующей дозы для воска и меда и разделение их на отдельные компоненты. СВЧ-воскотопка содержит две неферромагнитные полусферы 1, 2, состыкованные с общим вертикально расположенным неферромагнитным кольцевым диском 3, образуя полусферические резонаторы.

На поверхности полусфер по наибольшему периметру расположены магнетроны 13 воздушного охлаждения, излучатели которых направлены внутрь резонаторов. Внутри полусферических резонаторов через отверстие кольцевого диска проложен фторопластовый нагнетательный шнек (корпус 4, диэлектрические витки 5, у которого первый и центральный витки 12 неферромагнитные, а над первым неферромагнитным витком расположена неферромагнитная приемная емкость 11, при этом шаг витков не более, чем две глубины проникновения волны. Нижняя часть 7 фторопластового корпуса нагнетательного шнека перфорирована, а диэлектрический вал 6 шнека соединен с валом электродвигателя 10, расположенного с наружной стороны полусферического резонатора. Снизу полусфер прикреплены запердельные волноводы 8 с шаровыми кранами 9 [77; 134].

Технологический процесс вытопки насечного воска с отделением меда в СВЧ-воскотопке непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами происходит следующим образом. Загрузить приемную емкость восковым сырьем, предварительно закрыв заслонку. Закрывать шаровые краны на запердельных волноводах. Включить электропривод для вращения витков нагнетательного шнека во фторопластовом корпусе и с фторопластовым валом. Открыть заслонку в приемной емкости. В момент, когда сырье посредством нагнетательного шнека окажется в первом полусферическом резонаторе, следует включить СВЧ-генераторы (магнетроны), каждый из которых возбуждает электромагнитное поле сверхвысокой частоты (12,24 см, 2450 МГц). Напряженности ЭП от каждого генератора интерферируются. Первый и центральный витки, выполненные из нефер-

ромагнитного материала, ограничивают распространение электромагнитных волн за пределами полусферы. Толщина сырья в межвитковом пространстве не превышает две глубины волны, поэтому восковое сырье нагревается за счет токов поляризации равномерно и избирательно в соответствии значениям фактора диэлектрических потерь меда и воска. При достижении температуры до 45 °С увеличивается текучесть меда, и он просачивается через перфорированную часть фторопластового корпуса шнека. Воск с помощью витков нагнетательного шнека попадает во второй полусферический резонатор, где доза воздействия ЭМП СВЧ выше, чем в первом резонаторе, достаточная, чтобы нагреть до температуры плавления 64 °С.

Частота вращения вала электродвигателя и удельные мощности генераторов в каждом резонаторе согласованы с необходимой температурой для вытопки меда и воска (до 44–45 °С для меда и до 64 °С для воска). Накопленный мед в первом полусферическом резонаторе и жидкий воск во втором полусферическом резонаторе сливаются через соответствующие запредельные волноводы при открытии шаровых кранов. После завершения термообработки всего объема воскового сырья выключить СВЧ-генераторы, электродвигатель шнека, вентилятора и слить весь мед и воск.

Производительность установки зависит от количества СВЧ-генераторов, от электрофизических параметров исходного пчелиного воскового сырья и содержания в нем меда. Технические характеристики СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами

Наименование	Значение
Производительность, кг/ч	29
Потребляемая энергия 3 генераторов, кВт·ч	3,18
Мощность мотор-редуктора, кВт	0,2
Мощность вентилятора для охлаждения магнетронов, кВт	0,2
Потребляемая энергия СВЧ-воскотопки, кВт·ч	3,58
Общие удельные энергетические затраты на вытопку воска и отделение меда, кВт·ч/кг	0,13

Преимущества: полусферические резонаторы обладают достаточно высокой собственной добротностью; за счет интерференции волн можно обеспечить высокую напряженность электрического поля.

3.3.2 СВЧ-воскотопка с совмещенными сферическим и кольцевым резонаторами

СВЧ-воскотопка для вытопки воска и отделения меда (патент № 2737142) [85] состоит из неферромагнитного сферического резонатора 5, плотно прилегающего к поверхности горизонтально расположенного неферромагнитного кольцевого резонатора 7 по малому периметру (рисунок 3.7) [142]. На месте стыка сферического и кольцевого резонаторов имеются выгрузные отверстия 14, диаметром менее четверти длины волны. Ниже от этих отверстий внутри неферромагнитного сферического резонатора расположен диэлектрический перфорированный диск 6 на диэлектрическом валу, вращающийся от электродвигателя 13. На поверхности резонаторов расположены магнетроны 4, 8 с пространственным сдвигом на 120° и направленными внутрь излучателями. Основание неферромагнитного кольцевого резонатора перфорировано 9. Под нижней перфорированной поверхностью кольцевого резонатора установлена неферромагнитная накопительная емкость 10, содержащая сливной патрубок 11 с заслонкой. Наверху неферромагнитного сферического резонатора установлена приемная емкость 1 с помощью неферромагнитного крепежного элемента 3, содержащая рифленые неферромагнитные валки 2, а на дне сферического резонатора предусмотрен запредельный волновод 12 с шаровым краном.

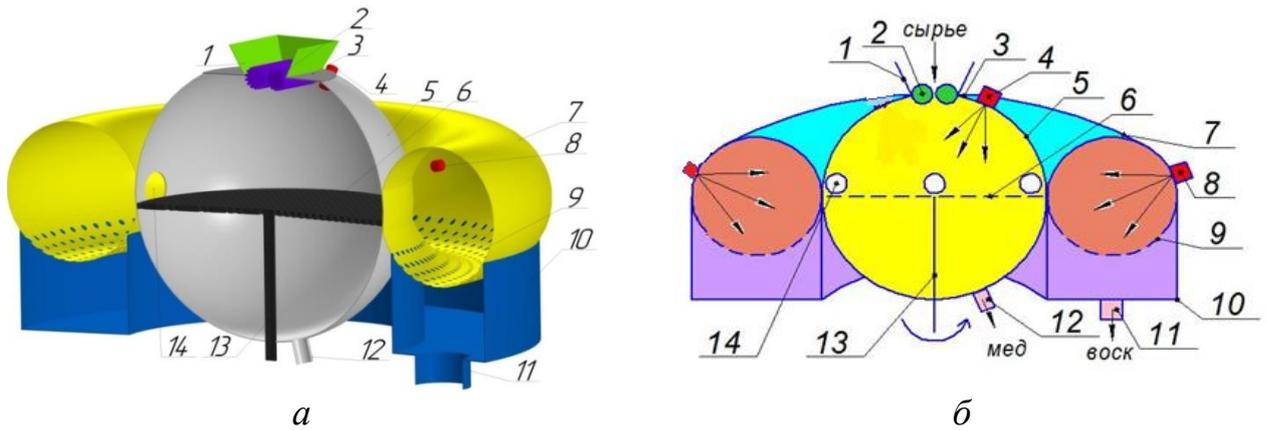


Рисунок 3.7 – СВЧ-воскотопка для вытопки воскового сырья с отделением меда:

- a, б* – пространственное и схематическое изображения; 1 – приемная емкость; 2 – рифленые неферромагнитные валки; 3 – крепежный элемент; 4 – магнетроны с волноводами на сферическом резонаторе; 5 – сферический резонатор; 6 – диэлектрический перфорированный диск; 7 – кольцевой резонатор; 8 – магнетроны с излучателями, направленными внутрь кольцевого резонатора; 9 – перфорированное основание кольцевого резонатора; 10 – накопительная емкость; 11 – сливной патрубок; 12 – запредельный волновод с шаровым краном; 13 – диэлектрический вал; 14 – выгрузные отверстия

Технологический процесс отделения меда и вытопки воска происходит следующим образом. Открыть шаровой кран на запредельном волноводе и заслонку на сливном патрубке. Включить электродвигатели для привода диэлектрического перфорированного диска и для вращения рифленых неферромагнитных валков. Пчелиным восковым сырьем загрузить приемную емкость. Восковое сырье с помощью рифленых валков дозируется на диэлектрический перфорированный вращающийся диск. После чего включить СВЧ-генераторы в сферическом резонаторе, каждый из которых возбуждает ЭМП СВЧ. После отделения находящегося в сырье меда восковое сырье по поверхности вращающегося перфорированного диска за счет центробежных сил переместится через выгрузные отверстия 14 в сферическом резонаторе в рабочую зону кольцевого резонатора 7. Далее включить магнетроны 8. Восковое сырье нагревается избирательно за счет токов поляризации, в соответствии электрофизическими параметрами компонентов (меда и воска). Электрические поля от каждого генератора интерферируются. Для отделе-

ния меда от воскового сырья необходимо увеличить текучесть за счет диэлектрического нагрева до 45 °С. Если нагреть мед выше 45 °С, в нем разрушаются ферменты и витамины, так как у меда начинает меняться структура – становится более текучей и темной [47]. Мед обладает бактерицидными свойствами, что позволяет хранить его достаточно долго, но при температуре 45 °С начинается процесс разрушения ферментов, и, как следствие, его бактерицидное действие снижается, уменьшается лечебная ценность [47].

Поэтому в полусферическом резонаторе под воздействием ЭМП СВЧ мед следует нагревать не более 45 °С, повышая его текучесть, что дает возможность отделить его от воскового сырья.



Рисунок 3.8 –
Разработанные узлы
СВЧ-воскотопки

После отделения мед стекает через перфорацию электроприводного диэлектрического диска, где он сливается через сливной патрубок (запредельный волновод 12). Поскольку воск еще не нагрелся до температуры плавления, то он за счет центробежной силы будет перемещаться через выгрузные отверстия 14 в рабочую зону кольцевого резонатора, где при соответствующей дозе воздействия ЭМП СВЧ будет вытапливаться и вытечет через нижнюю перфорацию 9 в накопительную емкость 10. Далее воск можно слить через сливной патрубок 11 при открытии заслонки. Производительность воскотопки зависит от количества СВЧ-генераторов и от содержания остаточного меда в исходном пчелином восковом сырье.

Преимущества: сферический резонатор обладает высокой собственной добротностью, следовательно, высоким термическим КПД, а в кольцевом резонаторе возбуждается интерферирующая бегущая волна, что обеспечивает равномерный нагрев пасечного воска.

Недостатки: конструкция установки не предусматривает выход отходов (мервы) в процессе переработки сырья. Мерва будет накапливаться во втором резонаторе, требуя периодического ее извлечения, снижая производительность.

Технические характеристики СВЧ-воскотопки сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики СВЧ-воскотопки со сферическим и кольцевым резонаторами

Наименование	Значение
Производительность, кг/ч	19
Потребляемая энергия 3 генераторов, кВт·ч	3,18
Мощность привода валкового дозатора, кВт	0,15
Мощность привода фторопластового диска, кВт	0,32
Мощность вентилятора для охлаждения магнетронов, кВт	0,2
Потребляемая энергия СВЧ-воскотопки, кВт·ч	3,85
Общие удельные энергетические затраты на вытопку воска и отделение меда, кВт·ч/кг	0,21

3.3.3 СВЧ-воскотопка с цилиндрическим и сферическим резонаторами

Первый модуль СВЧ-воскотопки (патент № 2728659) [84] содержит соосно расположенные два усечённых конуса 5, 7 из неферромагнитного материала без верхних оснований, малыми основаниями вниз. Кольцевой промежуток между верхними краями усеченных конусов закрыт неферромагнитным материалом. Между этими усеченными конусами соосно расположена диэлектрическая коническая тарелка 6 (рисунок 3.10).

На основании соосно расположен неферромагнитный терочный диск 8. Они вращаются вместе с помощью электродвигателя 10. На месте малого основания внутреннего усеченного конуса соосно установлен неферромагнитный цилиндр 3 в экранирующем цилиндре 11 без нижнего основания, а на верхнее основание установлена приемная емкость 1, содержащая неферромагнитные рифленые валки 2. На боковой поверхности неферромагнитного цилиндра установлены магнетроны 4 со сдвигом на 120 градусов. Цилиндр и терочный диск образуют цилиндрический резонатор и при этом зазор между ними менее четверти длины волны.

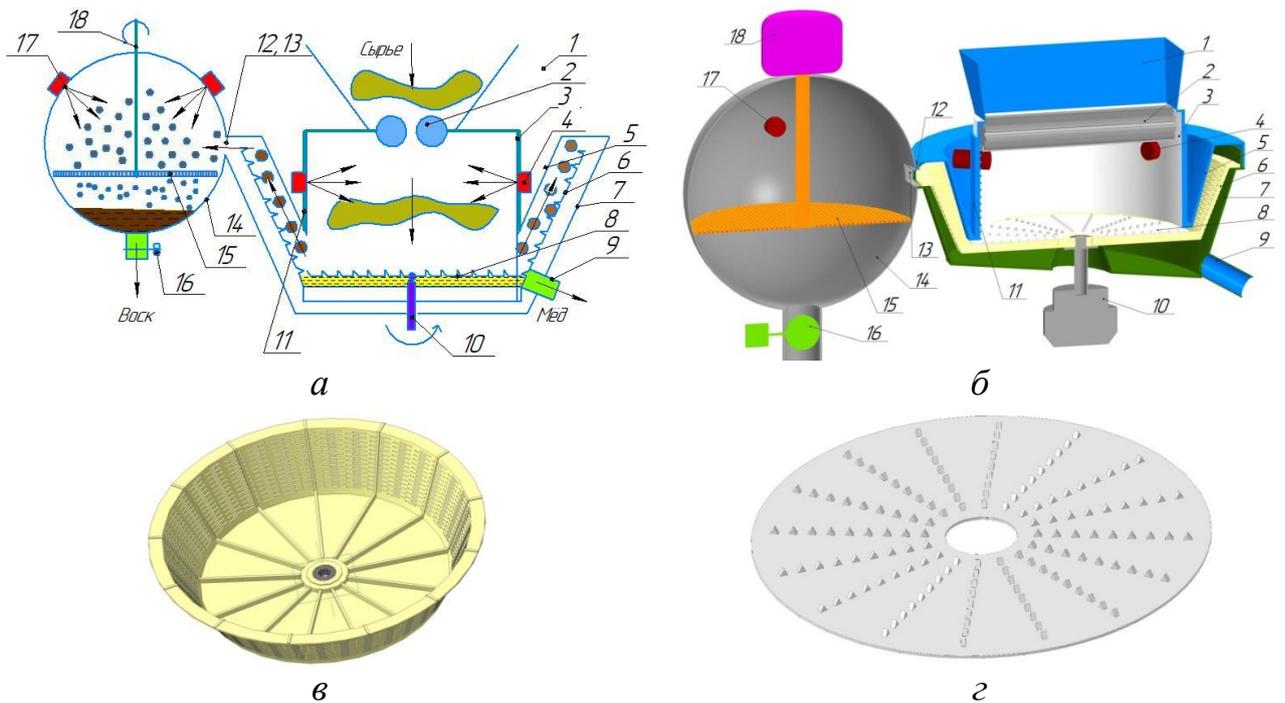


Рисунок 3.10 – СВЧ-воскотопка с цилиндрическим резонатором-центрифугой и сферическим резонатором: *а, б* – схематическое и пространственное изображения; 1 – приемная емкость; 2 – рифленые неферромагнитные валки; 3 – цилиндрический резонатор; 4, 17 – магнетроны; 5 (*в*) – внутренний неферромагнитный усеченный конус; 6, *г* – коническая диэлектрическая перфорированная тарелка; 7 – наружный неферромагнитный усеченный конус; 8 – неферромагнитный терочный диск; 9 – сливной патрубок; 10, 18 – электродвигатель для привода терочного диска и тарелки; 11 – неферромагнитный корпус; 12 – выгрузное отверстие на наружном усечённом корпусе; 13 – отверстие в сферическом резонаторе; 14 – сферический резонатор; 15 – диэлектрический перфорированный диск; 16 – запредельный волновод с шаровым краном

На образующей наружного усеченного конуса имеется выгрузное отверстие 12, находящееся над краем диэлектрической конической тарелки. К выгрузному отверстию пристыкован сферический резонатор 14. Внутри сферического резонатора в горизонтальной плоскости расположен фторопластовый перфорированный диск 15, вращающийся от электродвигателя 18. С наружной стороны сферического резонатора расположены магнетроны 17 с излучателями, направленными внутрь, с про-

странственным сдвигом на 120° , и запредельный волновод 16 с шаровым краном для слива готовой продукции. Высокая интенсивность теплообмена в воскотопке достигается путем совмещения процесса измельчения сырья терочным диском в центробежном поле и эндогенного нагрева с процессом предварительного отделения меда от воска и вытопки его под воздействием ЭМП СВЧ. При этом в каждом резонаторе появляется возможность регулировать дозу воздействия ЭМП СВЧ в соответствии с их температурой плавления (воск плавится при температуре выше 64°C , а мед – выше 44°C). СВЧ-воскотопка содержит два модуля. В первом модуле технологический процесс отделения меда от воскового сырья происходит в цилиндрическом резонаторе 3, а во втором – вытопка пасечного воска в сферическом резонаторе [143].

Технологический процесс термообработки пчелиного воскового сырья и отделения меда происходит следующим образом. В первом модуле технологический процесс основан на измельчении воскового сырья с помощью дисковой терки, диэлектрическом нагреве в цилиндрическом резонаторе и отжиме измельченных масс через прорезы диэлектрической тарелки за счет центробежных сил. Вначале нужно загрузить пчелиное восковое сырье в приемную емкость, включить электропривод, обеспечивающий вращение неферромагнитного терочного диска и конической диэлектрической тарелки, открыть сливной патрубок 9 цилиндрического резонатора и шаровой кран сферического резонатора. Далее необходимо включить электропривод рифленых неферромагнитных валков для подачи воскового сырья в рабочую зону. Как только восковое сырье окажется в цилиндрическом резонаторе, включить СВЧ-генераторы первого модуля. За счет диэлектрического нагрева содержащийся в восковом сырье мед отделяется и через перфорацию стечёт в приемную емкость, а восковое сырье за счет центробежных сил перемещается по терочному диску и конической диэлектрической тарелке к выгрузному отверстию. Как только сырье окажется в рабочей зоне сферического резонатора – включить магнетроны. Здесь произойдет нагрев воскового сырья до 64° , его расплавление, и он через диэлектрический перфорированный диск стечет в накопительную часть сферического резонатора. В цилиндрическом резонаторе восковое

сырье перемешивается и измельчается при вращении неферромагнитного терочного диска и подвергается воздействию ЭМП СВЧ. При диэлектрическом нагреве пчелиного воскового сырья в первую очередь растапливается мед. Восковое сырье, попадая в коническую диэлектрическую тарелку, прижимается к ее боковой поверхности и поднимается вверх к выгрузному отверстию на наружном усечённом корпусе. При этом жидкий мед за счет центробежной силы при прижатии сырья к боковой поверхности диэлектрической тарелки вытекает через ее прорезы, далее сливается через сливной патрубок. Отделение пасечного воска от меда за счет создания избыточного давления между конической диэлектрической тарелкой с прорезями и усеченными конусами происходит в области отжима. Функцию центрифуги выполняет диэлектрическая коническая тарелка с прорезями на боковой поверхности, а неферромагнитный терочный диск является основанием цилиндрического резонатора и способствует измельчению сырья. Такая конструкция рабочей камеры с цилиндрическим резонатором, имеющим вращающееся основание, и конической тарелкой с прорезями обеспечивает предварительный диэлектрический нагрев воскового сырья и разделение его на мед – жидкую фракцию и воск – твердую фракцию. Фильтрация растопленного меда от воскового сырья через прорезы на боковой поверхности конической диэлектрической тарелки происходит за счет центробежных сил.

Преимущества: Высокая интенсивность теплообмена достигается путем совмещения процесса измельчения сырья терочным диском в центробежном поле и эндогенного нагрева с процессом отделения меда от воска.

Недостатки: конструкция установки не предусматривает выход отходов (мервы) в процессе переработки сырья. Мерва будет накапливаться во втором резонаторе, требуя периодического ее извлечения, снижая производительность

Технические характеристики СВЧ-воскотопки с совмещенными цилиндрическим и сферическим резонаторами приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Технические характеристики СВЧ-воскотопки
с совмещенными цилиндрическим и сферическим резонаторами

Наименование	Значение
Производительность, кг/ч	21
Потребляемая энергия 3 генераторов, кВт·ч	3,18
Мощность привода валкового дозатора, кВт	0,15
Мощность привода терочного диска и тарелки, кВт	0,32
Мощность привода фторопластового диска, кВт	0,32
Мощность вентилятора для охлаждения магнетронов, кВт	0,2
Потребляемая энергия СВЧ-воскотопки, кВт·ч	4,17
Общие удельные энергетические затраты на вытопку воска и отделение меда, кВт·ч/кг	0,2

3.3.4 СВЧ-воскотопка с состыкованными цилиндрическими резонаторами

СВЧ-воскотопка (патент № 2740095) [86] с состыкованными цилиндрическими резонаторами для термообработки воскового сырья в непрерывном режиме выполнена следующим образом (рисунок 3.12) [160].

Горизонтально расположенные цилиндрические резонаторы 2, 9 выполнены из неферромагнитного материала, состыкованы между собой с помощью прижимного кольца 6, внутри которого расположен измельчающий механизм 7, содержащий нож и решетку. Внутри резонаторов последовательно на одном электрическом валу 5 расположены два нагнетательных шнека 4 с измельчающим механизмом между ними. Второй цилиндрический резонатор с магнетронами 8, электрическим нагнетательным шнеком 10 и приемной емкостью 12 состыкован с первым цилиндрическим резонатором 2 так, что электрические валы нагнетательных шнеков фиксированы между собой, образуя общий вал.

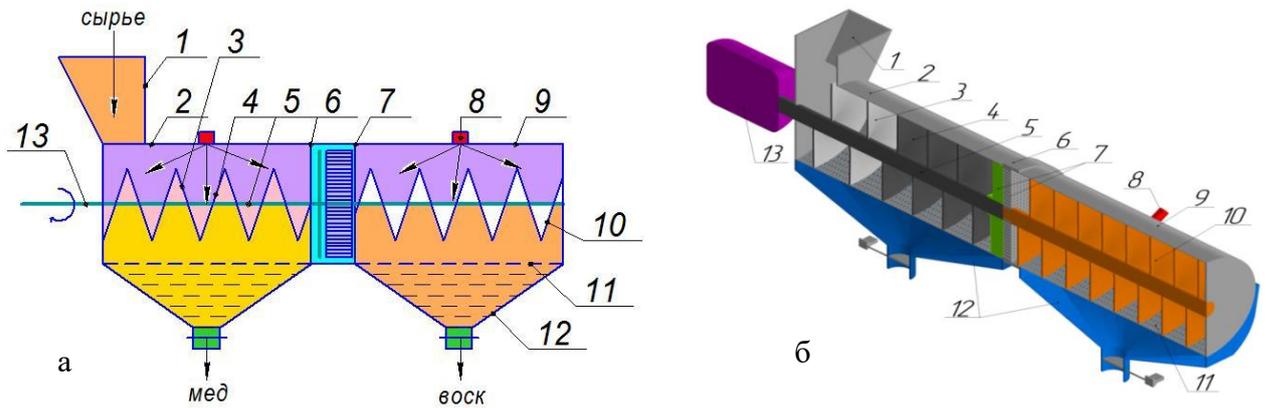


Рисунок 3.12 – СВЧ-воскотопка с состыкованными цилиндрическими резонаторами для термообработки воскового сырья в непрерывном режиме: а, б – схематическое и пространственное изображения; 1 – загрузочная емкость; 2 – первый цилиндрический резонатор; 3 – неферромагнитные витки первого нагнетательного шнека 4; 5 – диэлектрический вал; 6 – прижимное кольцо; 7 – измельчающий механизм; 8 – магнетроны; 9 – второй цилиндрический резонатор; 10 – диэлектрический нагнетательный шнек во втором резонаторе; 11 – перфорированные части резонаторов 2 и 9; 12 – приемные емкости со сливными патрубками, содержащими заслонки; 13 – электродвигатель

Первоначальные витки 3 первого нагнетательного шнека выполнены из неферромагнитного материала, а последующие его витки и витки второго нагнетательного шнека выполнены из фторопласта. Нагнетательные шнеки и измельчающий механизм вращаются от электродвигателя 13. Загрузочная емкость 1, выполненная из неферромагнитного материала, расположена над неферромагнитными витками первого нагнетательного шнека на первом цилиндрическом резонаторе. На боковых поверхностях неферромагнитных цилиндрических резонаторов установлены маломощные магнетроны с воздушным охлаждением. Нижние части цилиндрических резонаторов перфорированы 11 и под ними расположены неферромагнитные приемные емкости с заслонками.

Технологический процесс отделения меда от вытапливаемого воскового сырья в СВЧ-воскотопке непрерывно-поточного действия происходит следующим образом [81]. Закрывать заслонку на загрузочной емкости и заслонки в приемных емкостях, после чего загрузить восковое сырье. Включить электродвигатель

для вращения нагнетательных шнеков и ножа измельчающего механизма с помощью диэлектрического вала. Открыть заслонку на загрузочной емкости и включить СВЧ-генераторы на первом цилиндрическом резонаторе, после чего в этом резонаторе возбуждается ЭМПСВЧ. Когда восковое сырье после отделения от меда поступит в рабочую зону второго неферромагнитного цилиндрического резонатора – включить магнетрон второго цилиндра. Восковое сырье, попадая в межвитковое пространство первого нагнетательного шнека, подвергается воздействию ЭМПСВЧ, эндогенно нагревается (до температуры 40–45 °С), мед топится и вытекает через перфорацию первого резонатора в приемную емкость, что позволит отделить мед от воскового сырья. Причем несколько начальных витков, выполненных из неферромагнитного материала первого нагнетательного шнека, ограничивает излучение через загрузочную емкость, перекрывая дно емкости при вращении шнека [122].

После нагнетания воска измельчающим механизмом во второй неферромагнитный цилиндрический резонатор следует включить магнетроны, расположенные на его боковой поверхности. Здесь под воздействием ЭМПСВЧ воск разогреется до 60–65 °С и через перфорацию нижней части второго резонатора стечет в приемную емкость. Доза воздействия ЭМПСВЧ в каждом резонаторе согласована с температурой плавления меда и воска и регулируется изменением мощности генераторов. Восковое сырье нагревается избирательно за счет токов поляризации, в соответствии с электрофизическими параметрами компонентов меда и воска. Сливать воск и мед необходимо по мере наполнения соответствующих емкостей через патрубки, открывая заслонки. Производительность установки регулируется количеством генераторов и зависит от состояния исходного пчелиного воскового сырья [122].

Преимущества:

- 1) критическая длина волны в цилиндрическом резонаторе не зависит от длины цилиндра;
- 2) равномерный нагрев воскового сырья достигается за счет измельчения с помощью измельчающего механизма между нагнетательными шнеками с согласованными шагами витка с глубиной проникновения волны в сырье.

Сводные данные технических характеристик четырех СВЧ-воскотопок приведена в таблице 3.5.

Таблица 3.4 – Технические характеристики СВЧ-воскотопки

Наименование	Значение
Производительность, кг/ч	24
Потребляемая энергия 3 генераторов, кВт·ч	3,18
Мощность мотор-редуктора, кВт	0,4
Мощность вентилятора для охлаждения магнетронов, кВт	0,2
Потребляемая энергия СВЧ-воскотопки, кВт·ч	3,78
Общие удельные энергетические затраты на вытопку воска и отделение меда, кВт·ч/кг	0,16

Таблица 3.5 – Сводная таблица технических характеристик четырех СВЧ-воскотопок

№	СВЧ-воскотопки	К-во магнетронов	Производительность, кг/ч	Потребляемая энергия, кВт·ч	Общие удельные энергетические затраты, кВт·ч/кг
1	С полусферическими резонаторами	3	27	3,58	0,13
2	Со сферическим и кольцевым резонаторами	3	19	3,85	0,21
3	С цилиндрическим и сферическим резонаторами	3	21	4,17	0,2
4	С цилиндрическими резонаторами	3	24	3,78	0,16

Анализ технических характеристик двухрезонаторных СВЧ-воскотопок разной конструкции показывает, что в зависимости от мощности электроприводов измельчающих и транспортирующих механизмов удельные энергетические затраты на вытопку воска составляют 0,13–0,21 кВт·ч/кг.

Рациональной конструкцией СВЧ-воскотопки для применения в пасечных условиях можно считать воскотопку с полусферическими резонаторами с тремя магнетронами по 850 Вт, потребляемой энергией 3,58 кВт·ч, энергетическими затратами 0,13 кВт·ч/кг. Поэтому изготовлен опытный образец такой конструкции (см. рисунок 4.2.).

Особенности. В разработанных СВЧ-воскотопках применены магнетроны с воздушным охлаждением, которые имеют сравнительно низкие рабочие напряжения (3,8–4,1 кВ) и достаточно компактны. Они работают на частоте **2450 МГц**, при которой КПД генератора равна 55–60 %, и такая частота обеспечивает более равномерное распределение энергии в объеме резонатора, глубина проникновения волны 1–10 см в зависимости от вида сырья.

КПД магнетрона, работающего на частоте **915 МГц**, достигает до 80 %. Такая частота обеспечивает проникновение энергии ЭМП на большую глубину. Но магнетроны на такую частоту выпускают мощностью 25–30 кВт.

В работе реализованы резонаторы: сферический, полусферический, цилиндрический, где возбуждаются стоячие волны; кольцевой (патент № 2737142) и тороидальный (патент № 2803541) резонаторы, где возбуждается бегущая волна.

Ниже приведено описание СВЧ-воскотопки *с тороидальным резонатором* для работы в непрерывном режиме и рассмотрены ее особенности.

3.3.5 СВЧ воскотопка непрерывно-поточного действия с тороидальным резонатором

СВЧ-воскотопка непрерывно-поточного действия с тороидальным резонатором 1 (рисунок 3.13, патент № 2803541) [91]. Он представлен как соосно расположенные цилиндры разной высоты с круглыми поперечными сечениями, образующие тороидальную 5 и конденсаторную 8 части резонатора. У цилиндров основания по периферии перфорированы, и над ними установлены соответствующие электроприводные терочные диски 6, 10 на одном диэлектрическом валу 11. Боковая поверхность 4 внутреннего ферромагнитного цилиндра выполнена в виде терки, а на его верхнем ферромагнитном основании 2 расположен ферромагнитный шлюзовой дозатор 3. Внутри наружного ферромагнитного цилиндра

дра резонатора 1, в конденсаторной части 8, к боковой поверхности прикреплена керамическая обечайка 9, через которой направлены излучатели от магнетронов 13 воздушного охлаждения, расположенных с наружной стороны по периметру цилиндра со сдвигом на 120 градусов. Под перфорацией нижнего основания расположен неферромагнитный желоб 12 с патрубками, выполняющими функцию запердельного волновода.

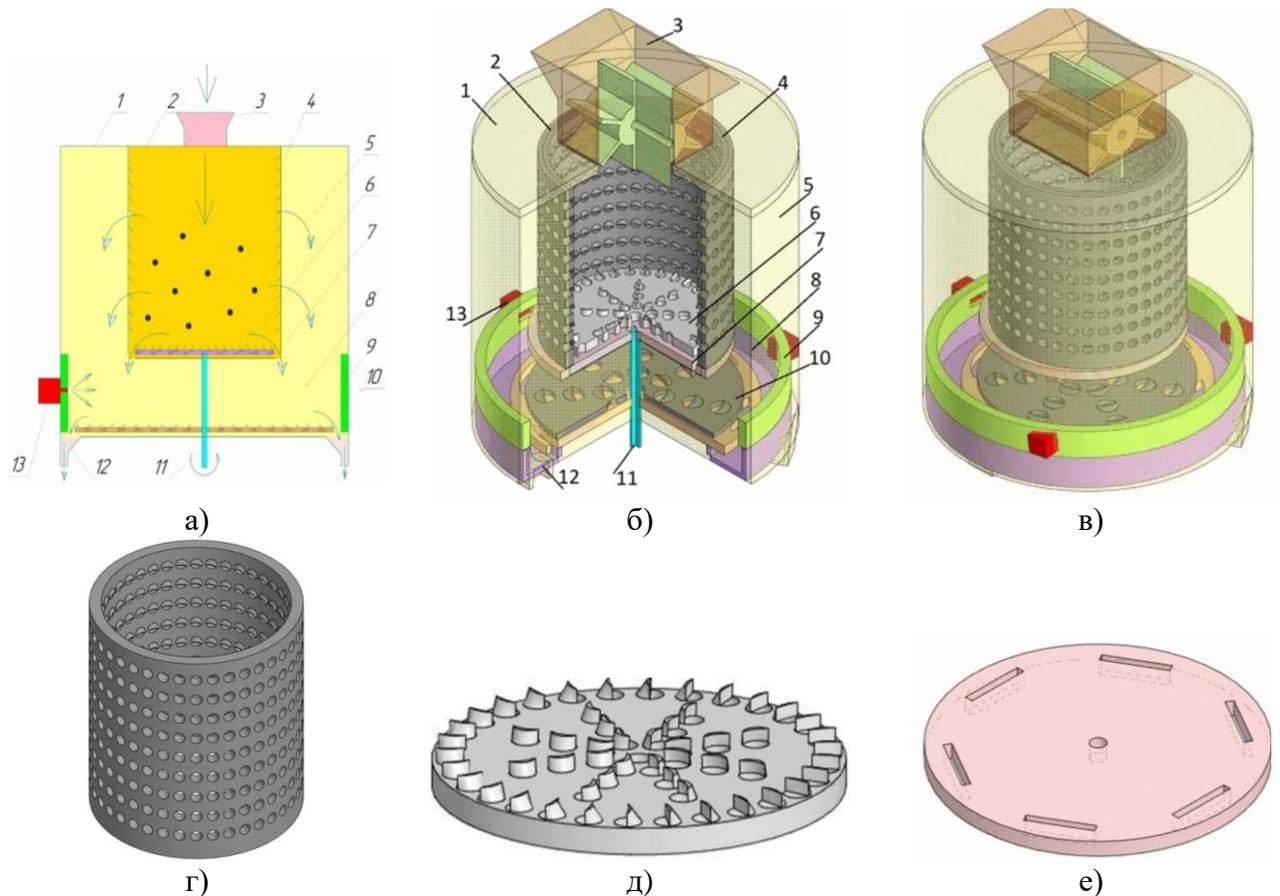


Рисунок 3.13 – СВЧ-воскотопка непрерывно-поточного действия с тороидальным резонатором: а) технологическая схема; б, в) общий вид; г) внутренний цилиндр; д) верхний терочный диск; е) основание; 1 – тороидальный резонатор; 2 – экранирующее основание; 3 – шлюзовой дозатор; 4 – внутренний цилиндр с терочной обечайкой; 5 – тороидальная часть резонатора; 6 – верхний неферромагнитный терочный диск на валу; 7 – перфорированная часть нижнего основания внутреннего цилиндра; 8 – конденсаторная часть резонатора; 9 – керамический цилиндр; 10 – нижний неферромагнитный терочный диск на валу; 11 – электрический вал привода дисков; 12 – неферромагнитный желоб с запердельными волноводами; 13 – волноводы с магнетронами

Технологический процесс в СВЧ-воскотопке непрерывно-поточного действия с тороидальным резонатором происходит следующим образом. Загрузить емкость над шлюзовым дозатором 3. Включить мотор-редуктор для привода терочных дисков 6, 10, расположенных на одном валу 11. Включить электропривод шлюзового дозатора 3 для загрузки пасечного воска во внутренний цилиндр с терочной обечайкой 4. За счет центробежной силы при вращении терочного диска 6, сырье крошится и через отверстия на терочной обечайке, а также через перфорированную часть 7 нижнего основания сбрасывается в конденсаторную часть 8 тороидального резонатора 1, после чего следует включить вентиляторы с генераторами 13. Тогда в тороидальном резонаторе возбуждается бегущая волна, которая обеспечивает равномерное распределение ЭП в конденсаторной части 8 резонатора. ЭП в основном концентрируется в конденсаторной части резонатора, где напряженность ЭП высокая (0,6–1,5 кВ/см), достаточная для вытопки и обеззараживания сырья. Сырье подвергается воздействию ЭМП СВЧ, эндогенно нагревается за счет токов поляризации, плавится, стекает через перфорацию на нижнем основании резонатора, в неферромагнитный желоб 12, содержащий патрубки с шаровыми кранами.

В конденсаторной части резонатора керамическая обечайка 9 позволит концентрировать энергию электромагнитных излучений в воске и уменьшить потери на излучение, так как керамика обладает малыми диэлектрическими потерями [127, с. 360]. Скорость нагрева воска регулируется дозой воздействия ЭМП СВЧ.

Тороидальные резонаторы в своей конструкции содержат зазор (конденсаторную часть). Энергия электрического поля локализуется в малой цилиндрической области зазора, высотой d . Энергия магнитного поля в основном концентрируется в тороидальной области с наружным диаметром $2 \cdot b$ и внутренним диаметром $2 \cdot a$. В области зазора вдоль оси резонатора протекает ток смещения. Эквивалентная индуктивность [5, с. 251]:

$$L_{\text{экв}} = \frac{\mu_0 \cdot H}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,7344}{0,0628} \cdot \ln\left(\frac{0,2448}{0,068}\right) = 188 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.} \quad (3.1)$$

Эквивалентная емкость:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \pi \cdot r^2 \div d = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,14 \cdot 0,068^2 \div 0,0612 = 2,1 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}. \quad (3.2)$$

Резонансная частота:

$$f_{рез} = 1 \div \left(2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C} \right) = 1 \div \left(6,28 \cdot \sqrt{188 \cdot 10^{-7} \cdot 2,1 \cdot 10^{-12}} \right) = 25,3 \cdot 10^6 \text{ Гц}. \quad (3.3)$$

Такой тороидальный резонатор можно считать квазистационарной колебательной системой, у которой имеется лишь одна резонансная частота. Добротность тороидального резонатора значительно меньше, чем у цилиндрических резонаторов, но больше коаксиальных резонаторов.

Керамический отражатель. Вычислим коэффициент фазы β , длину волны λ и погонное затухание $\Delta_{пог}$ плоской электромагнитной волны с частотой $f = 2450 \cdot 10^6$ Гц, которая распространяется в керамическом отражателе [5, с. 63]. Керамика имеет следующие диэлектрические параметры: диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 6-10$, тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta = 10^{-3}-10^{-4}$, удельное сопротивление 10^{14} Ом·м.

Коэффициент фазы:

$$\beta = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{\varepsilon} \div c = 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{8} \div 3 \cdot 10^8 = 145,06 \text{ м}^{-1}. \quad (3.4)$$

Длина волны в керамике:

$$\lambda = 2 \cdot \pi \div \beta = 6,28 \div 145,06 = 0,04329 \text{ м}^{-1} = 4,32 \text{ см}. \quad (3.5)$$

Коэффициент затухания:

$$\alpha = \beta \cdot tg\delta \div 2 = 145,06 \cdot 10^{-3} \div 2 = 0,072 \text{ м}^{-1}. \quad (3.6)$$

Погонное затухание:

$$\Delta_{пог} = 8,686 \cdot \alpha = 8,686 \cdot 0,072 = 0,625 \text{ дБ/м}. \quad (3.7)$$

Итак, в керамическом отражателе коэффициент фазы оказывается таким же, как и в диэлектрике без потерь. Коэффициент затухания прямо пропорционален частоте волны и тангенсу углу диэлектрических потерь.

Характеристическое сопротивление керамики:

$$Z = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{\varepsilon}} = \frac{120 \cdot 3,14}{\sqrt{6 \dots 10}} = 153,8 \dots 119,24 \text{ Ом}. \quad (3.8)$$

Для сравнения характеристическое сопротивление вакуума равно $Z_0 = 377 \text{ Ом}$.

3.4 Выводы

1. Предложенная программа исследований технологического процесса вытопки воскового сырья с отделением меда воздействием ЭМП СВЧ реализована при разработке способа воздействия ЭМП СВЧ и радиогерметичных СВЧ-воскотопок непрерывно-поточного действия для работы в пасечных условиях.

2. При проведении экспериментальных исследований пользовались современными контрольно-измерительными приборами, в том числе тепловизором FLIR T335; фототахометром DT-2234B; измерителем температуры Testo 845; преобразователем частоты WANSHSIN с индикацией частоты вращения вала электропривода.

3. Применялись стандартные и частные методики исследований, в том числе: методика оценки эффективных режимов работы СВЧ-воскотопок; прикладное программное обеспечение, позволяющее оценить картину распределения электромагнитного поля сверхвысокой частоты в резонаторах различных конфигураций.

4. Разработаны, описаны и указаны основные преимущества четырех двухрезонаторных СВЧ-воскотопок для термообработки воскового сырья с отделением меда в непрерывном режиме с указанием их преимуществ по отношению к критериям проектирования СВЧ-техники с совмещенными резонаторами, такими как:

- полусферическими резонаторами (потребляемая мощность 3,58 кВт, производительность 27 кг/ч, энергетические затраты 0,13);

- кольцевым и сферическим резонаторами (потребляемая мощность 3,85 кВт, производительность 19 кг/ч, энергетические затраты 0,21);

- цилиндрическим и сферическим резонаторами (потребляемая мощность 4,17 кВт, производительность 21 кг/ч, энергетические затраты 0,2);

- с цилиндрическими резонаторами (потребляемая мощность 3,78 кВт, производительность 24 кг/ч, энергетические затраты 0,16).

5. Анализ технических характеристик двухрезонаторных СВЧ-воскотопок разной конструкции показывает, что в зависимости от мощности электроприводов измельчающих и транспортирующих механизмов удельные энергетические затраты на вытопку воска составляют 0,13–0,21 кВт·ч/кг.

Рациональной конструкцией СВЧ-воскотопки для применения в пасечных условиях можно считать воскотопку с полусферическими резонаторами с тремя магнетронами по 850 Вт, потребляемой мощностью 3,58 кВт, энергетическими затратами 0,13 кВт·ч/кг.

6. Для проведения экспериментальных исследований процесса вытопки воска с отделением меда изготовлена двухрезонаторная СВЧ-воскотопка с магнетронами воздушного охлаждения непрерывно-поточного действия со стыкованными общим основанием полусферических резонаторов и магнетательным фторопластовым шнеком, шаг винта которого в каждом полусферическом резонаторе согласован с глубиной проникновения волны в сырье (рисунок 4.2).

7. Неферромагнитные сливные патрубки, выполняющие функции за пределами волноводов, и крайние неферромагнитные винты электроприводного фторопластового шнека обеспечивают предельно допустимый уровень мощности потока излучений СВЧ-воскотопкой.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫТОПКИ ПЧЕЛИНОГО ВОСКА С ОТДЕЛЕНИЕМ МЕДА

4.1 Алгоритм проведения экспериментальных исследований процесса вытопки воска с отделением меда в СВЧ-воскотопке с полусферическими резонаторами

По функционально-технологическому принципу воскотопки относятся к технологическому оборудованию, предназначенному для проведения теплообменных процессов. В СВЧ-воскотопке энергия, затрачиваемая на поляризационные процессы в сырье, генерируется в нем в виде теплоты. При этом СВЧ-энергия концентрируется в объеме сырья, который нагревается интенсивно и равномерно, если размеры его частиц соизмеримы с глубиной проникновения волны, зависящей от частоты ЭМП и фактора диэлектрических потерь сырья, и равномерного распределения напряженности электрической составляющей ЭМП СВЧ [140].

При проведении экспериментальных исследований процесса вытопки пчелиного воска с отделением меда необходимо проверить адекватность теоретических выражений, описывающих динамику нагрева компонентов воскового сырья и взаимосвязь основных конструктивно-технологических параметров и режимов работы воскотопки с СВЧ-энергоподводом в объемные резонаторы разного конструктивного исполнения.

Экспериментальные исследования технологического процесса вытопки воска с отделением меда из забруса воздействием ЭМП СВЧ проведены в микроволновой печи при разных удельных мощностях генератора и с помощью созданного опытного образца СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами в следующей последовательности:

- выявление эффективной скорости нагрева компонентов воскового сырья из анализа динамики их нагрева при различных удельных мощностях СВЧ-генератора с получением соответствующих эмпирических выражений и визуализацией изменения структуры воскового сырья;

- оценка соответствия качества вытопленного пчелиного воска и отделившегося меда по органолептическим и микробиологическим показателям, нормативным данным, прописанным в соответствующих ГОСТах;

- определение наиболее эффективных технологических параметров (температура нагрева сырья, удельные энергетические затраты на нагрев) и режимов работы (удельная мощность генератора, продолжительность воздействия ЭМП СВЧ, содержание меда в восковом сырье) двухрезонаторных СВЧ-воскотопок путем анализа регрессионных моделей для каждого резонатора, полученных методом активного планирования трехфакторного и двухфакторного экспериментов;

- сравнение величин собственной добротности резонаторов, полученных как отношение удельных энергетических затрат на нагрев к средней энергии потерь за период колебания, с теоретическими значениями, вычисленными через размеры резонаторов;

- расчет размеров заградительного волновода для ограничения излучения из сливных патрубков;

- разработка принципиальной электрической схемы работы СВЧ-воскотопки с элементами пускозащитной аппаратуры и сигнализации, предусматривающей управление тремя генераторами, общим вентилятором для охлаждения трех магнетронов, фторопластовым винтовым шнеком с регулируемой скоростью вращения с помощью частотного преобразователя;

- исследование мощности потока СВЧ-энергии в пространстве, окружающем СВЧ-воскотопку, и оценка электромагнитной безопасности и определение допустимой продолжительности работы персонала.

Отдельные узлы СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами представлены на рисунке 4.1 и в приложении В. Принципиальная электрическая схема управления установкой представлена в приложении К.

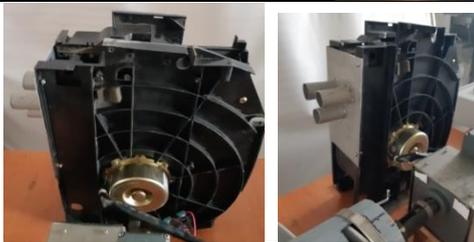
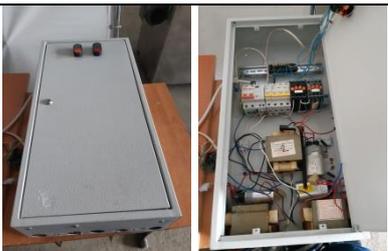
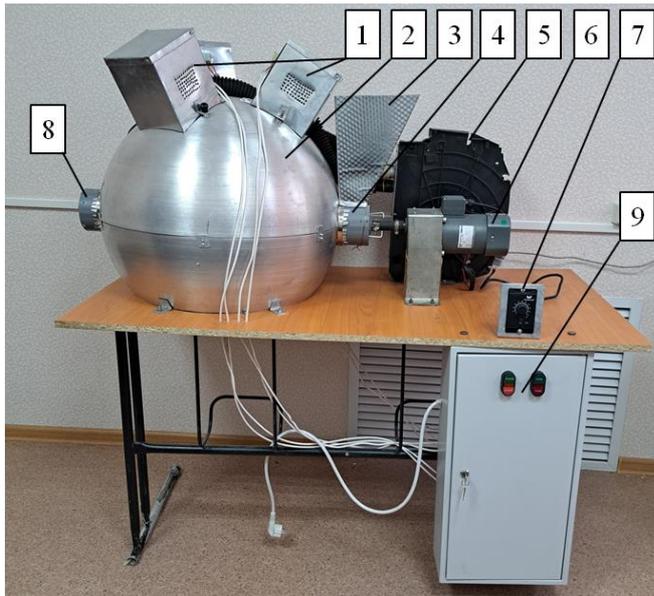
<p>Полусферы, кольцевой диск</p>		
<p>Фторопластовый шнек с убывающим шагом винта для рабочей камеры из двух резонаторов и перфорированный диэлектрический корпус шнека</p>		
<p>Расположение волноводов с внутренней стороны полусфер и на поверхностях полусфер</p>		
<p>Монтаж на поверхность полусферы волноводов с магнетронами, излучатели которых направлены в полусферический резонатор</p>		
<p>Общий вентилятор для охлаждения всех трех магнетронов через гибкие воздухоотводящие рукава</p>		
<p>Мотор-редуктор GV22-200W-200A с преобразователем частоты WANSHSIN 0,2 кВт</p>		
<p>Шкаф управления с пуско-защитной аппаратурой и электронным блоком управления СВЧ-генераторами, предусмотренным электрической схемой управления СВЧ-воскотопкой</p>		

Рисунок 4.1 – Отдельные узлы СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами для непрерывно-поточного действия



Отдельные узлы и их монтаж в процессе изготовления СВЧ-воскотопки непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами с общим основанием приведены на рисунке 4.1 и в приложении В. Изготовленный образец СВЧ-воскотопки приведен на рисунке 4.2. Технические характеристики СВЧ-воскотопки представлены в таблице 3.1.

Рисунок 4.2 – СВЧ-воскотопка непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами: 1 – магнетроны с волноводами; 2 – полусферические резонаторы; 3 – приемная емкость; 4 – нагнетательный шнек; 5 – вентилятор для охлаждения магнетронов; 6 – мотор-редуктор; 7 – преобразователь частоты; 8 – выгрузной патрубок; 9 – шкаф управления

4.2 Обоснование основных режимов работы СВЧ-воскотопок непрерывно-поточного действия

4.2.1 Исследование динамики нагрева воскового сырья в двухрезонаторной СВЧ-воскотопке

Исследование распределения теплового потока по поверхности воскового сырья и меда при воздействии ЭМП СВЧ разной удельной мощности проводили с помощью дифференциального термометра Testo 845 и тепловизора FLIR T335 при температуре окружающей среды 23 °С. Изменение структуры воскового сырья в

процессе тепловой обработки представлено в таблицах 4.1–4.2. Хронометраж динамики нагрева закристаллизованного меда при варьировании удельной мощностью генератора от 0,75 до 1,05 Вт/г представлен в приложении Г.

Исследование динамики нагрева закристаллизованного меда проводили, варьируя удельной мощностью СВЧ-генератора 0,75, 0,9 и 1,05 Вт/г (рисунок 4.3).

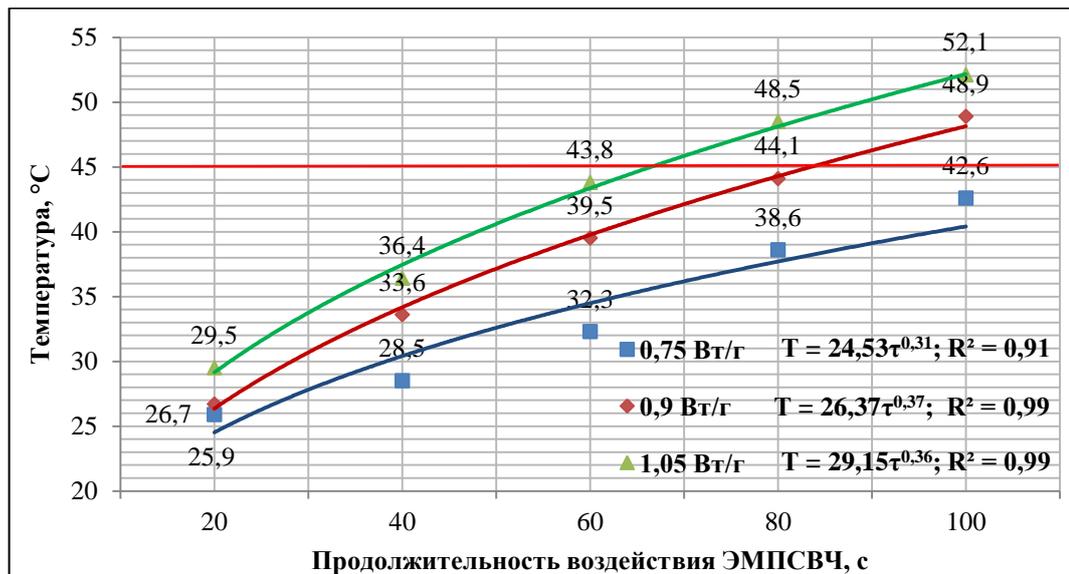


Рисунок 4.3 – Динамика нагрева закристаллизованного мёда в ЭМП СВЧ при варьировании удельной мощностью СВЧ-генератора, Вт/г: 0,75; 0,9; 1,05

Результаты показывают, что закристаллизованный мед под воздействием ЭМП СВЧ достигает температуры плавления 44–45 °С: при 1,05 Вт/г – за 65 с (1,05 мин.); 0,9 Вт/г – 80 с (1,3 мин.); 0,75 Вт/г – не менее чем за 120 с (2 мин.). Получены эмпирические выражения, описывающие динамику нагрева исходного сырья при варьируемых удельных мощностях:

$$T = 24,53 \cdot \tau^{0,31} \text{ (0,75 Вт/г); } T = 26,37 \cdot \tau^{0,37} \text{ (0,9 Вт/г); } T = 29,15 \cdot \tau^{0,36} \text{ (1,05 Вт/г). (4.1)}$$

Хронометраж динамики нагрева воскового сырья с содержанием меда 5–7 % при варьировании удельной мощностью генератора от 0,6 до 0,9 Вт/г представлен в таблице 4.1 и в приложении Г.

Исследование динамики нагрева воскового сырья с содержанием меда 5–7 % (исходное сырье, загружаемое в приемную емкость СВЧ-воскотопки) проводили, варьируя удельной мощностью СВЧ-генератора 0,6, 0,75 и 0,9 Вт/г (рисунок 4.4).

Таблица 4.1 – Хронометраж изменения структуры воскового сыря с содержанием меда 5–7 % при воздействии ЭМП СВЧ

		Структура воскового сыря					
Температура, °С / Продолжительность воздействия ЭМП СВЧ, с. / Удельная мощность СВЧ-генератора, Вт/г	20 / 0 / 0		43,8 / 60 / 0,9		42,7 / 135 / 0,75		
	33,8 / 75 / 0,9		47,7 / 180 / 0,6		52,7 / 150 / 0,9		

Результаты показывают, что необходимая для отделения меда температура 45 °С достигается: при 0,6 Вт/г – за 180 с (3 мин.); 0,75 Вт/г – 150 с (2,5 мин.); 0,9 Вт/г – 110 с (1,83 мин.). Получены эмпирические выражения, описывающие динамику нагрева исходного сыря при варьируемых удельных мощностях:

$$T = 23,4 \cdot \tau^{0,35} \text{ (0,6 Вт/г); } T = 24,41 \cdot \tau^{0,39} \text{ (0,75 Вт/г); } T = 27,13 \cdot \tau^{0,39} \text{ (0,9 Вт/г). (4.2)}$$

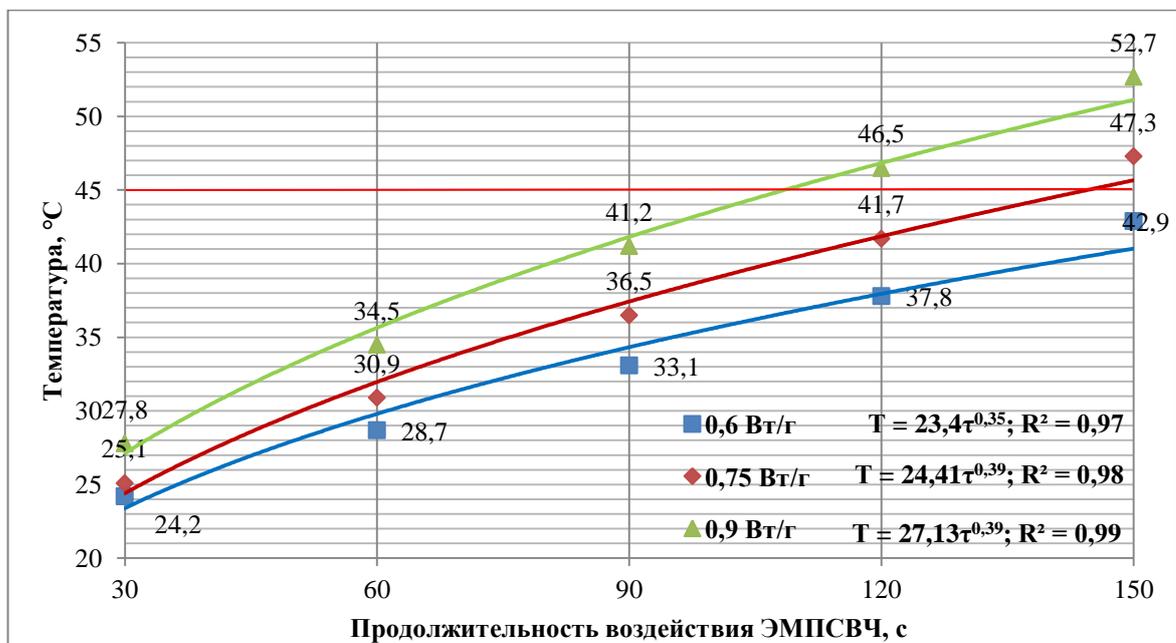


Рисунок 4.4 – Динамика нагрева воскового сыря с содержанием меда 5–7 % в ЭМП СВЧ при варьировании удельной мощностью СВЧ-генератора:

0,6; 0,75; 0,9 Вт/г

В первом резонаторе мощность одного СВЧ-генератора 0,85 Вт, параметры шнека: шаг винта нагнетательного шнека 3 см, частота вращения 6 об./мин., при диаметре винта 110 мм и диаметре вала 55 мм. Продолжительность нахождения воскового сырья массой 0,94 кг в первом резонаторе составит 1,67 мин. Причем удельная мощность генератора, равная 0,9 Вт/г, обеспечит нагрев воскового сырья до 44–45 °С, следовательно, отделение фракции меда от воскового сырья происходит. Скорость эндогенного нагрева воскового сырья с увеличением удельной мощности генератора увеличивается. Отмечается, что чем выше удельная мощность генератора, тем более глубокое плавление меда. Хронометраж динамики нагрева воскового сырья с содержанием меда менее 3 % (второй резонатор) при варьировании удельной мощностью генератора от 0,85 до 1,7 Вт/г представлен в таблице. 4.2 и в приложении Г.

По результатам исследований построены графики, характеризующие динамику нагрева воскового сырья с содержанием меда менее 3 % в ЭМПСВЧ при варьировании удельной мощностью СВЧ-генератора: 1) 1,7 Вт/г; 2) 1,45 Вт/г; 3) 1,15 Вт/г; 4) 0,85 Вт/г (рисунок. 4.5).

Таблица 4.2 – Хронометраж изменения структуры воскового сырья с содержанием меда менее 3 % при воздействии ЭМПСВЧ с удельной мощностью СВЧ-генератора 1,15 Вт/г *

		Структура		Структура	
Температура, °С / Продолжительность воздействия ЭМПСВЧ, с.	44		65,4 / 150		83,1 / 240
	50,5 / 45		70,7 / 180		94 / 300

* - экспериментальные исследования работы 2-го резонатора, начальная температура сырья – 44–45 °С

Динамика нагрева воскового сырья с содержанием меда менее 3 % в ЭМП-СВЧ при варьировании удельной мощностью СВЧ-генератора приведена на рисунке 4.5.

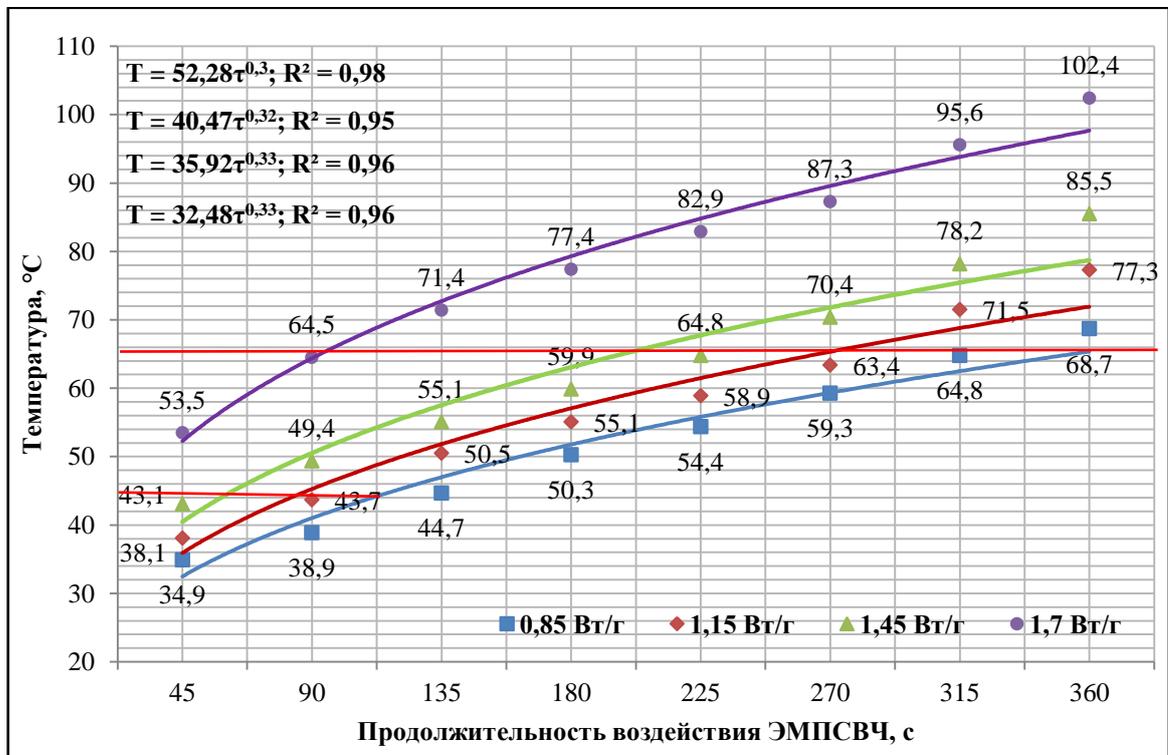


Рисунок 4.5 – Динамика нагрева воскового сырья с содержанием меда менее 3 % в ЭМП-СВЧ при варьировании удельной мощностью СВЧ-генератора:
1) 1,7 Вт/г; 2) 1,45 Вт/г; 3) 1,15 Вт/г; 4) 0,85 Вт/г

Получены эмпирические выражения в виде уравнений тренда, описывающие зависимость температуры нагрева воскового сырья от продолжительности воздействия ЭМП-СВЧ при разных удельных мощностях генератора:

$$\begin{aligned}
 T &= 32,48 \cdot \tau^{0,33} \text{ (0,85 Вт/г); } & T &= 35,92 \cdot \tau^{0,33} \text{ (1,15 Вт/г);} \\
 T &= 40,47 \cdot \tau^{0,32} \text{ (1,45 Вт/г); } & T &= 52,28 \cdot \tau^{0,3} \text{ (1,7 Вт/г).}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Пчелиный воск начинает плавиться при температуре 64 °С. Точкой отсчета продолжительности нагрева воска принимаем 45 °С – температуру воскового сырья на выходе из первого резонатора. Если удельная мощность генератора составляет 1,7 Вт/г, то воск начнет плавиться через 90 с (1,5 мин.); при 1,45 Вт/г – 150 с (2,5 мин.); при 1,15 Вт/г – 180 с (3 мин.); при 0,85 Вт/г – 210 с (3,5 мин.). Исследования показали, что полная вытопка воска из сырья достигается при достижении температуры 75–80 °С.

При полезной мощности двух СВЧ-генераторов 1700 Вт, скорости вращения шнека 6 об./мин. и шаге винта нагнетательного шнека 1,5 см продолжительность нахождения сырья во втором резонаторе составит 3 мин.

За это время накопленный объем воска во втором резонаторе с учетом изменения плотности при нагревании составит 1,45 кг, что соответствует удельной мощности 1,15 Вт/г, достаточной для полной вытопки воска. Полное время вытопки воска составит 4,83 мин. (290 с). Во 2-м модуле удельная мощность 1,15 Вт/г будет достигаться за счет использования двух СВЧ-генераторов, излучатели которых направлены в один полусферический резонатор.

Эффективный режим работы СВЧ-воскотопки: скорость нагрева воскового сырья составляет 0,13 °C/с ($45\text{ °C}/290\text{ с} = 0,15\text{ °C/с}$); удельная мощность генераторов: в первом резонаторе – 0,9 Вт/г, во втором резонаторе – 1,15 Вт/г; удельные энергетические затраты на вытопку воска – 0,13 кВт·ч/кг [95].

4.2.2 Результаты оценки качества вытопленного пасечного воска и меда

Результаты исследований органолептических показателей воска и меда до и после воздействия ЭМП СВЧ. По органолептическим и физико-химическим показателям пасечный и производственный воски должны соответствовать требованиям ГОСТ 21179-2000 «Воск пчелиный». Органолептическую оценку воска проводили по следующим показателям (таблица 4.3): цвет, запах, структура на изломе. Испытано 4 образца в 3-кратной повторности:

- 1 образец – удельная мощность генератора 0,85 Вт/г, продолжительность 360 с;
- 2 образец – удельная мощность генератора 1,15 Вт/г, продолжительность 240 с;
- 3 образец – удельная мощность генератора 1,45 Вт/г, продолжительность 150 с;
- 4 образец – контрольный (воск, полученный в паровой воскотопке ВТП-23).

В соответствии с ГОСТ 21179-2000 для оценки качества *пчелиного воска* по органолептическим показателям (цвет, структура в изломе, запах) объединенную пробу воска раскалывали пополам (таблица 4.4).

Таблица 4.3 – Балльная органолептическая оценка воска

Показатель	Контрольный	Опытный
Цвет	5	8
Запах	8	8
Структура на изломе	7	8

Таблица 4.4 – Органолептическая оценка воска опытного и контрольного образцов

№	Показатель качества	Характеристика продукта	
		контрольный	опытный
1	Цвет	светло-желтый	темно-желтый
2	Запах	естественный, восковой	естественный, восковой
3	Структура в изломе	однородная, среднезернистая	однородная, мелкозернистая

На рисунке 4.6 приведены снимки контрольного и опытного образцов воска с результатами их органолептической оценки.

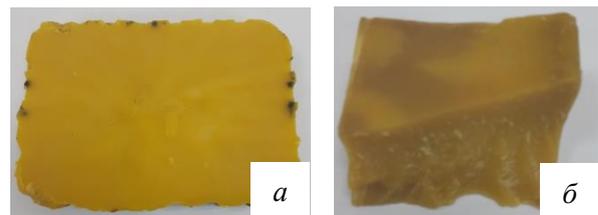


Рисунок 4.6 – Органолептическая оценка воска опытного (а) и контрольного (б) вариантов; в) в виде диаграммы

Цвет и структура на изломе опытного образца пасечного воска оценены по 8 баллов, контрольного образца: цвет на 5 баллов, структура на изломе оценена на 7 баллов. *Запах* обоих образцов оценен на 8 баллов. Результаты исследований органолептических показателей показывают, что опытный образец воска, получен-

ный при воздействии ЭМПСВЧ с удельной мощностью генератора 1 Вт/г, нагретого до 65 °С, оценен в 24 балла (максимально возможное значение), контрольный – в 20 баллов. Исследования проводились в ГБУ НО «Государственное ветеринарное управление Княгининского района» Нижегородской области (приложение Д).

Мед по органолептическим и физико-химическим показателям оценивали согласно ГОСТ 19792-2017 «Мед натуральный. Технические условия» [18].

Результаты оценки опытного образца меда, полученного после отделения из воскового сырья воздействием ЭМПСВЧ, представлены в таблицах 4.5 и 4.6.

Таблица 4.5 – Результаты органолептической оценки опытного образца меда

Показатель	Значение	Нормативное значение по ГОСТ 19792-2017
Внешний вид (консистенция)	Жидкий	Жидкий, частично или полностью закристаллизованный
Аромат	Приятный, без постороннего запаха	Приятный, от слабого до сильного, без постороннего запаха
Вкус	Сладкий, без постороннего привкуса	Сладкий, приятный, без постороннего привкуса

Таблица 4.6 – Результаты оценки опытного образца меда по физико-химическим показателям

Показатель	Значение	Нормативное значение по ГОСТ 19792-2017*
Массовая доля воды, %	16	Не более 20
Массовая доля редуцирующих сахаров, %	75	Не менее 65
Массовая доля фруктозы и глюкозы суммарно, %	70	Не менее 60
Массовая доля сахарозы, %	3	Не более 5
Диастазное число, ед. Готе	11	Не менее 8

* значения приведены для цветочного меда

Результаты оценки опытного образца меда свидетельствуют о его соответствии действующим санитарным и ветеринарным нормам, пригодности для пищи и для использования в других отраслях народного хозяйства.

Результаты исследования изменения бактериальной обсемененности воскового сырья в процессе термообработки в ЭМП СВЧ

Изучение микробиологических показателей проб пчелиного воска, полученных воздействием микроволновой энергии на восковое сырье с исходной бактериальной обсемененностью 1,5 млн КОЕ/г, проводилось на трех образцах с трехкратным повторением по ГОСТ 31747-2012 (Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий) в ГБУ НО «Государственное ветеринарное управление Княгининского муниципального округа» Нижегородской области. В соответствии с данным методом, предназначенным для обнаружения Колиформных бактерий, проведен посев в агаризованной селективно-диагностической среде, содержащей 1 г продукта. Посевы инкубировали в чашках Петри при 37 °С в течение 24 часов. Образцы воскового сырья получены по разработанной технологии после воздействия ЭМП частотой 2450 МГц при температуре воздействия от 20 до 100 °С.

Зависимость ОМЧ от температуры нагрева воскового сырья при различных напряженностях ЭП представлена на рисунке 4.7.

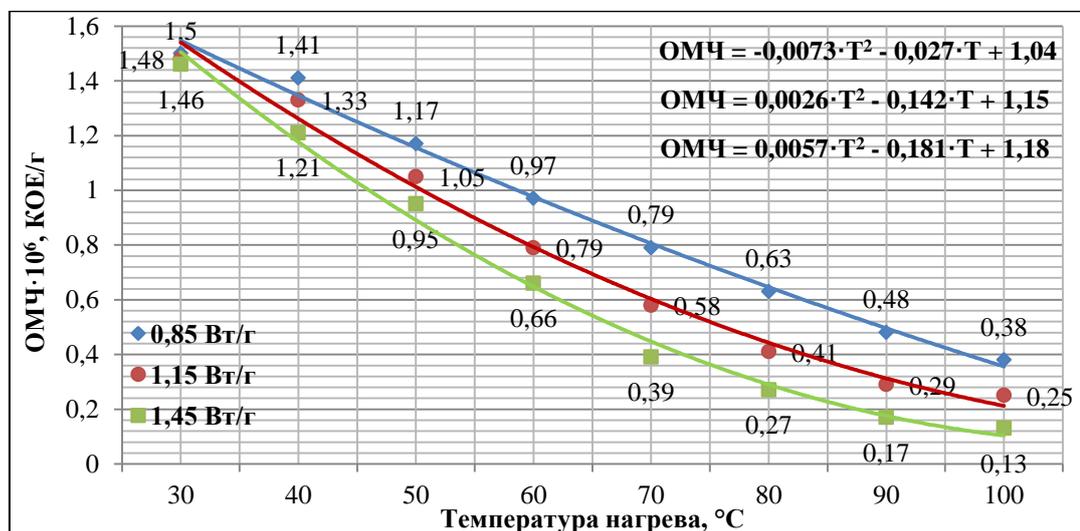


Рисунок 4.7 – Изменение общего микробного числа в зависимости от температуры нагрева воскового сырья в процессе воздействия ЭМП СВЧ при удельных мощностях генератора: 0,85; 1,15; 1,45 Вт/г

Исследования показывают, что в нагретом до 70 °С воздействием ЭМП СВЧ восковом сырье с удельной мощностью генератора 1,15 Вт/г происходит 3-кратное снижение колониеобразующих единиц (с 1,5 млн до предельно допустимого уровня 500 тыс. КОЕ/г). Эмпирические выражения (уравнения тренда), описывающие изменение ОМЧ в зависимости от температуры нагрева пасечного воска в процессе воздействия ЭМП СВЧ при различных напряженностях ЭП:

$$\begin{aligned} \text{ОМЧ} &= -0,007 \cdot T^2 + 0,03 \cdot T + 1,04 \text{ (при 0,85 Вт/г);} \\ \text{ОМЧ} &= 0,003 \cdot T^2 - 0,14 \cdot T + 1,16 \text{ (при 1,15 Вт/г);} \\ \text{ОМЧ} &= 0,006 \cdot T^2 - 0,18 \cdot T + 1,18 \text{ (при 1,45 Вт/г).} \end{aligned} \quad (4.4)$$

4.2.3 Эффективные режимы работы первого резонатора двухрезонаторных СВЧ-воскотопок для термообработки воскового сырья с отделением меда в непрерывном режиме

Эффективные режимы термообработки воскового сырья в СВЧ-воскотопках определяли через регрессионные модели, полученные при реализации матрицы трехфакторного активного планирования эксперимента типа 2^3 (план Хартли) представленные в таблицах 4.7–4.10 (приложение Л).

1. СВЧ-воскотопка с полусферическими резонаторами

(патент № 2770496)

Для получения адекватных функций откликов температуры ($y_1 = T$, °С) и удельных энергетических затрат ($y_2 = УЭЗ$) на отделения меда от воскового сырья при варьировании параметрами, такими как: удельная мощность генератора (x_1 , Вт/г), продолжительность воздействия ЭМП СВЧ (x_2 , с) и содержание меда в восковом сырье (x_3 , %), составлена матрица планирования трехфакторного эксперимента, тип 2^3 (таблица 4.7) [81; 82]. При этом первый полусферический резонатор содержит один магнетрон мощностью 850 Вт.

Интервалы варьирования факторов:

1. Удельную мощность СВЧ-генератора (x_1) варьировали с 0,6 до 0,9 Вт/г³ изменением массы загрузки сырья (с 0,94 до 1,4 кг);
2. Продолжительность нагрева (x_2) варьировали от 1,1 до 1,7 мин;
3. Содержание меда в восковом сырье (x_3) варьировали от 5 до 7 %.

Пользуясь программой «STATISTICA 12», построены поверхности откликов и их двумерные сечения в изолиниях моделей, описывающих взаимосвязь указанных критериев оптимизации с варьируемыми параметрами (рисунок 4.8).

После обработки результатов эксперимента для описания критериев оптимизации получены адекватные (по критерию Фишера) функции отклика (4.5–4.6).

Таблица 4.7 – Матрица активного планирования трехфакторного эксперимента по оптимизации режимов отделения меда от воскового сырья в полусферическом резонаторе

№	Варьируемые параметры							Критерии оптимизации		
	x_1	удельная мощность генератора		x_2	продолжительность воздействия ЭМП СВЧ		x_3	k	температура нагрева воскового сырья, °С	удельные энергетические затраты, Вт·ч/кг
		Вт/г	Вт/кг		ч	мин.				
1	+	0,9	900	+	0,028	1,7	+	7	49,1	25,2
2	+	0,9	900	-	0,018	1,1	-	5	30,4	16,2
3	-	0,6	600	+	0,028	1,7	-	5	39,2	16,8
4	-	0,6	600	-	0,018	1,1	+	7	31,6	10,8
5	0	0,75	750	0	0,023	1,4	0	6	40,2	17,25
6	-	0,6	600	0	0,023	1,4	0	6	36,5	13,8
7	+	0,9	900	0	0,023	1,4	0	6	40,7	20,7
8	0	0,75	750	-	0,018	1,1	0	6	30,8	13,5
9	0	0,75	750	+	0,028	1,7	0	6	45,3	21
10	0	0,75	750	0	0,023	1,4	-	5	39,4	17,25
11	0	0,75	750	0	0,023	1,4	+	7	42,7	17,25

Зависимая переменная – температура нагрева воскового сырья (T)

Предсказательная сила полученной регрессионной модели очень высока, так как значение коэффициента детерминации близко к 1 ($R^2 = 0,94$). То есть, дис-

персия отклика на 94,0 % определяется независимыми переменными. Остальные 6,0 % дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически значима: $F = 36,8$; $p < 0,001$. Все переменные по отдельности статистически значимо влияют на отклик ($P < 0,05$) (табл. 4.8).

Таблица 4.8 – Итоги регрессии для зависимой переменной T

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. – БЕТА	В	Ст.Ош. – В	t-Стьюдента	p-знач.
Св. член			-17,71	6,51	-2,72	0,030
$P_{y\delta}$	0,277	0,092	0,014	0,005	3,00	0,020
τ	0,876	0,092	1360,0	143,2	9,50	<0,001
k	0,309	0,092	2,40	0,72	3,35	0,012

Таким образом, были получены параметры линейного уравнения регрессии:

$$Y = a_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_n, \quad (4.5)$$

где Y – предсказанное значение отклика; a_0 – свободный член уравнения; $b_1, b_2 \dots b_n$ – весовые коэффициенты регрессии (В).

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$T, \text{ }^\circ\text{C} = -17,71 + 0,014 \cdot P_{y\delta} + 1360,0 \cdot \tau + 2,40 \cdot k. \quad (4.6)$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: τ , k и $P_{y\delta}$.

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с положительными коэффициентами (τ , k и $P_{y\delta}$) приводит к увеличению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно точно соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вблизи теоретической прямой и

в границах диапазона доверительной вероятности для 95 %. Так как большинство точек сосредоточено вблизи теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков небольшая. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

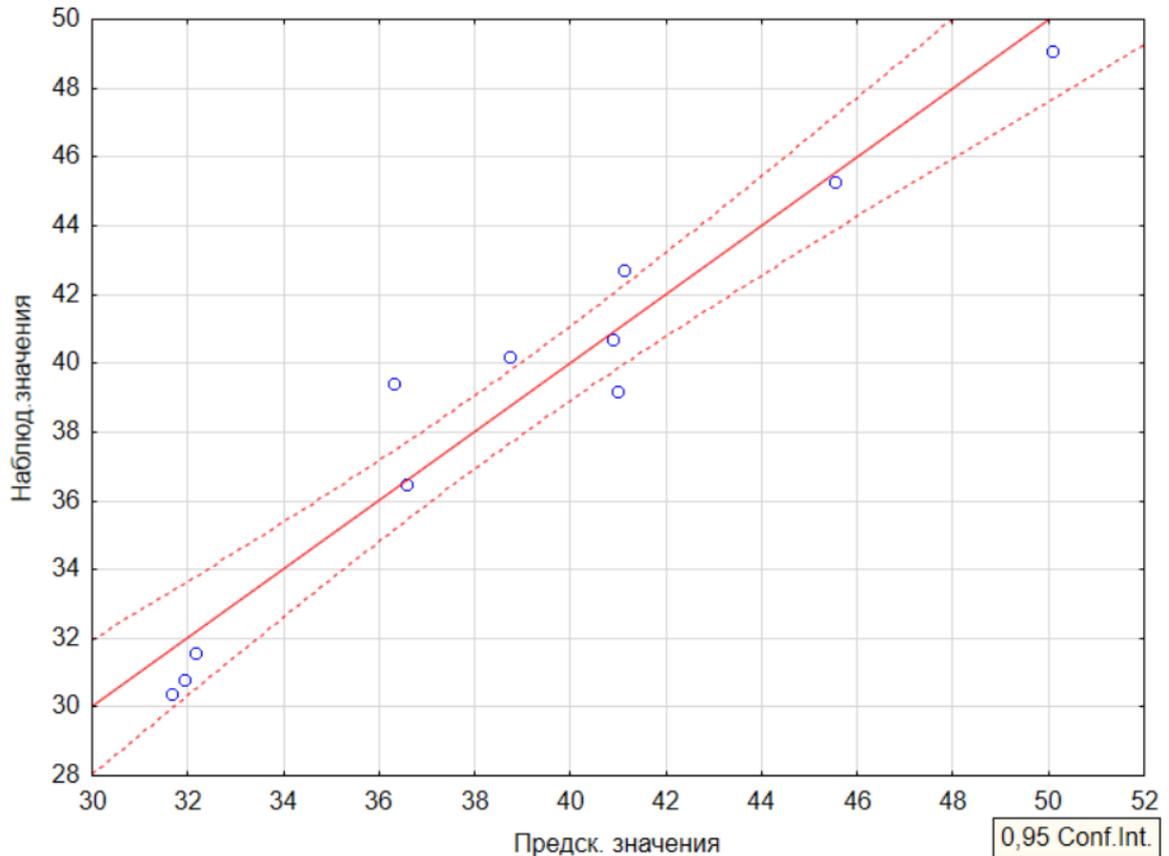


Рисунок 4.8 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной T

Зависимая переменная – удельные энергетические затраты (УЭЗ)

Предсказательная сила полученной регрессионной модели очень высока, так как значение коэффициента детерминации близок к 1 ($R^2 = 0,995$). То есть, дисперсия отклика на 99,5 % определяется независимыми переменными. Остальные 0,5% дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически значима: $F = 489,4$; $p < 0,001$. Все переменные по отдельности статистически значимо влияют на отклик ($P < 0,05$) (табл. 4.9).

Таблица 4.9 – Итоги регрессии для зависимой переменной УЭЗ

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. – БЕТА	В	Ст.Ош. – В	t-Стьюдента	p-знач.
Св. член			-20,25	1,22	-16,66	<0,001
$P_{y\partial}$	0,672	0,026	0,023	0,001	25,82	<0,001
τ	0,731	0,026	750,0	26,7	28,06	<0,001
k	0,097	0,026	0,500	0,134	3,74	0,007

Таким образом, были получены параметры линейного уравнения регрессии:

$$Y = a_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_n, \quad (4.7)$$

где Y – предсказанное значение отклика; a_0 – свободный член уравнения; $b_1, b_2 \dots b_n$ – весовые коэффициенты регрессии (В).

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$УЭЗ, Вт \cdot ч/кг = -20,25 + 0,023 \cdot P_{y\partial} + 750,0 \cdot \tau + 0,5 \cdot k.$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: τ , $P_{y\partial}$ и K .

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с положительными коэффициентами (τ , $P_{y\partial}$ и K) приводит к увеличению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно точно соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вблизи теоретической прямой и в границах диапазона доверительной вероятности для 95 %. Так как большинство точек сосредоточено вблизи теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков небольшая. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

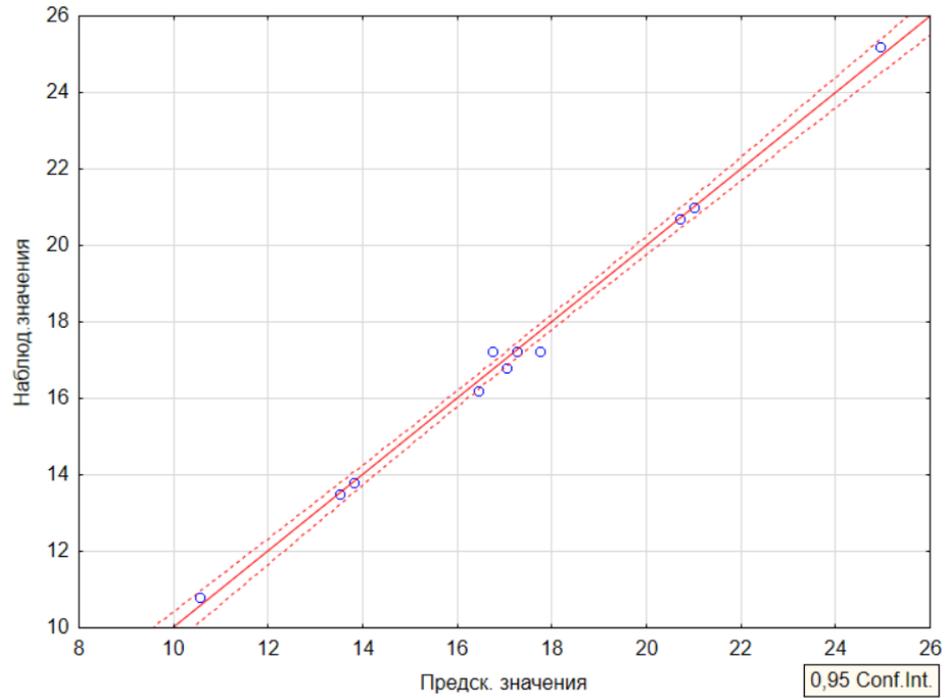


Рисунок 4.9 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной УЭЗ

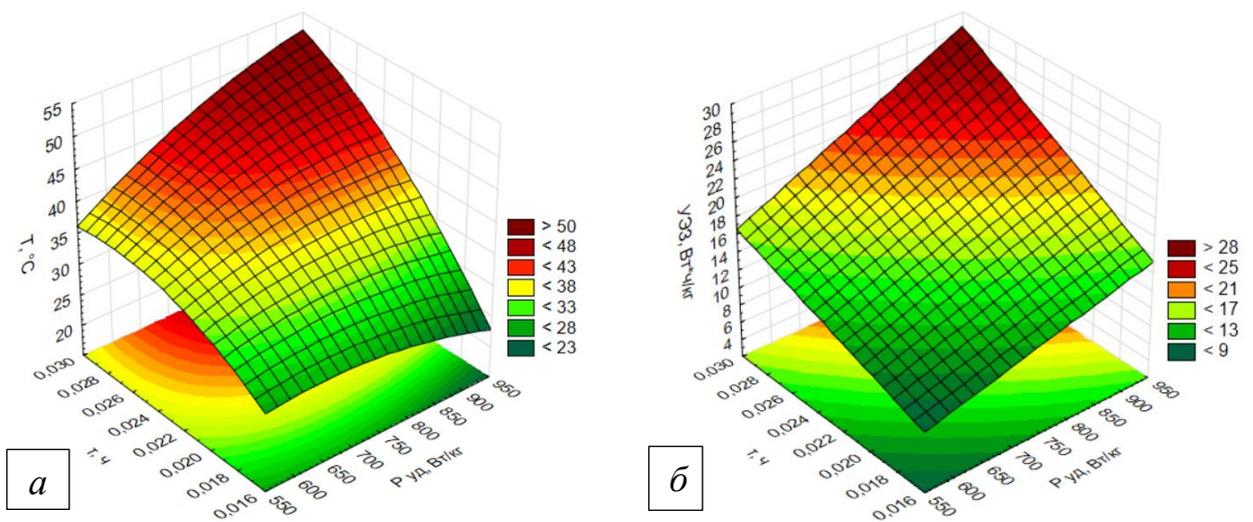


Рисунок 4.10 – Поверхности откликов и двумерные сечения в изолиниях трехфакторных моделей изменения: а) температуры воскового сырья; б) удельных энергетических затрат на отделение меда в первом резонаторе

Из анализа регрессионных моделей вытекает, что эффективным режимом работы первого резонатора СВЧ-воскотопки для отделения меда 7 % из воскового сырья в полусферическом резонаторе является: удельная мощность 0,9 Вт/г, продолжительность воздействия ЭМП СВЧ 1,7 мин (0,028 ч). При этом температура меда достигает 49,1 °С, удельные энергетические затраты составят **25,2** Вт·ч/кг.

2. СВЧ-воскотопка с резонаторами в виде сферы в кольцевом резонаторе

(патент № 2737142)

Составлена матрица планирования активных экспериментов по отделению меда от воскового сырья в первом резонаторе (сферическом) СВЧ-воскотопки с состыкованными резонаторами в виде сферы с кольцевым резонатором (таблица 4.10). При этом варьировали удельной мощностью генератора (x_1), продолжительностью воздействия ЭМПСВЧ (x_2) и содержанием меда в восковом сырье (x_3). Критериями оптимизации служили температура нагрева (y_1, T), удельные энергетические затраты ($y_2, УЭЗ$). Сферический резонатор содержит 1 магнетрон мощностью **850 Вт**. Факторы варьировали в следующих пределах:

1. Удельную мощность СВЧ-генератора (x_1) варьировали с 1,15 до 1,45 Вт/г изменением массы загрузки сырья (с 0,58 до 0,74 кг).
2. Продолжительность воздействия ЭМПСВЧ (x_2) варьировали с 0,0208 до 0,0375 ч с помощью шарового крана.
3. Содержание меда в восковом сырье (x_3) варьировали от 5 до 7 %.

Таблица 4.10 – Матрица активного планирования трехфакторного эксперимента по оптимизации режима отделения меда от вытапливаемого воскового сырья в первом сферическом резонаторе

№	Варьируемые параметры								Критерии оптимизации	
	удельная мощность генератора			продолжительность воздействия ЭМПСВЧ			содержание меда в восковом сырье, %		температура нагрева, °С	удельные энергетические затраты, Вт·ч/кг
	x_1	$P_{уд}$		x_2	τ		x_3	k		
		Вт/г	Вт/кг		ч	мин			%	
1	+	1,45	1450	+	0,0375	2,25	+	7	63,4	54,37
2	+	1,45	1450	-	0,0208	1,25	-	5	44,5	30,16
3	-	1,15	1150	+	0,0375	2,25	-	5	43,5	43,13
4	-	1,15	1150	-	0,0208	1,25	+	7	32,1	23,92
5	0	1,3	1300	0	0,0291	1,75	0	6	42,4	37,83
6	-	1,15	1150	0	0,0291	1,75	0	6	36,7	33,46
7	+	1,45	1450	0	0,0291	1,75	0	6	57,5	42,19
8	0	1,3	1300	-	0,0208	1,25	0	6	36,1	27,04
9	0	1,3	1300	+	0,0375	2,25	0	6	48,1	48,75
10	0	1,3	1300	0	0,0291	1,75	-	5	42,1	37,83
11	0	1,3	1300	0	0,0291	1,75	+	7	42,8	37,83

Результаты многофакторного регрессионного анализа представлены этой и последующих СВЧ-воскотопок представлены в приложении Л.

Поверхности откликов и двумерные сечения в изолиниях трехфакторных моделей приведены на рисунке 4.11. По результатам реализации матрицы трехфакторного эксперимента типа 2^3 и обработки результатов в программе Statistica 12 получены адекватные функции отклика (4.8–4.9):

$$T, \text{ }^\circ\text{C} = -65,02 + 0,059 \cdot P_{y\delta} + 844,4 \cdot \tau + 1,37 \cdot K; \quad (4.8)$$

$$УЭЗ, \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг} = -42,86 + 0,029 \cdot P_{y\delta} + 1300,0 \cdot \tau + 0,833 \cdot K. \quad (4.9)$$

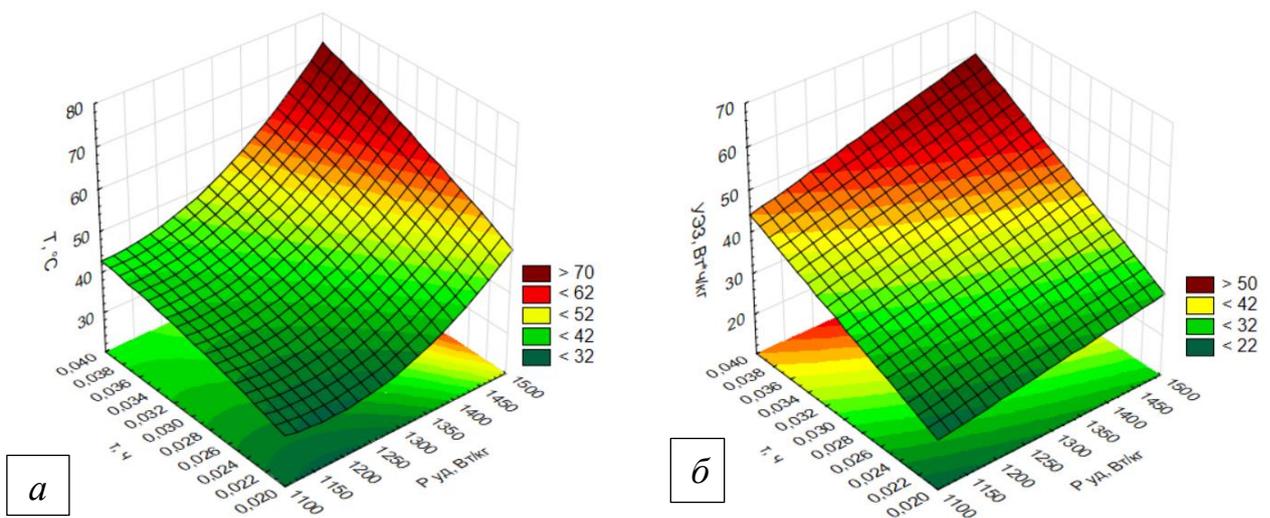


Рисунок 4.11 – Поверхности откликов и двумерные сечения в изолиниях трехфакторных моделей изменения: а) температуры сырья; б) удельных энергетических затрат на отделение меда от воскового сырья в первом сферическом резонаторе

Из анализа регрессионных моделей вытекает, что эффективным режимом работы первого резонатора СВЧ-воскотопки для отделения меда 7 % из воскового сырья в сферическом резонаторе является: удельная мощность – 1,3 Вт/г, продолжительность воздействия ЭМП СВЧ – 2,25 мин (0,0375 ч). При этом температура меда достигает 48,1 °С, а удельные энергетические затраты составят **48,75 Вт·ч/кг**.

3. СВЧ-воскотопка с совмещенными цилиндрическим и сферическим резонаторами (патент № 2728695)

Составлена матрица активного планирования трехфакторного эксперимента по отделению меда от воскового сырья в первом резонаторе (цилиндр). Матрица активного планирования экспериментов по выявлению эффективных режимов отделения меда в цилиндрическом резонаторе приведена в таблице 4.11.

Интервалы варьирования факторов:

1. Удельная мощность СВЧ-генератора (x_1, P_{y0}) – с 1,15 до 1,45 Вт/г изменением массы загрузки сырья (с 0,58 до 0,74 кг).
2. Продолжительность воздействия ЭМПСВЧ (x_2, τ) варьировали с 0,025 до 0,0417 ч.
3. Содержание меда в восковом сырье (x_3, W) – от 5 до 7 %.

Таблица 4.11 – Матрица активного планирования трехфакторного эксперимента по оптимизации режима отделения меда от вытапливаемого воскового сырья в первом цилиндрическом резонаторе

№	Варьируемые параметры								Критерии оптимизации	
	удельная мощность генератора			продолжительность воздействия ЭМПСВЧ			содержание меда в восковом сырье, %		температура нагрева, °С	удельные энергетические затраты, Вт·ч/кг
	x_1	P_{y0}		x_2	τ		x_3	K		
		Вт/г	Вт/кг		ч	мин			%	
1	+	1,45	1450	+	0,0417	2,5	+	7	67,6	153,13
2	+	1,45	1450	-	0,025	1,5	-	5	39,5	21,88
3	-	1,15	1150	+	0,0417	2,5	-	5	64,2	100,63
4	-	1,15	1150	-	0,025	1,5	+	7	39,1	14,38
5	0	1,3	1300	0	0,033	2	0	6	45,9	72,5
6	-	1,15	1150	0	0,033	2	0	6	41,1	57,5
7	+	1,45	1450	0	0,033	2	0	6	63,4	87,5
8	0	1,3	1300	-	0,025	1,5	0	6	38,1	18,13
9	0	1,3	1300	+	0,0417	2,5	0	6	64,2	126,88
10	0	1,3	1300	0	0,033	2	-	5	44,2	72,5
11	0	1,3	1300	0	0,033	2	+	7	46,9	72,5

Поверхности откликов и двумерные сечения в изолиниях трехфакторных моделей изменения: а) температуры сырья; б) удельных энергетических затрат на

отделения меда от вытапливаемого воска воздействием ЭМП СВЧ от варьируемых параметров приведены на рисунке 4.12.

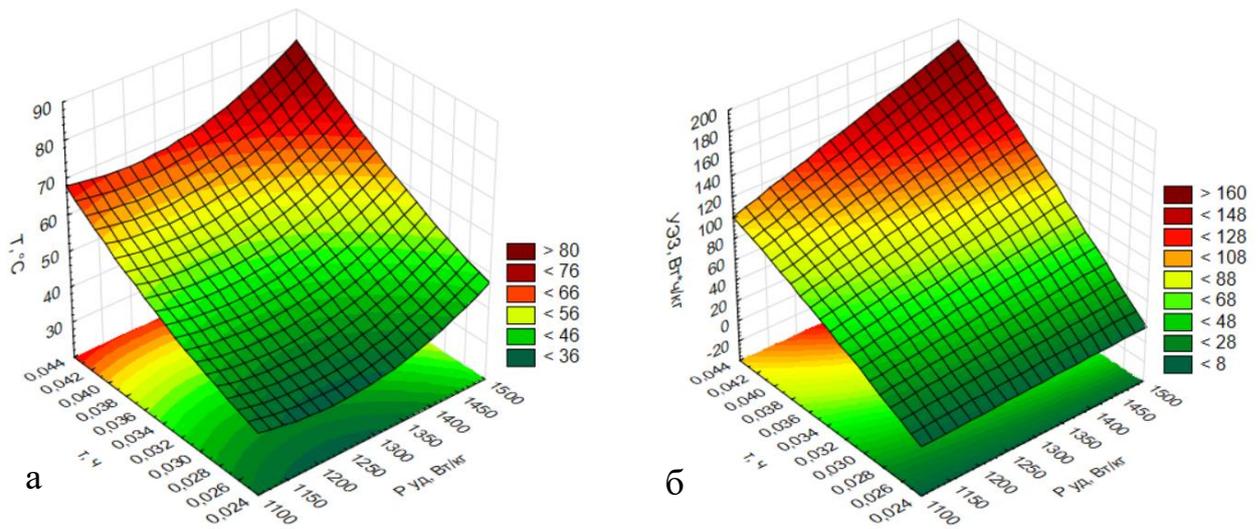


Рисунок 4.12 – Поверхности откликов и двумерные сечения в изолиниях трехфакторных моделей изменения: а) температуры сырья; б) удельных энергетических затрат на отделения меда от вытапливаемого воскового сырья

Получены адекватные (по критерию Фишера) функции отклика (4.10–4.11):

$$T, \text{ }^{\circ}\text{C} = -45,80 + 0,029 \cdot P_{\text{уд}} + 1590,3 \cdot \tau + 0,950 \cdot K; \quad (4.10)$$

$$\text{УЭЗ, Вт}\cdot\text{ч/кг} = -318,5 + 0,100 \cdot P_{\text{уд}} + 6506,1 \cdot \tau + 7,50 \cdot K. \quad (4.11)$$

Анализ регрессионных моделей показывает, что эффективным режимом отделения **7 %** меда от воскового сырья в первом резонаторе СВЧ-воскотопки с совмещенными цилиндрическим и сферическим резонаторами является удельная мощность **1,3 Вт/г**, продолжительность воздействия ЭМП СВЧ – **2 мин (0,033 ч)**. При этом температура меда на выходе составит **46,9 °С**, удельные энергетические затраты составят **72,5 Вт·ч/кг**.

4. СВЧ-воскотопка с состыкованными цилиндрическими резонаторами

(патент № 2740095)

Составлена матрица активного планирования трехфакторного эксперимента по отделению меда от вытапливаемого воскового сырья в первом цилиндрическом резонаторе СВЧ-воскотопки с состыкованными цилиндрическими резонаторами (таблица 4.12).

При этом варьировали удельной мощностью генератора ($x_1, P_{уд}$), продолжительностью воздействия ЭМП СВЧ (x_2, τ) и содержанием меда в восковом сырье (x_3, k). Критериями оптимизации служили температура нагрева (y_1, T), удельные энергетические затраты ($y_2, УЭЗ$).

Факторы варьировали в следующих пределах:

1. Удельную мощность СВЧ-генератора (x_1) варьировали с 0,6 до 0,9 Вт/г³ изменением массы загрузки сырья (с 0,94 до 1,4 кг).
2. Продолжительность нагрева (x_2) варьировали от 0,022 до 0,033 ч.
3. Содержание меда в восковом сырье (x_3) варьировали от 5 до 7 %.

Таблица 4.12 – Матрица активного планирования трехфакторного эксперимента по оптимизации режима отделения меда от вытапливаемого воскового сырья в первом цилиндрическом резонаторе

№	Варьируемые параметры								Критерии оптимизации	
	удельная мощность генератора			продолжительность воздействия ЭМП СВЧ			содержание меда в восковом сырье, %		температура нагрева, °С	удельные энергетические затраты, Вт·ч/кг
	x_1	$P_{уд}$		x_2	τ		x_3	k	y_1, T	$y_2, УЭЗ$
		Вт/г	Вт/кг		ч	мин				
1	+	0,9	900	+	0,033	2	+	7	47,2	29,7
2	+	0,9	900	-	0,022	1,3	-	5	27,9	19,8
3	-	0,6	600	+	0,033	2	-	5	37,3	19,8
4	-	0,6	600	-	0,022	1,3	+	7	30,1	13,2
5	0	0,75	750	0	0,027	1,65	0	6	38,4	20,25
6	-	0,6	600	0	0,027	1,65	0	6	33,9	16,2
7	+	0,9	900	0	0,027	1,65	0	6	38,6	24,3
8	0	0,75	750	-	0,022	1,3	0	6	28,9	16,5
9	0	0,75	750	+	0,033	2	0	6	43,4	24,75
10	0	0,75	750	0	0,027	1,65	-	5	37,5	20,25
11	0	0,75	750	0	0,027	1,65	+	7	40,2	20,25

Получены адекватные (по критерию Фишера) функции отклика (4.12–4.13):

$$T, \text{°C} = -21,83 + 0,014 \cdot P_{уд} + 1223,4 \cdot \tau + 2,47 \cdot K; \quad (4.12)$$

$$УЭЗ, \text{Вт} \cdot \text{ч/кг} = -23,80 + 0,027 \cdot P_{уд} + 750,0 \cdot \tau + 0,550 \cdot K. \quad (4.13)$$

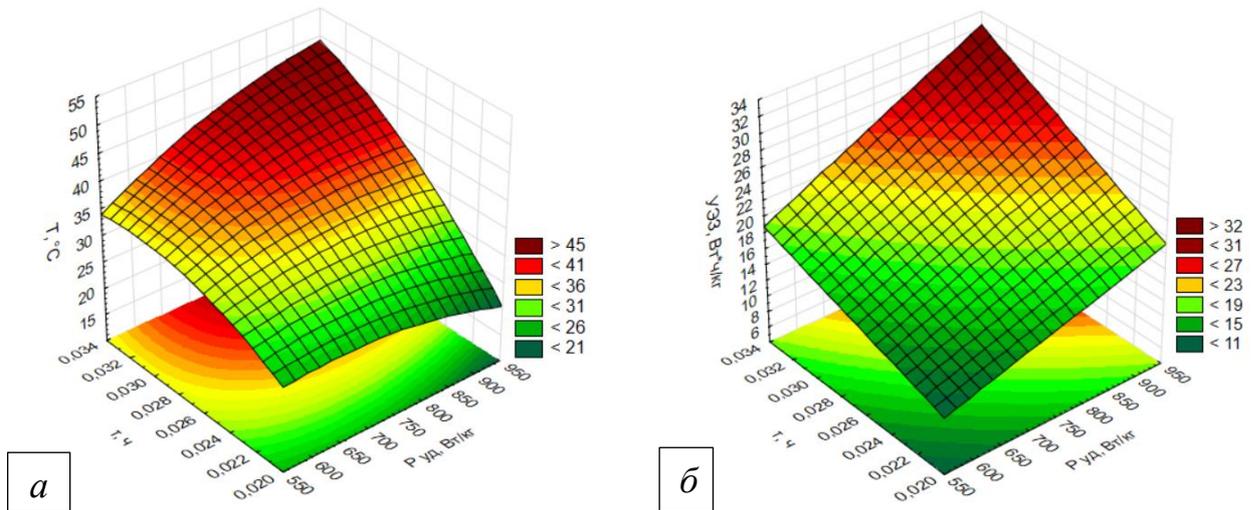


Рисунок 4.13 – Поверхности отклика и двумерные сечения в изолиниях трехфакторных моделей изменения: а) температуры сырья; б) удельных энергетических затрат на вытопку пчелиного воска

Анализ регрессионных моделей показывает, что эффективным режимом отделения **7 %** меда от воскового сырья в первом цилиндрическом резонаторе СВЧ-воскотопки с совмещенными цилиндрическими резонаторами является: удельная мощность – **0,9 Вт/г**, продолжительность воздействия ЭМПСВЧ – **2 мин (0,033 ч)**. При этом температура меда на выходе составит **47,2 °С**, удельные энергетические затраты составят **29,7 Вт·ч/кг**.

Сравнительные данные удельных энергетических затрат на отделения меда от воскового сырья при воздействии ЭМПСВЧ в разных конструкциях первых резонаторов в двухрезонаторных воскотопках приведены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Сравнительные данные удельных энергетических затрат на отделение меда от воскового сырья при воздействии ЭМПСВЧ в разных конструкциях первых резонаторов в двухрезонаторных СВЧ-воскотопках

№ воскотопки и конфигурация первого резонатора	Мощность магнетронов, Вт	Температура, °С	Удельные энергетические затраты, Вт·ч/кг
1 – полусферический	850	49,1	25,2
2 – сферический	850	48,1	48,75
3 – цилиндрический	850	46,9	72,5
4 – цилиндрический	850	47,2	29,7

4.2.4 Результаты оценки рабочего процесса вытопки воскового сырья в СВЧ-воскотопках

Процесс вытопки воскового сырья с отделением остаточного меда должен протекать с максимально возможными скоростями эндогенного нагрева при минимальных энергетических затратах. Поддержание параметров процесса на уровне, обеспечивающем выполнение этих требований, является целью оптимизации процесса вытопки воскового сырья. Т. е. выбрать такие параметры процесса вытопки воскового сырья, при которых он протекает по заранее указанному критерию. Возможность выбора различных режимов термообработки воскового сырья предусматривается матрицей планирования активного эксперимента. Для построения модели процесса термообработки воскового сырья в первом резонаторе, где происходит отделение меда, воспользовались трехфакторным планированием по плану Хартли типа 2^3 , а во втором резонаторе, где полностью вытапливается воск – ротатабельное планирование второго порядка [140, с. 86]. Причем данные обрабатывались в виде регрессионных моделей температуры нагрева и удельных энергетических затрат от удельной мощности генератора (x_1), продолжительности воздействия (x_2) ЭМПСВЧ и содержания меда (x_3) в восковом сырье в первом резонаторе всех четырех конструкций СВЧ-воскотопок.

А процессы термообработки воска во втором резонаторе всех конструкций обрабатывались в виде регрессионных моделей температуры нагрева воска, производительности, общего микробного числа в сырье, удельных энергетических затрат от удельной мощности генератора (x_1), продолжительности воздействия ЭМПСВЧ (x_2).

Выбор рациональных параметров СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами (патент 2770496)

Составлена матрица проведения эксперимента по выявлению рациональных режимов работы СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами для термообработки воскового сырья (таблица 4.14).

Варьировали удельной мощностью генератора (P_{y0} : 0,85–1,45 Вт/г), продолжительностью воздействия ЭМП СВЧ (τ : 0,0382–0,0618 ч). Критериями оптимизации служили температура нагрева (y_1), производительность установки (y_2), общее микробное число (y_3), удельные энергетические затраты (y_4) (табл. 4.14). Мощность магнетронов во втором резонаторе **1700 Вт**.

Пользуясь программой «STATISTICA 12», построены поверхности откликов и их двумерные сечения в изолиниях моделей, описывающих взаимосвязь указанных критериев с варьируемыми параметрами (рисунок 4.14).

Таблица 4.14 – Матрица проведения эксперимента по выявлению рациональных режимов работы СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами для термообработки воскового сырья

№	Кодированная матрица						Критерии оптимизации			
	x_1	P_{y0}		x_2	τ		температура нагрева, °С	производительность, кг/ч	ОМЧ, $10^6 \cdot \text{КОЕ} \cdot \text{г}$	удельные энергетические затраты, Вт·ч/кг
		Вт/г	Вт/кг		ч	мин				
1	+	1,45	1450	+	0,058	3,5	92	20,17	0,38	84,1
2	-	0,85	850	+	0,058	3,5	54	34,48	0,91	49,3
3	+	1,45	1450	-	0,041	2,5	64	28,53	0,78	59,45
4	-	0,85	850	-	0,041	2,5	55	48,78	0,61	34,85
5	-1,414	0,726	726	0	0,05	3,0	50,3	23,42	0,95	36,3
6	+1,414	1,574	1574	0	0,05	3,0	77,4	10,8	0,63	78,7
7	0	1,15	1150	-1,414	0,0382	2,29	51	17,36	1,05	48,93
8	0	1,15	1150	+1,414	0,0618	3,71	59	11,96	0,79	71,11
9	0	1,15	1150	0	0,05	3,0	73	29,56	0,47	57,5
10	0	1,15	1150	0	0,05	3,0	73	29,56	0,47	57,5
11	0	1,15	1150	0	0,05	3,0	73	29,56	0,47	57,5
12	0	1,15	1150	0	0,05	3,0	73	29,56	0,47	57,5
13	0	1,15	1150	0	0,05	3,0	73	29,56	0,47	57,5

Примечание: эксперимент проводился при постоянной концентрации меда ниже 3 %.

Получены эмпирические выражения, описывающие зависимости критериев оптимизации от варьируемых параметров:

$$T, \text{ °С} = -130,13 - 0,03 \cdot P_{y0} + 7580,24 \cdot \tau - 3,04 \cdot 10^{-5} \cdot P_{y0}^2 + 2,81 \cdot P_{y0} \cdot \tau - 1,03 \cdot 10^5 \cdot \tau^2; \quad (4.14)$$

$$Q, \text{ кг/ч} = -16,43 - 0,0 \cdot P_{y0} + 2916,58 \cdot \tau - 2,15 \cdot 10^{-5} \cdot P_{y0}^2 + 0,63 \cdot P_{y0} \cdot \tau - 41425,88 \cdot \tau^2; \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \text{ОМЧ, КОЕ/г} \cdot 10^6 &= 4,96 + 0,01 \cdot P_{y\partial} - 172,02 \cdot \tau + \\ &+ 1,2298 \cdot 10^{-6} \cdot P_{y\partial}^2 - 0,07 \cdot P_{y\partial} \cdot \tau + 2457,97 \cdot \tau^2; \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\text{УЭЗ, Вт} \cdot \text{ч/кг} = 30,06 + 0,01 \cdot P_{y\partial} - 1309,25 \cdot \tau - 3,85 \cdot 10^{-6} \cdot P_{y\partial}^2 + P_{y\partial} \cdot \tau + 12145,42 \cdot \tau^2. \quad (4.17)$$

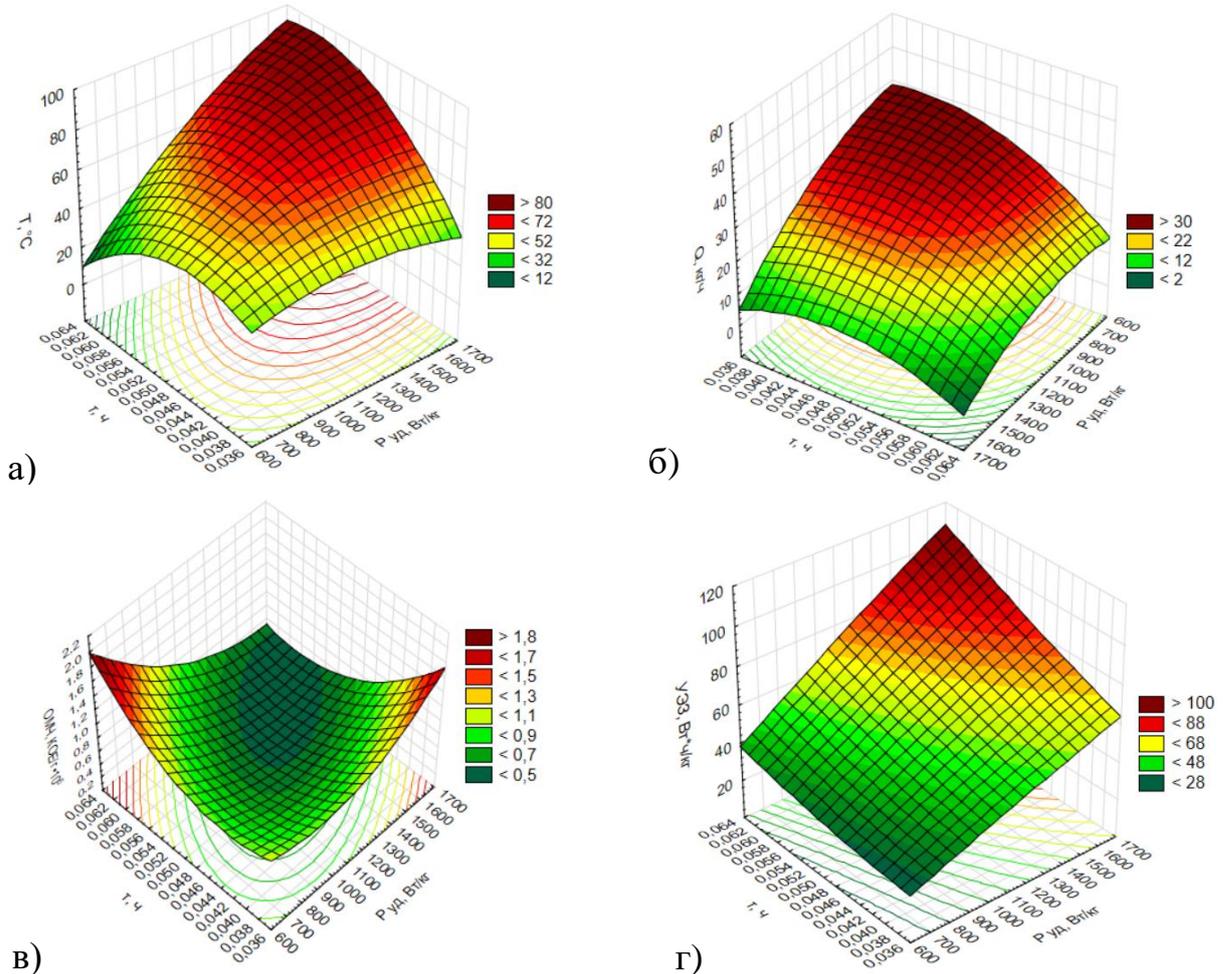


Рисунок 4.14 – Поверхности отклика и двумерные сечения в изолиниях двухфакторных моделей изменения: а) температуры сырья; б) производительности воскотопки; в) общего микробного числа; г) удельных энергетических затрат при мощностимагнетронов во втором полусферическом резонаторе мощностью магнетронов 1700 Вт

Из анализа регрессионных моделей вытекает, что эффективным режимом работы СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами является: удельная мощность 1,15 Вт/г, продолжительность воздействия 0,05 ч. При этом температура воска на выходе составит 73 °С, производительность установки – 29,56 кг/ч, бактериальная обсемененность взятого образца полученного воска составила $0,47 \cdot 10^6$ КОЕ/г, удельные энергетические затраты – 57,5 Вт·ч/кг.

Выбор рациональных параметров СВЧ-воскотопки

с резонаторами в виде сферы в кольцевом резонаторе (патент № 2737142)

В кольцевом резонаторе возбуждение ЭМП СВЧ происходит от двух магнетронов, общей мощностью 1700 Вт. Варьировали удельной мощностью генератора (x_1) с 1,026 до 1,874 Вт/г, продолжительностью воздействия ЭМП СВЧ (x_2) с 0,092 до 0,137 ч.

Матрица проведения эксперимента по выявлению рациональных режимов работы СВЧ-воскотопки (в кольцевом резонаторе) для термообработки воскового сырья приведена в таблице 4.15. Пользуясь программой «STATISTICA 12», построены поверхности откликов и их двумерные сечения в изолиниях моделей, описывающих взаимосвязь указанных критериев с варьируемыми параметрами (рисунок 4.15).

Таблица 4.15 – Матрица проведения эксперимента по выявлению рациональных режимов работы СВЧ-воскотопки для термообработки воскового сырья в кольцевом резонаторе

№	Кодированная матрица						Критерии оптимизации			
	x_1	$P_{уд}$		x_2	τ		температура нагрева, °С	производительность, кг/ч	ОМЧ, $10^6 \cdot \text{КОЕг}$	удельные энергетические затраты, Вт·ч/кг
		Вт/г	Вт/кг		ч	мин				
1	+	1,75	1750	+	0,117	7	100	8,31	0,38	204,75
2	-	1,15	1150	+	0,117	7	72	12,63	0,58	134,55
3	+	1,75	1750	-	0,0167	1	60	58,14	0,48	29,23
4	-	1,15	1150	-	0,0167	1	40	88,5	1,3	19,21
5	-1,414	1,026	1026	0	0,0667	4	62	24,81	0,7	68,44
6	+1,414	1,874	1874	0	0,0667	4	94	13,61	0,05	125
7	0	1,45	1450	-1,414	0,092	0,25	42	12,76	1,0	133,4
8	0	1,45	1450	+1,414	0,137	8,24	102	8,55	0,06	198,65
9	0	1,45	1450	0	0,0667	4	70	17,58	0,39	96,72
10	0	1,45	1450	0	0,0667	4	70	17,58	0,39	96,72
11	0	1,45	1450	0	0,0667	4	70	17,58	0,39	96,72
12	0	1,45	1450	0	0,0667	4	70	17,58	0,39	96,72
13	0	1,15	1450	0	0,0667	4	70	17,58	0,39	96,72

Примечание: эксперимент проводился при постоянной концентрации меда ниже 3 %.

Получены эмпирические выражения, описывающие зависимости критериев оптимизации от варьируемых параметров:

$$T, \text{ }^{\circ}\text{C} = 121,95 - 0,14 \cdot P_{y\delta} + 90,54 \cdot \tau + 5,81 \cdot 10^{-5} \cdot P_{y\delta}^2 + 0,13 \cdot P_{y\delta} \cdot \tau + 506,59 \cdot \tau^2; \quad (4.18)$$

$$Q, \text{ кг/ч} = 199,92 - 0,09 \cdot P_{y\delta} - 2352,71 \cdot \tau + 1,4221 \cdot 10^{-5} \cdot P_{y\delta}^2 + 0,43 \cdot P_{y\delta} \cdot \tau + 8091,01 \cdot \tau^2; \quad (4.19)$$

$$OMЧ, \text{ КОЕ/Г} \cdot 10^6 = 2,98 - 0,01 \cdot P_{y\delta} - 24,52 \cdot \tau - 7,34 \cdot 10^{-8} \cdot P_{y\delta}^2 + 0,01 \cdot P_{y\delta} \cdot \tau + 37,19 \cdot \tau^2; \quad (4.20)$$

$$УЭЗ, \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг} = 0,01 - 1,32 \cdot 10^{-7} \cdot P_{y\delta} + 0,03 \cdot \tau - 2,81 \cdot 10^{-10} \cdot P_{y\delta}^2 + P_{y\delta} \cdot \tau - 0,55 \cdot \tau^2. \quad (4.21)$$

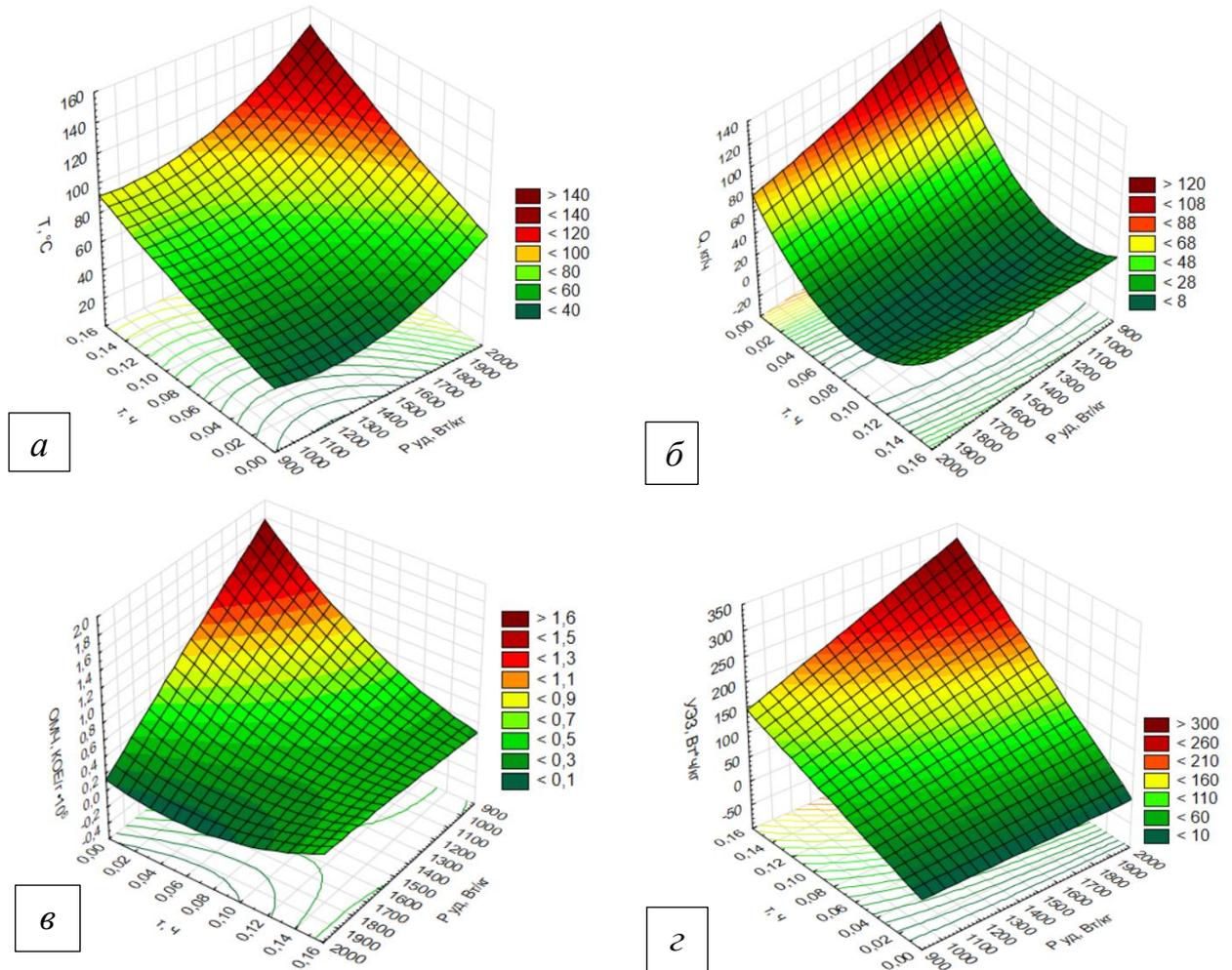


Рисунок 4.15 – Поверхности отклика и двумерные сечения в изолиниях двухфакторных моделей изменения: а) температуры сырья; б) производительности воскотопки; в) общего микробного числа; г) удельных энергетических затрат при мощности магнетронов во втором полусферическом резонаторе мощностью магнетронов 1700 Вт

Из анализа регрессионных моделей вытекает, что эффективным режимом работы СВЧ-воскотопки *с резонаторами в виде сферы в кольцевом резонаторе* является: удельная мощность 1,45 Вт/г, продолжительность воздействия 4 мин. При этом температура воска на выходе составит 70 °С, производительность установки – **17,6 кг/ч**, бактериальная обсемененность вытопленного воска – $0,39 \cdot 10^6$ КОЕ/г, удельные энергетические затраты – 96,72 Вт·ч/кг.

Результаты исследования (таблицы 4.14, 4.15) можно использовать для *приближенного подхода* к оценке величины собственной добротности резонаторов, как отношение запасенной энергии (W , Вт·ч/кг) к средней энергии потерь (Вт/кг) за период колебания по формуле [127, с. 346].

Например, при $P_{уд} = 1750$ Вт·ч и $W = 40$ Вт·ч/кг собственная добротность кольцевого резонатора составит 97688.

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot W}{3600 \cdot P_{уд}} = \frac{6,28 \cdot 2450 \cdot 40}{3600 \cdot 1750} = 97688. \quad (4.21)$$

Собственная добротность полусферического резонатора – 86156.

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot W}{3600 \cdot P_{уд}} = \frac{6,28 \cdot 2450 \cdot 29,23}{3600 \cdot 1450} = 86156. \quad (4.22)$$

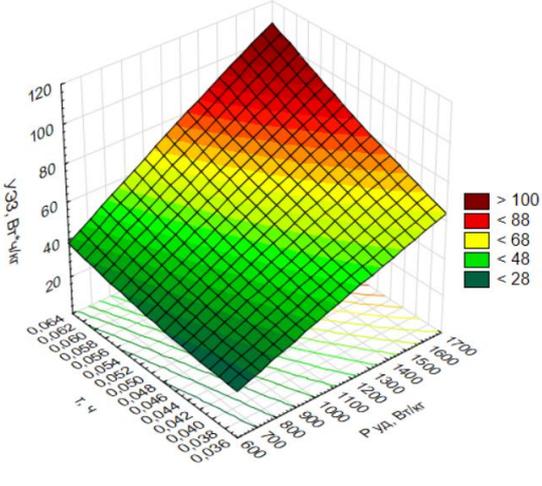
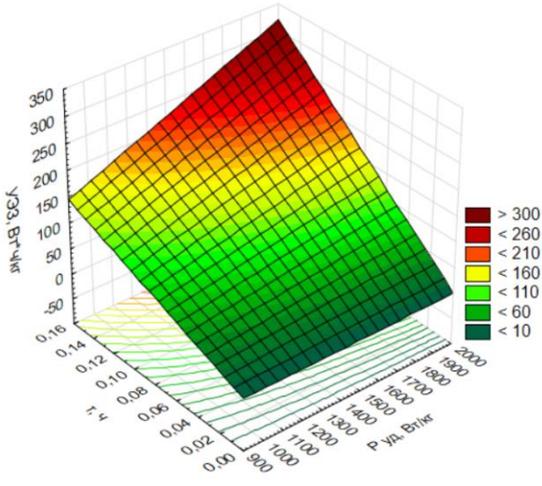
Эти результаты на 17–20 % отличаются от результатов, вычисленных по конструктивным размерам резонаторов (см. таблицу 2.6).

4.3 Сравнение удельных энергетических затрат на вытопку пасечного воска с отделением меда в воскотопках

Для обоснованного выбора воскотопки с полусферическими резонаторами проведен сравнительный анализ удельных энергетических затрат на термообработку воскового сырья как основной критерий оптимизации эффективных режи-

мов работы. Модели зависимости удельных энергетических затрат на вытопку пчелиного воска от удельной мощности генератора и продолжительности воздействия ЭМП СВЧ приведены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Сравнительные данные удельных энергетических затрат (УЭЗ) на вытопку пчелиного воска с помощью воскотопок

Воскотопка с полусферическими резонаторами	Воскотопка с резонаторами в виде сферы в кольцевом резонаторе
	
<p>температура – 73 °С; производительность – 29,56 кг/ч; ОМЧ – 470 тыс. КОЕ/г; УЭЗ – 57,5 Вт·ч/кг</p>	<p>температура – 70 °С; производительность – 17,58 кг/ч; ОМЧ – 390 тыс. КОЕ/г; УЭЗ – 96,72 Вт·ч/кг</p>

Сравнительный анализ воскотопок показывает, что минимальными энергетическими затратами (57,5 Вт·ч/кг) обладает воскотопка с полусферическими резонаторами. Благодаря двухрезонаторной конструкции воскотопок с несколькими магнетронами, позволяющими изменить мощность генератора, и транспортирующих механизмов (нагнетательный шнек, центрифуги и т. п.) появляется возможность регулировать скорость нагрева меда и воскового сырья, определить продолжительность воздействия ЭМП СВЧ до достижения температуры плавления меда и воска.

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод о достижении температуры плавления меда и воска за определенный период. Так как температура плавления меда составляет 45 °С, а воска – от 65 °С соответственно, необходимо мед отделить в первом модуле, создавая особый температурный режим

при достижении критической напряженности ЭП, указанной во второй главе, что позволит разделить две вязкие фракции. Далее при помощи фторопластового шнека воск перемещается во второй модуль, в котором шаг витков меньше, чем в первом, что увеличивает время нахождения в нем воскового сырья.

Для увеличения удельной мощности генератора и создания более высокой напряженности электрического поля за счет интерференции волн на поверхности второго резонатора установлены два магнетрона. Использование такой конструкции, геометрически согласованной с длиной волны (обоснование приведено во втором разделе), позволяет эффективно разделять и вытапливать обе фракции – мед и воск. Экспериментально установлено, что фракция меда полностью отделится в первом резонаторе за 1,7 минуты, оставшаяся часть воскового сырья вытопится за 3 минуты при удельной мощности $1,15 \text{ Вт/см}^3$, что позволит достичь планируемой производительности установки 29 кг/ч [95].

С учетом потребляемой мощности опытного образца СВЧ-воскотопки, равной 3,58 кВт, и производительности 28–29 кг/ч, удельные энергетические затраты на вытопку воска и отделение меда составят 0,13 кВт·ч/кг. В сравнении с венгерской воскотопкой «Konigin», как лучшей по производительности из паровых воскотопок, чьи УЭЗ равны 0,5 кВт·ч/кг, УЭЗ проектного образца СВЧ-воскотопки в три раза меньше.

4.4 Обеспечение электромагнитной безопасности обслуживающего персонала

Разработанная и созданная двухрезонаторная СВЧ-воскотопка для отделения меда и вытопки пасечного воска, потребляемая мощность 3,58 кВт, содержит заградительные волноводы для ограничения электромагнитных излучений. Даже

если небольшая часть этой мощности просачивается в окружающее пространство, это может представлять опасность для обслуживающего персонала. Поэтому при работе с установкой необходимо соблюдать санитарную норму СВЧ-излучения.

Расчет заградительного волновода. Предотвращение излучения осуществляется применением сливного патрубка в виде неферромагнитной трубки малого диаметра и необходимой длины, выполняющей функцию заградительного волновода. Расчет проводили двумя способами.

Первый способ. Если радиус трубки принять равным четверти длины волны (3,06 см), то погонное затухание на низшем типе волны H_{11} можно вычислить по известной формуле [5; 127]: $L = 16 \div R = 16 \div 30.6 = 5,2$ дБ/см.

Если мощность СВЧ-колебаний резонатора составляет 1,6 кВт, а допустимая мощность потока излучений 10 мкВт/см^2 , то на длине трубки должно быть ослабление $1,6 \div 10^{-5} = 1,6 \cdot 10^5$ раз, или примерно 50 дБ. Длина трубки будет $l = 50 \div L = 50 \div 5,2 = 9,6$ см. Безопасный уровень излучения может быть получен при не очень длинной неферромагнитной трубке – 9,6 см.

Второй способ основан на том, что электромагнитная энергия сверхвысокой частоты распространяется по неферромагнитной трубке (заградительном волноводе), если ее размеры (диаметр и длина) превосходят критическую величину, зависящую от длины волны.

Критическая длина волны определяется по формулам [11]:

- для круглого заградительного волновода $\lambda_{кр} = 3,41 \cdot r \cdot \sqrt{\varepsilon}$;
- для прямоугольного заградительного волновода – $\lambda_{кр} = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\varepsilon}$, (4.23)

где r – радиус заградительного волновода, ε – относительная диэлектрическая проницаемость сырья, заполняющего заградительный волновод, a – ширина прямоугольного заградительного волновода.

Чем больше длина излучаемой волны ($\lambda = 12,24$ см) отличается от критической волны, тем быстрее происходит ее затухание в волноводе. Ослабление напряженности ЭП в конце волновода можно оценить выражением [127]:

$$E = E_0 \cdot e^{-\pi \cdot l / d}, \quad (4.24)$$

где E – напряженность ЭП в конце волновода длиной l и диаметром d ; E_0 – напряженность ЭП в начале запердельного волновода.

Чем больше длина запердельного волновода, тем сильнее ослабление электромагнитного поля на его выходе. Допустимую длину волновода можно определить по известной формуле [127]:

$$l_{\text{дон}} = (2,3 \cdot d / \pi) \cdot (\lg E / E_0). \quad (4.25)$$

где $d = 3,06$ см (принимается равным четверти длины волны).

При частоте 2450 МГц в соответствии с санитарными нормами можно принять допустимую напряженность электрической составляющей ЭМП $E_0 = 5$ В/м. Если напряженность в объемном резонаторе $E = 1,5 \cdot 10^5$ В/м, тогда

$$\begin{aligned} L_{\text{дон}} &= (2,3 \cdot d / \pi) \cdot (\lg E / E_0) = (2,3 \cdot d / \pi) \cdot (\lg 1,5 \cdot 10^5 / 5) = \\ &= (2,3 \cdot 3,06 \cdot 10^{-2} / 3,14) \cdot 4,477 = 0,09 \text{ м} = 9 \text{ см}. \end{aligned} \quad (4.26)$$

При этом должно выполняться соотношение $l < 4 \cdot d$; $9 < 4 \cdot 3,06$; $9 \text{ см} < 12,24$ см. Имеется и второе условие $2 \cdot d < l < 3,06 \cdot d$; $2 \cdot 3,06 < 9 < 3 \cdot 3,06$; $6,12 < 9 < 9,18$. Итак, при длине запердельного волновода 9 см и диаметре трубки, равном четверти длины волны 3,06 см, электромагнитная энергия СВЧ распространяться за пределами установки не будет [141].

Измерение плотности потока энергии электромагнитного поля около СВЧ-воскотопки осуществляли при помощи прибора ПЗ-33-М, результаты представлены в таблице 4.17. Протокол исследования предоставлен испытательной лабораторией ООО «Волго-Вятский центр испытаний» (приложение Н).

Таблица 4.17 – Результаты измерения плотности потока энергии ЭМП

Время воздействия, мин	Высота от уровня пола, м	Результаты измерений, мкВт/см ²	Нормативное значение
60	0,5	41; 26; 30; 37	1000
	1	110; 96; 112; 95	
	1,7	214; 188; 203; 196	



Рисунок 4.16 – Измерение плотности потока энергии ЭМП

Результаты измерений показывают, что запредельные волноводы, выполняющие роль сливных патрубков, а также начальные и конечные витки шнека, выполненные из неферромагнитного материала, ограничивают распространение излучения ЭМП за пределы установки, обеспечивая безопасность обслуживающего персонала.

4.5 Выводы

Сравнение теоретических данных динамики нагрева воскового сырья при разных дозах воздействия ЭМП СВЧ с экспериментальными данными показывают, что они совпадают с достаточной доверительной вероятностью ($R^2 = 0,95$).

Полученные результаты исследования динамики нагрева воскового сырья и меда при различных удельных мощностях генератора позволили согласовать конструктивно-технологические параметры с режимами работы СВЧ-воскотопки, а именно: конструктивные параметры резонаторов, продолжительность обработки с удельной мощностью генераторов, производительностью воскотопки.

Результаты сравнительного анализа органолептических и микробиологических (общего микробного числа) параметров обработанного воска контрольного и опытного вариантов показывают, что потребительские показатели опытного воска

и меда соответствуют ГОСТ 21179-2000 «Воск пчелиный» и ГОСТ 19792-2017 «Мед натуральный. Технические условия». Результаты исследования влияния ЭМП СВЧ на изменение бактериальной обсемененности воска с $1,5 \cdot 10^6$ КОЕ/г показали, что снижение ОМЧ до предельно допустимого уровня возможно при воздействии ЭМП СВЧ с удельной мощностью генератора 1,15 Вт/г и продолжительности воздействия 3 мин.

Выявлены рациональные режимы работы СВЧ-воскотопок путем реализации матрицы активного планирования трехфакторного эксперимента типа 2^3 по плану Хартли и ротатабельного планирования второго порядка с учетом принципа кодирования и уровней варьирования факторов: удельной мощности генератора, продолжительности воздействия ЭМП СВЧ, содержания меда в восковом сырье в процентах. Из анализа регрессионных моделей вытекают следующие эффективные режимы работы СВЧ-воскотопок с разными конструктивными исполнениями резонаторов.

1. Эффективным режимом работы первой СВЧ-воскотопки для отделения меда из воскового сырья в первом **полусферическом резонаторе** является: удельная мощность 0,9 Вт/г, продолжительность воздействия ЭМП СВЧ 1,7 мин. При этом температура меда достигает 49°C , а удельные энергетические затраты составят **25,2** Вт·ч/кг.

2. Эффективным режимом работы второй СВЧ-воскотопки для отделения меда из воскового сырья в **сферическом резонаторе** является: удельная мощность 1,3 Вт/г, продолжительность воздействия ЭМП СВЧ 2,25 мин., при этом температура меда достигает $48,1^\circ\text{C}$, а удельные энергетические затраты составят **48,75** Вт·ч/кг.

3. Эффективным режимом отделения меда в **цилиндрическом резонаторе** от воскового сырья СВЧ-воскотопки с совмещенными цилиндрическим и сферическим резонаторами является удельная мощность 1,3 Вт/г, продолжительность воздействия ЭМП СВЧ 2 мин. При этом температура меда на выходе составит **46,9** $^\circ\text{C}$, удельные энергетические затраты составят **72,5** Вт·ч/кг.

4. Эффективным режимом отделения меда от воскового сырья в первом **цилиндрическом резонаторе** СВЧ-воскотопки с совмещенными цилиндрическими резонаторами является: удельная мощность 0,9 Вт/г, продолжительность воздействия ЭМП СВЧ 2 мин. При этом температура меда на выходе составит **47,2 °С**, удельные энергетические затраты составят **28,7 Вт·ч/кг**.

5. Эффективным режимом работы СВЧ-воскотопки с **полусферическими резонаторами** является: удельная мощность 1,15 Вт/г, продолжительность воздействия 3 мин. При этом температура воска на выходе составит 73 °С, производительность установки – 29,56 кг/ч, бактериальная обсемененность взятого образца полученного воска составила $0,47 \cdot 10^6$ КОЕ/г, удельные энергетические затраты – 57,5 Вт·ч/кг.

6. Эффективным режимом работы СВЧ-воскотопки с **резонаторами в виде сферы в кольцевом резонаторе** является: удельная мощность 1,45 Вт/г, продолжительность воздействия 4 мин. При этом температура воска на выходе составит 70 °С, производительность установки – **17,6 кг/ч**, бактериальная обсемененность вытопленного воска – $0,39 \cdot 10^6$ КОЕ/г, удельные энергетические затраты – 96,72 Вт·ч/кг.

На основании комплекса исследований, проведенных в лабораторных условиях, показана целесообразность реализации микроволновой технологии переработки воскового сырья с отделением остаточной фракции меда в двухрезонаторной СВЧ-воскотопке с полусферическими резонаторами, содержащей фторопластовый электроприводной шнек, с возможностью регулирования скорости вращения и запредельные волноводы для обеспечения непрерывного режима работы.

Использование запредельного волновода диаметром 3,06 см и длиной 9 см для слива воска и меда, а также начальные и конечные витки шнека, выполненные из ферромагнитного материала, ограничивают распространение электромагнитной энергии СВЧ за пределы установки.

Разработанные, запатентованные способ вытопки воска и двухрезонаторные СВЧ-воскотопки с магнетронами воздушного охлаждения, непрерывно-поточного действия мощностью 3,58–4,17 кВт и производительностью 17–29 кг/ч

обеспечивают вытопку пасечного воска с отделением 7 % меда с обеззараживанием воска (ОМЧ ниже 500 тыс. КОЕ/г) при воздействии электромагнитного поля сантиметрового диапазона (12,24 см), напряженностью электрического поля в сырье 4–10 кВ/см при сохранении потребительских свойств меда и воска.

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СВЧ-ВОСКОТОПКИ В УСЛОВИЯХ ПАСЕКИ

Оценку экономической эффективности применения СВЧ-воскотопки будем проводить для пчеловодческих хозяйств с количеством пчелосемей не менее 100 ульев.

Согласно Водяникову В. Т. [147, с. 12] годовой экономический эффект от внедрения новых технологий и технических средств оценивается по формуле:

$$Э_{Г} = (З_{б} - З_{п}) \cdot Q_{Г}, \quad (5.1)$$

где $З_{б}$, $З_{п}$ – приведенные затраты на единицу продукции соответственно по базовому и проектному варианту; $Q_{Г}$ – годовой объем перерабатываемого сырья на агропредприятии.

Улья 2-ярусные, по 12 рамок в верхнем и нижнем ярусе. В год рекомендуется заменять 30–40 % рамок (поврежденные, старые темные соты). Как известно [74], с 1 рамки выход воска составляет 310–430 г воска. Откачка меда производится 2 раза в год. Перед откачкой с рамок снимается забрус – верхняя часть запечатанных сот, что составляет до 40 % воска с 1 рамки. За откачку забирают не более 50 % рамок, после откачки рамки с сушью возвращаются в улей.

Таким образом, максимальный годовой объем перерабатываемого воскового сырья составит:

- по поврежденным сотам:

$$6 \cdot 100 \text{ ульев} \cdot 0,37 \text{ кг} = 222 \text{ кг};$$

- по забрусу:

$$12 \text{ рамок} \cdot 2 \cdot 0,37 \text{ кг} \cdot 40 \% \cdot 100 \text{ ульев} = 355 \text{ кг}.$$

Принимаем годовой объем перерабатываемого воскового сырья – 580 кг. Выход воска с 1 кг воскового сырья 810 г [74]. Получаемый объем вытопленного воска – 470 кг. Из расчета, что в 1 кг воскового сырья содержится 5–7 % меда, а

отделить получается лишь 4 %, получаемый объем меда после отделения из воскового сырья – 19 кг.

Общие затраты на вытопку годового объема перерабатываемого сырья рассчитываются:

$$Z_{\text{общ}} = Z_{\text{OT}} + Z_{\text{эл.г}} + Z_A + Z_{\text{ТР}} + Z_{\text{ПР}} + Z_{\text{ОХ}}, \quad (5.2)$$

где Z_{OT} – затраты на оплату труда оператора воскотопки; $Z_{\text{эл.г}}$ – годовые затраты на электроэнергию; Z_A – затраты на амортизационные отчисления; $Z_{\text{ТР}}$ – затраты на текущий ремонт; $Z_{\text{ПР}}$ – прочие расходы; $Z_{\text{ОХ}}$ – затраты на общехозяйственные и общепроизводственные нужды.

5.1 Затраты на вытопку пасечного воска по базовому варианту

За базовую воскотопку принимаем паровую воскотопку Konigin (рисунок 1.11) с производительностью 6,5 кг/ч и потребляемой мощностью – 3,25 кВт.

1.1. Затраты на оплату труда оператора воскотопки.

Время на переработку годового объема воскового сырья при заданной производительности базовой воскотопки:

$$580 \div 6,5 = 89,2, \text{ принимаем } 90 \text{ часов.}$$

$$Z_{\text{OT}} = 90 \cdot 170 \cdot 1,25 \cdot 1,5 = 28687,5 \text{ руб.,}$$

где 170 – часовая тарифная ставка специалиста II разряда – оператора воскотопки, руб.; 1,25 – тарифный коэффициент; 1,5 – отраслевой коэффициент за условия труда.

1.2. Затраты электроэнергии на производство 1 кг продукции (удельные энергетические затраты) при расходе электроэнергии 3,25 кВт/ч составят: $3,25 \div 6,5 = 0,5$ кВт·ч/кг.

Затраты на переработку годового объема сырья:

$$Z_{эл.э} = 0,5 \cdot 580 \cdot 6,66 = 1931,4 \text{ руб.},$$

где 6,66 – тариф на электроэнергию.

1.3. Отчисления на амортизацию. Поскольку паровая воскотопка относится к амортизационной группе от 3 до 5 лет, норма отчислений составит 20 % в год, а с учетом того, что она работает 1 раз в год, распределения по месяцам не будет:

$$Z_A = A \cdot 0,2 = 35000 \cdot 0,2 = 7000 \text{ руб.},$$

где A – балансовая стоимость конструкции, руб.

1.4. Затраты на текущий ремонт при годовой норме 24 % с учетом того, что установка работает 1 раз в год, составят:

$$Z_{ТР} = 35000 \cdot 0,24 = 8400 \text{ руб.}$$

1.5. Прочие затраты на вытопку воска в месяц:

$$Z_{ПР} = (28687,5 + 1931,4 + 7000 + 8400) \cdot 0,05 = 2300,9 \text{ руб.}$$

1.6. Затраты на общехозяйственные и общепроизводственные нужды:

$$Z_{ОХ} = (28687,5 + 1931,4 + 7000 + 8400 + 2300,9) \cdot 0,15 = 7247,9 \text{ руб.}$$

1.7. Сумма общих эксплуатационных затрат на вытопку воска:

$$Z_{общ} = 28687,5 + 1931,4 + 7000 + 8400 + 2300,9 + 7247,9 = 55567,7 \text{ руб.}$$

1.8. Приведенные затраты на единицу продукции по базовому варианту:

$$Z_б = 55567,7 \div 580 = 95,8 \text{ руб./кг.}$$

5.2 Экономические показатели внедрения СВЧ-воскотопки непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами (патент № 2770496)

СВЧ-воскотопка непрерывно-поточного действия состоит из двух полусферических алюминиевых резонаторов с общим основанием, трех магнетронов с волноводами, вентилятора для охлаждения магнетронов, фторопластового нагне-

тательного шнека во фторопластовом корпусе, шкафа управления, запердельных волноводов, шаровых кранов, загрузочной емкости (рисунок 4.2). Технические характеристики – см. таблицу 3.1.

Стоимость материалов покупных изделий приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Стоимость материалов покупных изделий*

Наименование	Кол-во	Стоимость, руб.
Полусфера, диаметр 0,6 м	2 шт.	2×7,500 = 15000
Генераторный блок с магнетроном 2М253К(ЖТ), 850 Вт	3 шт.	3×3000 = 9000
Мотор-редуктор GV22-200W-200A	1 шт.	15250
Преобразователь частоты WANSHSIN 0,2 кВ	1 шт.	6000
Фторопластовый лист 500×1000×3 мм	1 шт.	4500
Труба фторопластовая Ø110 мм (корпус шнека)	1 шт.	7570
Труба фторопластовая Ø50 мм (вал шнека)	1 шт.	2900
Волновод (труба алюминиевая) Ø 30 мм	0,2 м	500
Шаровой кран РОСТерм 1/2" В-Н RT1065	2 шт.	1000
Вентилятор 20 Вт, 15 В	1 шт.	1250
Шкаф управления ШРН-48 (620×380×120)	1 шт.	2200
Пускозащитная аппаратура, электропроводка, кабель и др.		8500
Итого		73670

С учетом расходов на сборку узлов и наладку стоимость воскотопки составляет в пределах 80000 руб.

При производительности СВЧ-воскотопки 29 кг/ч годовой объем воскового сырья установка переработает за:

$$580 \div 29 = 20 \text{ часов.}$$

$$1.1. Z_{OT} = 20 \cdot 170 \cdot 1,25 \cdot 1,5 = 6375 \text{ руб.}$$

$$1.2. Z_{эл.г} = 0,13 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг} \cdot 580 \text{ кг} \cdot 6,66 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч} = 502,2 \text{ руб.}$$

$$1.3. Z_A = A \cdot 0,15 = 80000 \cdot 0,15 = 12000 \text{ руб.}$$

$$1.4. Z_{TP} = 80000 \cdot 0,24 = 19200 \text{ руб.}$$

$$1.5. Z_{IP} = (6375 + 502,2 + 12000 + 19200) \cdot 0,05 = 1903,9 \text{ руб.}$$

$$1.6. Z_{OX} = (6375 + 502,2 + 12000 + 19200 + 1903,9) \cdot 0,15 = 5997,1 \text{ руб.}$$

$$1.7. Z_{обц} = 6375 + 502,2 + 12000 + 19200 + 1903,9 + 5997,1 = 45978,2 \text{ руб.}$$

1.8. Приведенные затраты на единицу продукции по базовому варианту:

$$Z_n = 41057,6 \div 580 = 79,3 \text{ руб./кг.}$$

Сравнение экономических показателей по базовому и проектному вариантам вытопки воска представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Экономические показатели процесса вытопки воска по базовому и проектному вариантам

№ п/п	Показатель	Проектный вариант	Базовый вариант
1	Балансовая стоимость (K), руб.	80000	35000
2	Производительность воскотопки, кг/ч	29	6,5
3	Потребляемая энергия, кВт·ч	3,58	3,25
4	Удельные энергетические затраты, кВт·ч/кг	0,13	0,5
5	Общие эксплуатационные затраты на вытопку воска ($Z_{общ}$), руб.	45978,2	55567,7
6	Приведенные затраты на единицу продукции ($Z_n, Z_б$), руб./кг	79,3	95,8
7	Прибыль от продажи воска (Π), руб./кг	220,7	204,2
8	Годовой объем перерабатываемой продукции (Q_{Γ}), кг	580	
9	Годовой объем выработанной продукции (Q), кг	470	

Годовой экономический эффект от использования СВЧ-воскотопки для вытопки воска согласно (1) составит:

$$\mathcal{E}_{\Gamma} = (95,8 - 79,3) \cdot 580 = 9570 \text{ руб.}$$

Общая годовая прибыль от использования СВЧ-воскотопки с учетом реализации отделившегося из сырья мёда:

$$\Delta \Pi = (93,7 - 87,3) \cdot 580 + 600 \cdot 19 = 20970 \text{ руб.}$$

Уровень рентабельности процесса вытопки воска при цене реализации 1 кг воска 300 руб.:

$$y_p = \frac{\Pi \cdot Q}{Z_{общ}} = \frac{220,7 \cdot 470}{45978,2} \cdot 100 = 225,6 \%. \quad (5.3)$$

Повышение рентабельности процесса вытопки воска в сравнении с базовым вариантом:

$$\left(\frac{220,7 \cdot 470}{45978,2} - \frac{204,2 \cdot 470}{55567,7} \right) \cdot 100 = 52,9 \%.$$

Срок окупаемости:

$$T_{OK} = \frac{K}{\Delta \Pi} = \frac{80000}{20970} = 3,8 \text{ г.} \quad (5.4)$$

Сравнение экономических показателей базового и проектного вариантов показывает снижение приведенных затрат на вытопку воска на 16,5 руб./кг, что обеспечивает годовой экономический эффект 9570 руб. при объеме перерабатываемого сырья 580 кг. Уровень рентабельности процесса вытопки воска в сравнении с базовым вариантом повышается на 52,9 %. Это достигается более высокой производительностью при меньших эксплуатационных затратах. Общая годовая прибыль с учетом реализации дополнительного объема мёда, отделившегося в процессе вытопки, составляет 20970 руб.

Согласно Водяникову В. Т. [147, с. 13] проектный вариант считается эффективным, если соблюдается неравенство:

$$E_{\phi} \geq E_H, \quad (5.5)$$

где E_{ϕ} – фактическая величина эффективности – абсолютная эффективность капитальных вложений; E_H – нормативная величина эффективности капиталовложений ($E_H = 0,2$).

Фактическая величина эффективности определяется [147, с. 13]:

$$E_{\phi} = \frac{\Delta\Pi}{K} = \frac{20970}{80000} = 0,26, \quad (5.6)$$

где $\Delta\Pi$ – прирост прибыли; K – капиталовложения.

Неравенство (5) соблюдается, проект внедрения СВЧ-воскотопки в пчеловодческое хозяйство считаем эффективным. Это возможно при годовом объеме перерабатываемого сырья не менее 580 кг.

Также, исходя из неравенства (5), определили, что внедрение СВЧ-воскотопки будет удовлетворять условию экономической эффективности в хозяйствах с годовым объемом перерабатываемого сырья не менее 450 кг.

5.3 Выводы

Анализ экономических показателей внедрения СВЧ-воскотопки в пчеловодческие хозяйства показал, что рентабельность процесса вытопки воска по сравнению с базовым вариантом повышается на 52,9 %. Данный показатель достигается за счет более высокой производительности и малых эксплуатационных затрат на вытопку воска.

Общая годовая прибыль от применения СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами для вытопки пасечного воска и отделения меда в непрерывном режиме производительностью 29 кг/ч составляет 20970 руб. при объеме выработанной продукции 580 кг, за счет снижения эксплуатационных затрат и продажи дополнительного объема меда.

Установлено, что внедрение СВЧ-воскотопки будет удовлетворять условию экономической эффективности в хозяйствах с годовым объемом перерабатываемого сырья не менее 450 кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты исследования динамики нагрева воскового сырья с учетом изменения его диэлектрических ($\epsilon_r = 2.31-2.39$; $k = 1.16-5.3$; $tg\delta = 0.49-2.25$) и теплофизических параметров ($\rho = 442-970$ кг/м³, $C = 1.05-2.93$ кДж/кг·°С) в процессе воздействия ЭМП СВЧ позволили обосновать скорость нагрева воскового сырья и продолжительность технологического процесса в зависимости от напряженности ЭП.

2. Разработан способ вытопки воскового сырья с отделением меда воздействием ЭМП СВЧ (патент № 2789490), реализованный в двухрезонаторных СВЧ-воскотопках непрерывно-поточного действия с магнетронами воздушного охлаждения, диэлектрическими транспортирующими механизмами в виде центрифуги, диска и нагнетательных шнеков. Вытопка воскового сырья с отделением 5–7 % меда происходит в комбинированных резонаторах разного конструктивного исполнения: 1) полусферические резонаторы с общим основанием (патент 2770496); 2) сферический резонатор в тороидальном резонаторе (патент 2737142); 3) цилиндрический резонатор-центрифуга со сферическим резонатором (патент 2728659); 4) последовательно состыкованные цилиндрические резонаторы (патент 2740095).

3. Оценены ЭД-параметры четырех резонаторов и обоснован выбор состыкованных полусферических резонаторов для эффективного функционирования СВЧ-воскотопки. ЭД-параметры системы «генератор–резонатор–нагрузка», а именно собственная добротность (71329–94794), нагруженная добротность (44304–62324), напряженность ЭП (2,75–7,31 кВ/см), согласованы с объемом резонаторов (60 л), удельной мощностью генераторов, производительностью СВЧ-воскотопки при нагреве до 45 °С меда и 64 °С пасечного воска.

4. Эффективные режимы тепловой обработки воскового сырья в СВЧ-воскотопке, выявленные путем многокритериальной оценки процесса, следующие: производительность 29 кг/ч; удельная мощность генераторов 0,9 Вт/г при отделе-

нии меда от воскового сырья за 1,83 мин и 1,15 Вт/г при вытопке воска за 3 мин; скорость нагрева воска 0,15 °С/с. Результаты оценки органолептических показателей образцов вытопленного воска по 24-балльной шкале свидетельствуют, что цвет, запах и структура на изломе опытного образца на 4 балла выше контрольного образца (20 баллов); результаты микробиологических исследований вытопленного воска показывают снижение бактериальной обсемененности с 1,5 до 0,5 млн КОЕ/г при удельной мощности генератора не менее 1,15 Вт/г и продолжительности нагрева не менее 2,5 мин. В результате испытаний СВЧ-воскотопки непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами в пасечных условиях выявлено, что удельные энергетические затраты на вытопку воскового сырья с отделением меда составляют 0,13 кВт·ч/кг. Использование запредельного волновода диаметром 3,06 см и длиной 9 см для слива воска и меда, а также начальные и конечные витки шнека, выполненные из неферромагнитного материала, ограничивают распространение электромагнитной энергии СВЧ за пределы установки.

5. Годовой экономический эффект от применения СВЧ-воскотопки производительностью 29 кг/ч в пасечных условиях составляет 20970 руб. при объеме перерабатываемого сырья 580 кг за счет снижения эксплуатационных затрат и продажи дополнительного объема меда.

Рекомендации и предложения по производству. В целях достижения условия экономической эффективности рекомендуется использовать СВЧ-воскотопку в пчеловодческих хозяйствах с годовым объемом перерабатываемого сырья не менее 450 кг. Эксплуатация воскотопки должна осуществляться специалистом II группы по электробезопасности. Для исправной работы воскотопки рекомендуется: восковое сырье проверять на наличие металлических предметов; проводить ежедневную санитарную обработку в период эксплуатации.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В дальнейшем целесообразно проведение научных исследований по созданию радиогерметичных СВЧ-воскотопок с металлокерамическими резонаторами большей производительности и с системой дистанционного автоматизированного управления процессом в режиме реального времени.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

Условные обозначения

К разделу 1

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость;

ε_0 – электрическая постоянная, Ф/м;

$\operatorname{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;

k – фактор диэлектрических потерь;

λ – длина волны, м;

ρ – удельное сопротивление, Ом·м;

σ – удельная электропроводность, См/м;

ω – угловая частота, рад/с;

К разделам 2, 3

Δ – глубина проникновения электромагнитного поля в среду, м;

E – напряженность электрического поля, В/м;

E_0 – допустимую напряженность электрической составляющей ЭМП, В/м;

H – напряженность магнитного поля, А/м;

f – частота электромагнитных колебаний, Гц;

W – влажность, %;

x_1, x_2 – концентрация соответственно первого и второго компонентов сырья;

T – температура, °С;

V – объем, м³;

S – площадь, м²;

ρ – плотность, кг/м³;

η – коэффициент полезного действия;

μ – вязкость, П·с;

C – теплоемкость, Дж/кг·С;

Q – добротность;

Q_m – нагруженная добротность;

$Q_{\text{шн}}$ – производительность шнека, кг/ч;

$P_{ген.}$ – мощность генератора, Вт;
 $P_{уд}$ – удельная мощность, Вт/см³;
 τ – продолжительность воздействия, с;
 D, d – диаметр, м;
 s – шаг витка, м;
 G – масса сырья, кг;
 n – частота вращения, об/мин.

К разделу 5

$Z_б, Z_n$ – приведенные затраты на единицу продукции соответственно по базовому и проектному варианту;
 Q_T – годовой объем перерабатываемого сырья на агропредприятии;
 A – амортизационные отчисления, руб;
 Z_{OT} – затраты на оплату труда оператора воскотопки;
 $Z_{эл.э}$ – годовые затраты на электроэнергию;
 Z_A – затраты на амортизационные отчисления;
 $Z_{ТР}$ – затраты на текущий ремонт;
 $Z_{ПР}$ – прочие расходы;
 $Z_{ОХ}$ – затраты на общехозяйственные и общепроизводственные нужды;
 U_p – уровень рентабельности.

Сокращения

ЭМП – электромагнитное поле;
 ЭМПСВЧ – электромагнитное поле сверхвысокой частоты;
 ЭП – электрическое поле;
 ЭД – электродинамические параметры;
 СВЧ – сверхвысокая частота.
 ОМЧ – общее микробное число, КОЕ/г;
 УЭЗ – удельные энергетические затраты, Вт·ч/кг.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрегат для вытопки воска / В. Ф. Некрашевич, Н. Б. Нагаев, Т. В. Торженева, Д. А. Епифанцев, М. В. Урляпов // Пчеловодство. – 2015. – № 2. – С. 58–59.
2. Азаров, Б. М. Технологическое оборудование пищевых производств / Б. М. Азаров и др. Под ред. Б. М. Азарова. – М. : Агропромиздат, 1988. – 463 с.
3. Анализ рынка воска пчелиного в России / Аналитический отчет DISCOVERY RESEARCH GROUP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/8362.pdf (дата обращения 25.04.2025).
4. Барсуков, С. Н. Теория электромагнитного поля. Объемные резонаторы и замедляющие структуры / С. Н. Барсуков. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 54 с.
5. Баскаков, С. И. Электродинамика и распространение радиоволн : учебное пособие для студентов радиотехнических специальностей вузов / С. И. Баскаков. – Москва, «Либриком», 2011. – 416 с.
6. Башилов, А. М. Электроимпульсные технологии в сельском хозяйстве / А. М. Башилов, В. Н. Топорков, В. А. Королев // Вестник аграрной науки Дона. – 2019. – № 2(46). – С. 50–55.
7. Белов, А. А. Безопасная эксплуатация сверхвысококачественной техники / А. А. Белов, О. В. Михайлова // Инновации в сельском хозяйстве. – 2016. – № 4 (19). – С. 335–338.
8. Белобаба, И. Н. Концентрация электромагнитного поля с помощью открытого зеркального резонатора : дисс. ... кандидата технических наук : 05.12.07 / Ирина Николаевна Белобаба. Моск. энергетич. ин-т. – Москва, 2000. – 116 с.
9. Белова, М. В. Разработка сверхвысококачественных установок для термообработки сельскохозяйственного сырья : автореферат диссертации ... доктора технических наук : 05.20.02 / Белова Марьяна Валентиновна; [Место защиты: Всерос. науч.-исслед. ин-т электрификации сельс. хоз-ва]. – М., 2016. – 16 с.

10. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 9-е изд., перераб. и доп. / Л. А. Бессонов. М. : «Высшая школа», 1996. – 638 с.

11. Бородин, И. Ф. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве / И. Ф. Бородин, Г. А. Шарков, А. Д. Горин // Обзорная информация / Госагропром СССР; Всесоюзная ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени академия сельскохозяйственных наук им. В. И. Ленина; Всесоюзный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований агропромышленного комплекса (ВНИИТЭИ агропром). – М., 1987. – Сер. Механизация и электрификация сельского хозяйства.

12. Будников, Д. А. Научные основы проектирования переносной СВЧ-конвективной установки для сушки зерна при хранении насыпью / Д. А. Будников, А. Н. Васильев, А. А. Шарко // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2023. – Т. 70. № 1(50). – С. 10–17.

13. Бышов, Д. Н. Повышение эффективности очистки воскового сырья с применением специальной механизированной технологии / Д. Н. Бышов, Д. Е. Каширин, В. В. Павлов // Вклад университетской аграрной науки в инновационное развитие агропромышленного комплекса. – 2019. – С. 318–321.

14. Вендин, С. В. К расчету напряженностей электромагнитного поля при СВЧ обработке диэлектрических плоскостойких объектов / С. В. Вендин, П. А. Трубаев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2013. – № 6. – С. 215–218.

15. Вендин, С. В. К решению задачи взаимодействия электромагнитной волны с многослойным сферическим диэлектрическим объектом / С. В. Вендин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2013. – № 5. – С. 216–220.

16. Воздействие электромагнитных и магнитных полей на жизнеспособность биологических объектов / Н. В. Цугленок, А. В. Азанова, Е. Ю. Сергеева [и др.]. – Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2014. – 96 с. – ISBN 978-5-94617-337-7.

17. Гинзбург, А. С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности / А. С. Гинзбург. – М. : Агропромиздат, 1985. – 335 с.
18. ГОСТ 19792-2017 Мёд натуральный. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2017. – 16 с.
19. ГОСТ 21179-2000 Воск пчелиный. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2011. – 18 с.
20. ГОСТ 25629-2014 Пчеловодство. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2015. – 15 с.
21. Гордеев, А. С. Использование магнитных параметров в сельском хозяйстве / А. С. Гордеев, Р. С. Сингатулин, Б. С. Мишин // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Том I. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. – С. 322–328.
22. Дмитриев, Е. Е. Основы моделирования в Microwave Office 2009 / Е. Е. Дмитриев. – 2011. – 175 с.
23. Дмитриев, Е. Е. Проектирование фильтров в Microwave Office с помощью iFilter / Е. Е. Дмитриев. – 2010. – 52 с.
24. Дунаева, Т. Ю. Переработка забруса в микроволновой печи / Т. Ю. Дунаева, А. Н. Фокин // Пчеловодство. – 2011. – № 8. – С. 54–56.
25. Евсеев, Е. А. Анализ устройств для растапливания пчелиного воска / Е. А. Евсеев, Д. В. Верховцев // Электрооборудование и электротехнологии в сельском хозяйстве. Самарский государственный аграрный университет. – Кинель, – 2020. – С. 3–6.
26. Евсеев, Е. А. Анализ устройств для растапливания пчелиного воска / Е. А. Евсеев, А. В. Исаев // Электрооборудование и электротехнологии в сельском хозяйстве. Сборник научных трудов по материалам IV Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 172–175.
27. Евсеев, Е. А. Обоснование конструктивно-технологической схемы экспериментальной паровой воскотопки / Е. А. Евсеев, С. В. Тесленко, В. А. Сыркин

// Электрооборудование и электротехнологии в сельском хозяйстве. Самарский государственный аграрный университет. – Кинель, – 2020. – С. 6–9.

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

29. Журавлев, А. В. К вопросу очистки рамок от воскового сырья центробежными силами / А. В. Журавлев, С. А. Сутягин, В. И. Курдюмов // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2015. – № 4 (28). – С. 83–85.

30. Игнатов, Г. В. Использование отходов пчеловодства в рационах цыплят-бройлеров : автореферат диссертации ... кандидата сельскохозяйственных наук : 06.02.02 / Игнатов Геннадий Владимирович. – Барнаул, 2002. – 23 с.

31. Интерференция волн [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://physics.spbstu.ru/userfiles/files/chapter2_electro_magneto_waves__less.pdf (дата обращения 11.08.2023).

32. Иойриш, Н. П. Продукты пчеловодства и их использование / Н. П. Иойриш. – М. : Россельхозиздат, 1976. – 175 с.

33. Исследование динамической вязкости расплавленного пчелиного воска / Н. Е. Лузгин, В. В. Утолин, В. В. Коченов, С. В. Чекайкин // Инновационная техника и технология. – 2018. – № 2 (15). – С. 33–37.

34. Исследование процесса вытопки воска / В. Ф. Некрашевич и др. // Пчеловодство. – 2014. – № 3. – С. 50–51.

35. Исследование процесса получения воска из воскового сырья различного качества / Н. В. Бышов, Д. Н. Бышов, Д. Е. Каширин, И. А. Успенский, В. В. Павлов // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – № 6. – 2015. – С. 145–149.

36. Исследование теплофизических и реологических свойств воскового сырья и воска / В. Ф. Некрашевич, Н. Е. Лузгин, Н. Б. Нагаев, Н. А. Грунин,

М. В. Урляпов, А. И. Ушаков, В. Н. Водяков // Исследования молодых ученых – аграрному производству. Материалы онлайн-конференции, посвященной Дню российской науки. Ассоциация аграрных вузов ЦФО. – 2015. – С. 102–110.

37. Исследование эффективности очистки воскового сырья в воде при интенсивном механическом перемешивании / Д. Н. Бышов, Д. Е. Каширин, В. В. Павлов, М. Б. Угланов, Б. А. Нефедов, В. А. Макаров, С. Д. Полищук // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – № 12. – 2017. – С. 115–122.

38. Кашковский, В. Г. Технология ухода за пчелами [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://apiary.su/knigi-i-stati-po-pchelovodstvu/tehnologiya-uhoda-za-pchyolami-v-g-kashkov/11/> (дата обращения 12.08.2023).

39. К вопросу прессования воскового сырья в процессе вытопки / В. Д. Хмыров, Т. В. Гребенникова, П. Ю. Хатунцев, А. Н. Тимофеев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2015. – № 4 (28). – С. 102–106.

40. Каганов, В. И. Полуоткрытый объемный СВЧ резонатор / В. И. Каганов // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2015. – № 1 (6). – С. 154–163.

41. Каширин, Д. Е. Исследование некоторых прочностных характеристик восковой основы пчелиных сотов / Д. Е. Каширин, А. В. Куприянов // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – № 8. – 2011. – С. 199–202.

42. Киреев, Ю. В. Технология переработки воска с применением энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона / Ю. В. Киреев, А. Ю. Киреев, Г. Г. Гнатенко // Исследовано в России. – Т. 7. – 2004. – С. 1109–1115.

43. Княжеская, Г. С. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / Г. С. Княжеская, М. Г. Фирсова, Р. Ш. Килькеев; Под ред. А. Н. Шамова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1989. – 64 с.

44. Козлов, В. Г. Поведение вязкой жидкости в частично заполненном горизонтальном вращающемся цилиндре // В. Г. Козлов, А. В. Чиграков // Конвективные течения. – № 2. – 2005. – С. 137–151.

45. Колеватов, С. К. Вытопка воска / С. К. Колеватов // Пчеловодство. – 2010. – № 1. – С. 45.
46. Колеватов, С. К. Вытопка воска / С. К. Колеватов, А. Э. Берзин // Пчеловодство. – 2010. – № 2. – С. 36.
47. Корниенко, Е. В. Органолептические и физико-химические показатели меда Омской области / Е. В. Корниенко, М. В. Заболотных, И. Н. Каликин // Вестник Омского государственного аграрного университета. – № 4 (28). – 2017. – С. 152–157.
48. Корчагин, Ю. В. Патент № 2161505. А 61L2/00. Способ стерилизации материалов при помощи СВЧ-излучения с высокой напряженностью поля и устройство для реализации способа. № 99114320/13: заявл. 06.07.1999: опубл. 10.01.2001.
49. Крутоголов, В. Д. Солнечная воскотопка / В. Д. Крутоголов // Пчеловодство. – 2014. – № 9. – С. 40–41.
50. Крутоголов, В. Д. Холодный отжим забруса / В. Д. Крутоголов // Пчеловодство. – 2017. – № 4. – С. 36–37.
51. Кубасов, В. А. Влияние гуминовых веществ и пасечной мервы на биофизические и биохимические свойства яиц кур кросса «Supernick» / В. А. Кубасов // Наука и современность. – 2011. – № 12–1. – С. 38–40.
52. Кудряков, Е. В. Классификация устройств для растапливания пчелиного воска / Е. В. Кудряков, Д. А. Яковлев, В. А. Сыркин // Электрооборудование и электротехнологии в сельском хозяйстве Сборник научных трудов по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. – 2017. – С. 125–129.
53. Кудряков, Е. В. Разработка экспериментальной модели индукционной воскотопки / Е. В. Кудряков, Т. С. Гриднева // В сборнике: Вклад молодых ученых в аграрную науку Материалы Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 454–457.
54. Кудряков, Е. В. Расчет параметров нагревательного провода индукционной воскотопки / Е. В. Кудряков, М. В. Чекрыгин // Материалы 63-й студенче-

ской научно-практической конференции инженерного факультета ФГБОУ ВО «Самарская ГСХА». – 2018. – С. 135–138.

55. Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Сеницын. – Мн. : Бестпринт, 2004. – 357 с.

56. Куторкина, Н. А. Установка для сушки шерсти в электромагнитном поле сверхвысокой частоты / Н. А. Куторкина, Т. Н. Лаврентьева // Вестник НГИЭИ. – 2015. – № 2 (45). – С. 36–38.

57. Лебедев, И. В. Техника и приборы СВЧ / И. В. Лебедев. – М. : Высшая школа, 1970. – 440 с.

58. Лыков, А. В. Тепломассобмен. Справочник. 2-е изд. / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.

59. Максимов Е. Г. СВЧ-установка для вытопки пасечного воска / Е. Г. Максимов, Е. Ю. Сергеева // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2013. – № 4–2 (80). – С. 116–119.

60. Максимов, Н. М. Перспективная технология переработки воскового сырья на пасеках с использованием парогенератора / Н. М. Максимов, В. В. Морозов // Традиции и инновации в развитии АПК. – 2019. – С. 493–499.

61. Максимов, Н. М. Результаты многофакторного исследования выработки пара в парогенераторе при перетопке воска на пасеках / Н. М. Максимов, В. В. Морозов // Вестник Курганской ГСХА. – № 1 (29). – 2019. – С. 77–80.

62. Максимов, Н. М. Совершенствование технологии переработки воскового сырья на пасеках с использованием парогенератора / Н. М. Максимов // Международный молодежный аграрный форум «Аграрная наука в инновационном развитии АПК». – 2018. – С. 148–151.

63. Микроволновая установка для разогрева и роспуска закристаллизованного мёда и других материалов УРМ-4 / Материалы официального сайта ВНИИРАЭ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rirae.ru/index.php/deyatelnost/nashi-razrabotki/504-mikrovolnovaya-ustanovka-dlya-razogreva-i-rospuska-zakristallizovannogo-mjoda-i-drugikh-materialov-urm-4> (дата обращения 02.09.2023).

64. Моделирование и результаты предпосевной СВЧ и конвективно-тепловой обработки семян / А. А. Васильев, А. Н. Васильев, Д. А. Будников, А. А. Шарко // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – Т. 67, № 4 (41). – С. 35–43. – DOI 10.22314/2658-4859-2020-67-4-35-43.

65. Морозов, В. В. Парогенератор для вытопки воска на пасеке / В. В. Морозов, Н. М. Максимов // Пчеловодство. – 2019. – № 6. – С. 46–48.

66. Нагаев, Н. Б. Анализ эффективности очистки рамок с восковым сырьем центробежными силами / Н. Б. Нагаев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2017. – № 2 (34). – С. 75–79.

67. Нагаев, Н. Б. Влияние времени разваривания и восковитости воскового сырья на выход воска в процессе вытопки на центробежном агрегате / Н. Б. Нагаев, П. Э. Бочков // Инновационное развитие современного агропромышленного комплекса России. Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева. – 2016. – С. 148–151.

68. Нагаев, Н. Б. Обоснование параметров центробежного агрегата для вытопки воска ЦАВВ 20/25 / Н. Б. Нагаев, К. Е. Гобелев // Техничко-экономические и гуманитарные аспекты развития Рязанской области. – 2016. – С. 77–84.

69. Нагаев, Н. Б. Совершенствование процесса вытопки воска с обоснованием параметров центробежного агрегата : диссертация ... кандидата технических наук : 05.20.01 / Нагаев Николай Борисович. – Рязань : Рязанский гос. агротехнолог. ун-т им. П. А. Костычева, 2016. – 247 с.

70. Некрашевич, В. Ф. Агрегат для вытопки воска / В. Ф. Некрашевич, Н. Е. Лузгин, Н. Б. Нагаев // Научные приоритеты в АПК: инновационные достижения, проблемы, перспективы развития. – 2013. – С. 554–557.

71. Некрашевич, В. Ф. Инновационные технологии и агрегаты для вытопки воска / В. Ф. Некрашевич, Н. Б. Нагаев // Проблемы и перспективы инновационного развития агротехнологии. – ФГБОУ ВО «Белгородский ГАУ». – 2015. – С. 54–55.

72. Некрашевич, В. Ф. Исследование адгезионных и пластических свойств воска / В. Ф. Некрашевич, Н. Б. Нагаев, Н. А. Грунин // Актуальные проблемы агроинженерии и их инновационные решения. – Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева, Инженерный факультет. – 2013. – С. 54–57.

73. Некрашевич, В. Ф. Исследования процесса вытопки воска / В. Ф. Некрашевич, А. А. Рогов // Интенсивные технологии производства продуктов пчеловодства, их переработка и применение. – Рыбное. – 2007. – С. 79–81.

74. Некрашевич, В. Ф. Механизация пчеловодства // В. Ф. Некрашевич, Ю. Н. Кирьянов. – Рязань, 2005. – 291 с.

75. Нетреб, А. А. Влияние электромагнитного поля на извлечение воска и воскоподобных веществ из подсолнечного масла и аппаратное оформление процесса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://apparatus.ru/images/pastit.-maslo.pdf> (дата обращения 18.08.23).

76. Нефедов, Е. И. Открытые коаксиальные резонансные структуры / Е. И. Нефедов. – М. : Наука, 1982. – 220 с.

77. Обоснование параметров СВЧ установки для вытопки пасечного воска / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, В. Ф. Сторчевой, О. В. Михайлова, Г. В. Новикова // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 3 (18). – С. 112–120.

78. Обоснование собственной добротности резонаторов СВЧ-установок для вытопки пасечного воска / А. В. Шевелев, О. В. Михайлова, Г. В. Новикова, М. В. Просвирякова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 8 (190). – С. 124–130.

79. Овсянников, Д. А. Технико-экономическое обоснование применения электропривода центрифуги для откачки меда с рациональным режимом работы / Д. А. Овсянников, Н. Г. Хорошунов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 65. – С. 88–98.

80. Определение теплофизических характеристик воскового сырья / В. Ф. Некрашевич, Н. Б. Нагаев, Р. А. Мамонов, Н. Е. Лузгин, Н. А. Грунин, М. В. Урляпов // Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства. – Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева. – 2014. – С. 137–142.

81. Оптимизация конструктивно-технологических режимов работы СВЧ-воскотопки / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. // Аграрная наука. – 2022. – Т. 364. – № (11). – С. 88–93.

82. Оптимизация технологических параметров и режимов работы СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами / А. В. Шевелев, О. В. Михайлова, М. В. Просвирякова, В. В. Коновалов // Вестник НГИЭИ. – 2025. – № 5 (168). – С. 53–67. – DOI 10.24412/2227-9407-2025-5-53-67. – EDN CNQKFE.

83. Особенности разработки установок с СВЧ-энергоподводом для переработки сырья агропредприятий / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 12 (139). – С. 54–65.

84. Патент № 2728659 РФ. Двухмодульная СВЧ установка для термообработки пчелиного воскового сырья / Шевелев А. В., Новикова Г. В., Белова М. В., Михайлова О. В., Коробков А. Н. – Заявка № 2020107762 от 19.02.2020, опубл. 30.07.2020, – Бюл. № 22. – 11 с.

85. Патент № 2737142 РФ. СВЧ установка для отделения меда от вытапливаемого воскового сырья в резонаторах непрерывного действия / Шевелев А. В., Новикова Г. В., Просвирякова М. В., Михайлова О. В., Казаков А. В. – Заявка № 2020108477 от 26.02.2020, опубл. 25.11.2020, – Бюл. № 33. – 9 с.

86. Патент № 2740095 РФ. СВЧ-установка с взаимосвязанными цилиндрическими резонаторами для термообработки воскового сырья в непрерывном режиме / Шевелев А. В., Новикова Г. В., Сторчевой В. Ф., Михайлова О. В., Просвирякова М. В. – Заявка № 2020108478 от 26.02.2020, опубл. 11.01.2021. – Бюл. № 2. – 9 с.

87. Патент № 2770496 РФ. Установка СВЧ непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами для вытопки пасечного воска с отделением меда / Шевелев А. В., Новикова Г. В., Просвирякова М. В., Михайлова О. В., Сторчевой В. Ф., Жужин М. С., Кондраненкова Т. Е. – Заявка № 2021127581 от 21.09.2021, опубл. 18.04.2022. – Бюл. № 11.

88. Патент RU 2039461 С1, МПК А23L1/25 Н05В6/64 СВЧ-установка для разжижения вязких продуктов / Жилков В. С., Сапрыкин И. И., Петьков Г. М., Погарский С. А., Шаулов Е. А. – Заявка № 5030138/13 от 02.03.1992. Опубл. 20.07.1995.

89. Патент RU 2421109 С1, МПК А23L3/26, А01К59/00 Способ роспуска закристаллизовавшегося меда и устройство для его осуществления / Зейналов А. А., Тихонов В. Н., Четокин А. М. Заявка № 2009140680/13, 2009.11.06. Опубликовано: 2011.06.20. Бюл. № 17. – 8 с.

90. Патент RU 48698U1, 7 А01К59/04 Устройство для роспуска закристаллизовавшегося меда / Зейналов А. А., Тихонов В. Н., Новосельский В. Н. Заявка 2005117486/22, 08.06.2005. Опубл. 10.11.2005. Бюл. № 31. – 2 с.

91. Патент 2803541 Российская Федерация, МПК С11В 11/00. СВЧ воскотопка непрерывно-поточного действия с тороидальным резонатором / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. ; Заявитель и патентообладатель НГИЭУ. – № 2023104153 заявл. 22.02.2023, опубл. 14.09.2023. Бюл. № 26. – 16 с.

92. Патент на изобретение RU 2528960 С1, 20.09.2014. Агрегат для вытопки воска / Некрашевич В. Ф., Нагаев Н. Б., Торженева Т. В., Липин В. Д. Заявка № 2013112090/13 от 18.03.2013.

93. Патент на изобретение RU 2529701 С1, 27.09.2014. СВЧ-установка для вытопки пасечного воска / Максимов Е. Г., Новикова Г. В., Белова М. В., Сергеева Е. Ю. Заявка № 2013120582/13 от 06.05.2013.

94. Патент на изобретение RU 2223642 С1. Воскотопка электрическая инфракрасная / Лужков Ю. М., Крылов В. С., Крылов С. В. 20.02.2004. Заявка № 2002114084/12 от 31.05.2002. Опубл. 20.02.2004.

95. Патент на изобретение RU 2789490 РФ, МПК C11B11. Способ вытопки воска с отделением меда / Шевелев А. В., Просвирякова М. В., Михайлова О. В., Новикова Г. В., Сторчевой В. Ф., Зайцев С. П. / Патентообладатель НГИЭУ (RU). Заявка № 2022111579 от 28.04.2022. Бюл. № 4 от 03.02.2023.

96. Патент на полезную модель RU 165586 U1, 27.10.2016. Агрегат для вытопки воска / Некрашевич В. Ф., Нагаев Н. Б., Гравова А. И., Епифанцев Д. А., Грунин Н. А., Голиков А. А. Заявка № 2016105327/13 от 26.05.2016.

97. Патент на полезную модель RU 177683, 06.03.2018. Индукционная воскотопка / Сыркин В. А., Васильев С. И., Котов Д. Н., Кудряков Е. В., Крючин П. В., Тарасов С. Н. Заявка № 2017125571 от 17.07.2017.

98. Патент на полезную модель RU 188608, 17.04.2019. Парогенератор для вытопки воска / Морозов В. В., Максимов Н. М. Заявка № 2018106374 от 20.02.2018.

99. Патент на полезную модель RU 2528960 C1. Агрегат для вытопки воска / Некрашевич В. Ф., Нагаев Н. Б., Торженева Т. В., Липин В. Д. Заявка № 2013112090/13 от 18.03.2018.

100. Патент № 2012 137 545. Способ нагрева различных объектов энергией пространственных сред : заявл. 03.09.2012 : опубл. 10.03.2014 / Н. В. Цугленок; заявитель Цугленок Николай Васильевич.

101. Патент на полезную модель RU 75538 U1, 20.08.2008. Агрегат для вытопки воска / Некрашевич В. Ф., Рогов А. А. Заявка № 2008111095/22 от 24.03.2008.

102. Патент на полезную модель RU 81041 U1, 07.10.2008 Центрифуга-воскотопка / Симоганов Н. А. Заявка № 2008139528/22 от 07.10.2008.

103. Пахомов, В. И. Анализ влияния СВЧ-обработки высушенной биомассы насекомых *hermetia illucens* на процесс отжима жира / В. И. Пахомов, Д. В. Рудой, Т. А. Мальцева // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2021. – № 174. – С. 321–333.

104. Передвижная солнечная воскотопка / И. Я. Шахтамиров, В. К. Пестис, Н. В. Халько, Х. М. Мутиева, М. О. Байтаев, Т. Т. Тарчоков // Вестник Чеченского государственного университета. – 2017. – № 2 (26). – С. 37–39.

105. Передвижная солнечная воскотопка / С. Н. Ладутко, В. К. Пестис, И. Я. Шахтамиров, Н. В. Халько // В сборнике: Современные проблемы пчеловодства. I международная научно-практическая конференция по пчеловодству в Чеченской Республике. – 2017. – С. 149–151.

106. Персональный сайт Валерия Коржа / Воскотопка высокотемпературная ВВТ-1П [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mirpchel.com.ua/moi-razrabotki/voskotopka-melissa/15-voskotopka-vysokotemperaturnaya-vvt-1p> (дата обращения 12.02.2023).

107. Повышение эффективности пчеловодства с использованием инновационных технологий (на примере получения перги) : Монография / А. Г. Чепик, В. Ф. Некрашевич, Р. А. Мамонов и др. – Рязань, 2014. – 239 с.

108. Попов, В. М. Теоретическое обоснование конструктивных параметров инфракрасной установки для сушки семян овощных культур с целью энергосбережения / В. М. Попов, В. А. Афонькина, А. И. Баранова // АПК России. – 2017. – Т. 24. № 2. – С. 503–507.

109. Проект стратегии развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://barley-malt.ru/wp-content/uploads/2019/11/proekt-strategyu-razvytyja-pyschevoj-y-pererabatyvajuschej-promyshlennosty-rf.pdf> (дата обращения 11.10.2022).

110. Производство мёда / Государственная статистика. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fedstat.ru/indicator/31363> (дата обращения 02.04.2025).

111. Пюшнер, Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот: пер. с англ. / Г. Пюшнер. – М. : Энергия, 1968. – 312 с.

112. Пчелиный воск: мировое производство и потребление / Материалы сайта «Мир пчеловодства» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.apeworld.ru/1520007924.html> (дата обращения 13.04.2025).

113. Пчеловодство в Нижегородской области / Материалы сайта «Улей – сайт о пчелах и пчеловодстве» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ylejbees.com/index.php/pchelovodstvo-v-mire/1323-pchelovodstvo-v-nizhegorodskoj-oblasti> (дата обращения 27.03.2024).

114. Пчеловодство. Оборудование и инвентарь / Материалы сайта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.beetools.ru/stati/vox.php> (дата обращения 22.01.2023).

115. Пчельников, Ю. Н. Электроника сверхвысоких частот / Ю. Н. Пчельников, В. Т. Свиридов. – М. : Радио и связь, 1981. – 96 с.

116. Разевиг, В. Д. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office / В. Д. Разевиг, Ю. В. Потапов, А. А. Курушин. – М. : СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.

117. Реестр пчеловодов Нижегородской области / Министерство сельского хозяйства и продовольственных ресурсов Нижегородской области. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mcx-nnov.ru/deiatelnost_MCX/zhivotnovodstvo/zhivotnovodstvo.php (дата обращения 29.03.2025).

118. Результаты изучения свойств пчелиного воска / Н. Е. Лузгин, В. В. Утолин, Н. Б. Нагаев, Е. С. Лузгина, Н. А. Грунин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2017. – № 1 (33). – С. 80–85.

119. Рогов, А. А. Технология и агрегат для вытопки воска из пчелиных сотов : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. А. Рогов. – Рязановский ГАУ. Рязань, – 2009.

120. Рожков, К. А. Оптимизация кормового режима пчелы медоносной (*Apis mellifera L.*) в условиях умеренно холодного климата : автореферат диссертации ... кандидата сельскохозяйственных наук : 06.02.02 / Рожков Констан-

тин Александрович; [Место защиты: Новгород. гос. ун-т им. Ярослава Мудрого]. – Великий Новгород, 2009. – 21 с.

121. СВЧ-установка для вытопки пчелиного воска / А. В. Шевелев, Г. В. Новикова, О. В. Михайлова, М. В. Белова // Вестник НГИЭИ. – 2020. – № 5 (108). – С. 16–28.

122. СВЧ-установка для термообработки воскового сырья / А. В. Шевелев, О. В. Михайлова, Г. В. Новикова, Р. А. Храмов // Актуальные направления развития техники и технологий в России и за рубежом – реалии, возможности, перспективы. – Княгинино, 26 марта 2020 г. – Том II. – С. 94–97.

123. СВЧ установки для термообработки воскового сырья в непрерывном режиме / А. В. Шевелев, О. В. Михайлова, Г. В. Новикова, М. В. Просвирякова, П. В. Зайцев, Д. Е. Дулепов // Перспективы развития аграрных наук. – Чебоксары, 10 апреля 2020 года. – 2020. – С. 191–192.

124. Сергеева, Е. Ю. Технология вытопки пасечного воска эндогенным нагревом / Е. Ю. Сергеева, Е. Г. Максимов, А. А. Белов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2013. – № 2 (78). – С. 130–133.

125. Стерилизатор воска / Сайт BIZORG [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bizorg.su/inventory-dlya-pchelovodstva-r/p7115337-sterilizator-voska>

126. Стребков, Д. С. Резонансные методы передачи электрической энергии / Д. С. Стребков, А. И. Некрасов. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 304 с.

127. Стрекалов, А. В. Электромагнитные поля и волны / А. В. Стрекалов, Ю. А. Стрекалов. – М. : РИОР: ИНФРА-М, 2014. – 375 с.

128. Сыркин, В. А. Обоснование параметров нагревательного контура индукционной воскотопки / В. А. Сыркин, Е. В. Кудряков, Д. Х. Сабилов // В сборнике: Вклад молодых ученых в аграрную науку. Материалы Международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 267–269.

129. Сыркин, В. А. Расчет мощности индукционной воскотопки / В. А. Сыркин, Е. В. Кудряков, В. С. Понисько // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России. – 2018. – С. 167–170.

130. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. акад. К. И. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – 1008 с.

131. Тареев, Б. М. Физика диэлектрических материалов / Б. М. Тареев. – М. : Энергоиздат, 1982. – 320 с.

132. Темнов, В. А. Переработка воскового сырья на пасеке / Материалы сайта «Пасека выходного дня» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://apiary.su/knigi-i-stati-po-pchelovodstvu/pererabotka-voskovogo-syrya-na-pasek/> (дата обращения 17.06.23).

133. Теоретические основы электротехники. В 3 ч. Ч. 2–3. Нелинейные цепи. Электромагнитное поле / Г. И. Атабеков, С. Д. Купалян, А. Б. Тимофеев, С. С. Хухриков. Под ред. Г. И. Атабекова. – М.–Л., Изд-во «Энергия», 1966. – 280 с.

134. Теоретическое обоснование электродинамических параметров СВЧ-установки с полусферическими резонаторами для вытопки воска / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, В. Ф. Сторчевой, О. В. Михайлова, Г. В. Новикова // Вестник НГИЭИ. – 2021. – № 10 (125). – С. 46–56.

135. Технология производства и переработки продукции пчеловодства [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pandia.ru/text/78/654/21729-9.php> (дата обращения 19.06.23).

136. Тихонов, В. Н. СВЧ-установка для распуска меда / В. Н. Тихонов, А. Н. Алёшин, И. А. Иванов, А. В. Тихонов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – № 6 (20). – 2017. – С. 52–58.

137. Филиппов, Р. Л. Интенсификация технологических процессов переработки продуктов пчеловодства электромагнитной энергией. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Харьков, 1990. 498 с.

138. Химический состав и свойства воска и воскового сырья / Материалы сайта Paseka.su [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://paseka.su/books/item/f00/s00/z0000024/st008.shtml> (дата обращения 23.12.2022).

139. Цебро, Н. А. Паровая воскотопка / Н. А. Цебро // Пчеловодство. – 2017. – № 5. – С. 34–35.

140. Чесунов, В. М. Оптимизация процессов сушки в легкой промышленности / В. М. Чесунов, А. А. Захарова. – М. : Легпромбытиздат, 1985. – 112 с.

141. Шевелев, А. В. Обеспечение электромагнитной безопасности проектируемой СВЧ-воскотопки / А. В. Шевелев // Социально-экономические проблемы развития муниципальных образований : материалы и доклады Международной научно-практической конференции, Княгинино, 27 сентября – 02 ноября 2021 года. Том 2. – Княгинино: НГИЭУ, 2021. – С. 168–170.

142. Шевелев, А. В. Определение эффективных режимов работы СВЧ воскотопки / А. В. Шевелев // Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия. – Москва, РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева, 16 декабря 2020 г. – 2020. – С. 725–728.

143. Шевелев, А. В. Обоснование рационального режима работы СВЧ-воскотопки / А. В. Шевелев // Вестник НГИЭИ. – 2023. – № 3 (142). – С. 17–25.

144. Шевелев, А. В. Исследование динамики нагрева воскового сырья в электромагнитном поле СВЧ / А. В. Шевелев, М. С. Жужин, Е. А. Сбитнев // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 6 (133). – С. 32–43.

145. Шевелев А. В. Согласование электродинамических параметров с объемом резонатора СВЧ-воскотопки / А. В. Шевелев // Вестник НГИЭИ. – 2024. – № 5 (156). – С. 70–81.

146. Электротехнологии в сельскохозяйственном производстве. Научные труды. Том 73. – М. : ВИЭСХ. 1989. – 124 с.

147. Экономическая оценка проектных решений в агроинженерии : учебник / В. Т. Водяников, Н. А. Серeda, О. Н. Кухарев [и др.]; под ред. В. Т. Водяниклова. – С.-Петербург : Лань, 2019. – 436 с.

148. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов : Справочник / И. А. Рогов, В. Я. Адаменко, С. В. Некрутман и др. Под ред. И. А. Рогова. – М. : Лег. и пищ. пром-сть, 1981. – 286 с.

149. Электропроводность медов / Исследования проб медов разного ботанического происхождения, представленных на специализированной ярмарке по пчеловодству [Электронный ресурс]. – Режим доступа: beejournal.ruМед>Электропроводность меда (дата обращения 23.12.2022).

150. Яворский, Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука. 1985. – 552 с.

151. A novel algorithm approach for rapid simulated microwave heating of food moving on a conveyor belt (Новый подход к алгоритму для быстрого моделирования микроволнового нагрева пищевых продуктов, движущихся по конвейерной ленте) / J. Zhou, X. Yang, Yu. Chu, X. Li, J. Yuan // *Journal of Food Engineering*. – 2020. – V. 282. – 110029. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110029>

152. Analysis of electric field distribution within a microwave assisted thermal sterilization (MATS) system by computer simulation (Анализ распределения электрического поля в системе тепловой стерилизации с помощью микроволновой печи (MATS) с помощью компьютерного моделирования) / D. Luan, J. Tang, P. D. Pedrow, F. Liu, Zh. Tang // *Journal of Food Engineering*. – 2016. – V. 188. – P. 87–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.009>

153. CST MICROWAVE STUDIO – система моделирования СВЧ трехмерных структур / Материалы сайта «Eurointech» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-MICROWAVE-STUDIO.phtml (дата обращения 10.12.2023).

154. Effect of changes in microwave frequency on heating patterns of foods in a microwave assisted thermal sterilization system (Влияние изменений частоты микроволн на режимы нагрева пищевых продуктов в системе термической стерилизации с использованием микроволновой печи) / F. P. Jr. Resurreccion, D. Luan, J. Tang, F. Liu, Z. Tang, P. D. Pedrow, R. Cavalieri // *Journal of Food Engineering*. – 2015. – V. 150. – P. 99–105. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.10.002>

155. Fundamentals and applications of microwave heating to chemicals separation processes (Основы и применение микроволнового нагрева в процессах разделения химических веществ) / H. Li, Zh. Zhao, Ch. Xiouras, G. D. Stefanidis, X. Li, X. Gao // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – V. 114. – 109316. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109316>

156. Gemechis Legesse Yadeta. Beeswax Production and Marketing in Ethiopia: Challenges in Value Chain (Производство и сбыт пчелиного воска в Эфиопии: проблемы в цепочке создания стоимости) // *Agriculture, Forestry and Fisheries*. – V. 3. – № 6. – 2014. – P. 447–451. doi: 10.11648/j.aff.20140306.12.

157. Gunasekaran, S. Effect of experimental parameters on temperature distribution during continuous and pulsed microwave heating (Влияние экспериментальных параметров на распределение температуры при непрерывном и импульсном микроволновом нагреве) / S. Gunasekaran, H. Yang // *Journal of Food Engineering*. – 2007. – V. 78 (4). – P. 1452–1456. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.01.017.

158. How strong is the electrical field inside a microwave oven? (Насколько сильным является электрическое поле внутри микроволновой печи?) / *Electrical Engineering* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://electronics.stackexchange.com/questions/339481/how-strong-is-the-electrical-field-inside-a-microwave-oven>

159. Increasing the efficiency of the operation of the facilities for the thermal processing of raw materials by exposure to electromagnetic radiation (Повышение эффективности работы установок для термической обработки сырья путем воздействия электромагнитного излучения) / D. Lukina, V. Belov, O. Lukina, A. Volkov, A. Mayorov, I. Smirnova // *Key engineering materials*. – 2018. – V. 781. – P. 185–189. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.781.185>

160. Justification of structural and technological parameters of microwave installations for heat treatment of wax raw materials (Обоснование конструктивных и технологических параметров СВЧ-установок для термообработки воскового сырья) / A. Shevelev, G. Novikova, O. Mikhailova, M. Prosviryakova, D. Dulepov, P. Zaitsev // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Сер. «Inter-

national AgroScience Conference, AgroScience 2020». – 2020. – С. 012008. doi:10.1088/1755-1315/604/1/012008

161. Mohammad, R. H. Analysis of microwave heating for cylindrical shaped objects (Анализ микроволнового нагрева объектов цилиндрической формы) / R. H. Mohammad, B. DoYoung, D. Prashanta // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – V. 53 (23–24) – P. 5129–5138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.051>

162. Non-thermal effects of microwave and ohmic processing on microbial and enzyme inactivation: a critical review (Нетепловое воздействие микроволновой и омической обработки на инактивацию микробов и ферментов:) / Mirian T. K. Kubo, Érica S. Siguemoto, Eduardo S. Funcia, Pedro E.D. Augusto, Sébastien Curet, Lionel Boillereaux, and Sudhir K Sastry, Jorge A.W. Gut // Current Opinion in Food Science. – 2020. – V. 35. – P. 36–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.01.004>

163. Buchwald, R. The thermal properties of beeswaxes: unexpected findings (Термические свойства пчелиного воска: неожиданные открытия) / R. Buchwald, M. D. Breed, A. R. Greenberg // Journal of Experimental Biology. – 2008. – № 211. – P. 121–127. doi: 10.1242/jeb.007583.

164. Winkler-Moser, J. et al. Physical Properties of Beeswax, Sunflower Wax, and Candelilla Wax Mixtures and Oleogels (Физические свойства пчелиного воска, подсолнечного воска, восковых смесей и олеогелей) // Journal of the American Oil Chemists' Society. – 2019). – № 96. – doi: 10.1002/aocs.12280.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

**Акт апробирования научно-исследовательской
работы в производственных условиях**

СОГЛАСОВАНО

Проректор по научной работе
и инновационному развитию

к.э.н., доцент



Д.В. Ганин

« 9 » декабря 2024 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «МАКОШЬ»



И.И. Ржакинский

2024 г.

**АКТ АПРОБИРОВАНИЯ
результатов научно-исследовательской работы
в производственных условиях***Наименование апробируемого объекта.*

СВЧ-воскотопка непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами для вытопки пасечного воска с отделением меда.

Разработчики

- соискатель Шевелев А. В.

Место апробирования: ООО «МАКОШЬ», (607710, Нижегородская область, Шатковский р-н, с. Ключищи, ул. Владимирская, д. 31).*Описание научной работы*

Апробирована СВЧ-воскотопка (рис. 1, изготовлена согласно патенту РФ № 2770496) непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами для вытопки пасечного воска с отделением меда. СВЧ-воскотопка состоит из двух состыкованных неферромагнитных сфер, разделенных между собой неферромагнитным кольцевым диском, образуя два резонатора. Через резонаторы и кольцевой диск проложен нагнетательный фторопластовый шнек в кожухе, приводящийся в движение от мотора-редуктора, управляемого частотным преобразователем. На поверхности полусфер вмонтированы магнетроны воздушного охлаждения.

Технологический процесс вытопки пасечного воска с отделением меда происходит следующим образом. Восковое сырье из приемной емкости нагнетательным шнеком подается в первый резонатор, где фракция меда разогревается до 44 °С, при этом увеличивается его текучесть, и он через перфорацию фторопластового корпуса стекает в нижнюю часть резонатора, а оттуда – в накопительную емкость. Оставшаяся часть воска шнеком подается во второй полусферический резонатор с более высокой интенсивностью воздействия ЭМП СВЧ, разогревается до температуры плавления (63,5–63,7 °С). Жидкий воск через выгрузное окно корпуса нагнетательного шнека стекает в накопительную емкость.

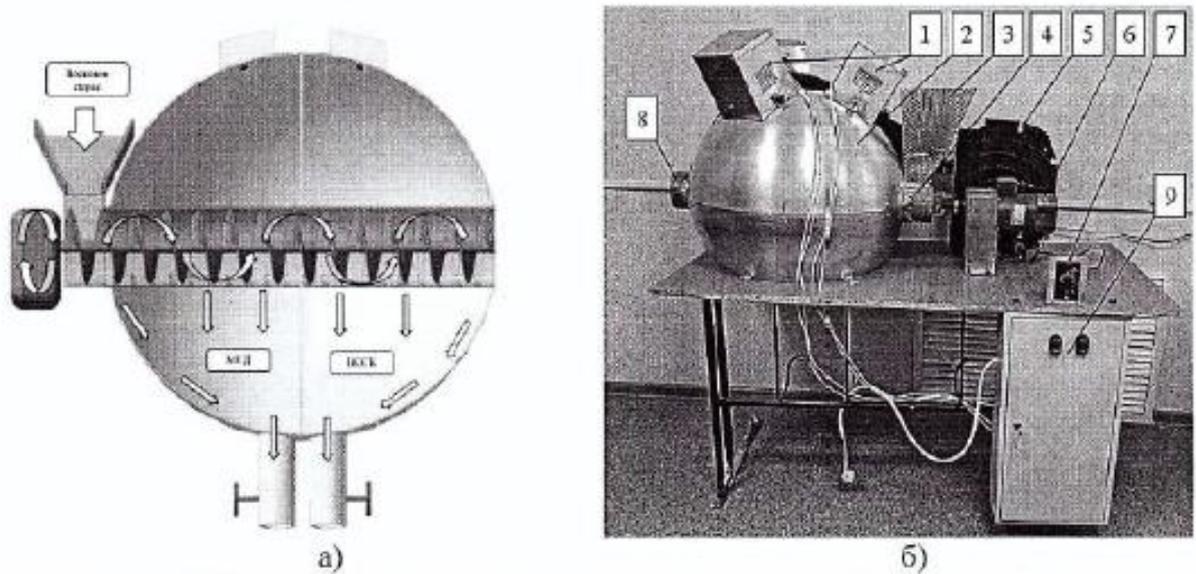


Рисунок 1 – СВЧ-воскотопка непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами для вытопки пасечного воска с отделением меда:

а) схематическое изображение процесса вытопки; б) СВЧ-воскотопка (опытный образец);

1 – СВЧ-генераторы; 2 – резонаторные камеры; 3 – приемная емкость;

4 – нагнетательный шнек в кожухе; 5 – вентилятор охлаждения магнетронов;

6 – мотор-редуктор; 7 – преобразователь частоты; 8 – шкаф управления

В результате проведенных испытаний установлено:

1. Перерабатываемое сырье – забрус с содержанием 5–7 % меда, поврежденные соты.

2. Масса переработанного сырья – 29 кг.

3. Время работы установки – 1 ч 3 минуты.

4. Масса отделившегося меда – 0,95 кг.

5. Масса вытопленного воска – 23,5 кг.

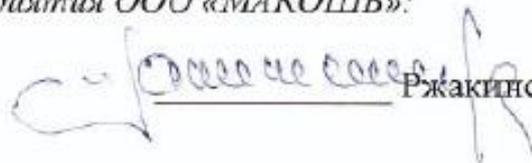
6. За время работы СВЧ-воскотопки удельные энергетические затраты составили 0,13 кВт·ч/кг.

Заключение

СВЧ-воскотопка с полусферическими резонаторами, работающая в непрерывно-поточном режиме, представляет интерес для пчеловодческих хозяйств и может использоваться для переработки воскового сырья.

Представители предприятия ООО «МАКОШЬ»:

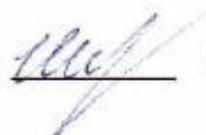
Директор



Ржакинский Игорь Иванович

Исполнители:

Соискатель



Шевелев Александр Владимирович

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Акт об использовании результатов исследований в учебном процессе

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ**
Государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

**«Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет»
(ГБОУ ВО НГИЭУ)**

606340, Нижегородская область, г. Княгинино,
ул. Октябрьская, д. 22
тел./факс (83166) 4-15-50, 4-02-46
ОКПО 02536978, ОГРН 1035201235552
ИНН/КПП 5217003729 / 521701001

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор
по учебной работе

Касимова Ж. В.



26.06.2025 № 556/04-12
на № _____

АКТ

об использовании в учебном процессе материалов диссертационной работы

**Шевелева Александра Владимировича на тему
«РАЗРАБОТКА СВЧ-ВОСКОТОПОК С ОБОСНОВАНИЕМ
ИХ ПАРАМЕТРОВ»**

*Комиссия в составе:
председатель*

Воронов Евгений Викторович – кандидат экономических наук, доцент, директор
Инженерного института;

члены комиссии:

Дуленов Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Электрификация и автоматизация»; **Осокин Владимир Леонидович** – кан-
дидат технических наук, доцент кафедры «Электрификация и автоматизация»,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Науч-
но-технические аспекты разработки и функционирования СВЧ-воскотопки в условиях пасе-
ки», выполненной соискателем **Шевелевым Александром Владимировичем** под научным
руководством доктора технических наук, профессора Михайловой Ольги Валентиновны, и
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве,

использованы в учебном процессе при чтении лекций, проведении практических за-
нятий у бакалавров и магистров по направлению подготовки «Агроинженерия», по профи-
лям «Электрооборудование и электротехнологии» по дисциплинам «Электрооборудование»,
«Основы производства продукции животноводства», «Электротехнологии», «Применение
электроэнергии в сельском хозяйстве», а также бакалаврам по направлению подготовки
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи», по профилю «Сети связи и системы
коммутиации» по дисциплине «Электромагнитные поля и волны».

Для проведения занятий разработан опытный образец СВЧ-установки для вытопки
пасечного воска. СВЧ-воскотопка (рисунок) содержит две ферромагнитные полусферы,
состыкованные с общим вертикально расположенным керамическим выпуклым перфориро-
ванным кольцевым диском, образуя полусферические резонаторы. На поверхности полусфер
по наибольшему периметру расположены магнетроны воздушного охлаждения со сдвигом на
120 градусов, излучатели которых направлены внутрь резонаторов. Внутри полусферических
резонаторов через отверстие кольцевого диска проложен фторопластовый нагнетательный
шнек, у которого первый и центральный витки ферромагнитные. Шаг витков не более, чем
две глубины проникновения волны в восковое сырье, что обеспечивает равномерный нагрев
сырья. Нижняя часть фторопластового корпуса нагнетательного шнека перфорирована. Сни-
зу полусфер установлены заградительные волноводы с шаровыми кранами.

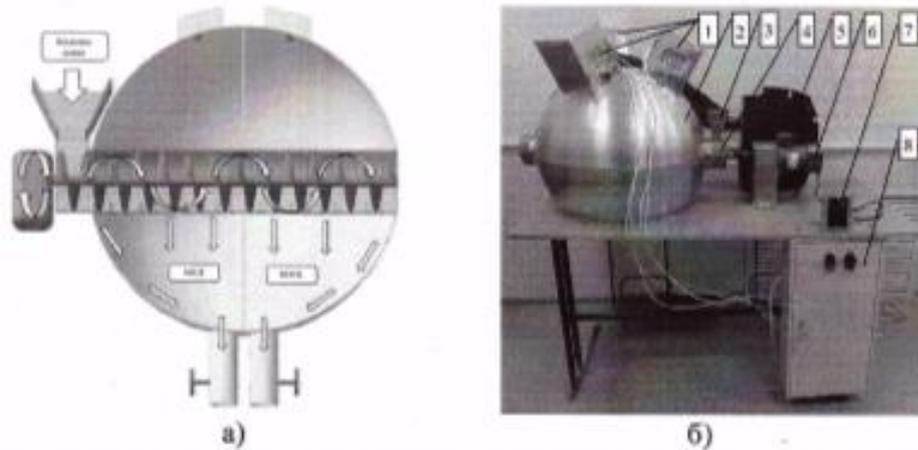


Рисунок – СВЧ-воскотопка непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами для вытопки пасечного воска с отделением меда:
 а) схематическое изображение процесса вытопки; б) СВЧ-воскотопка (опытный образец);
 1 – СВЧ-генераторы; 2 – резонаторные камеры; 3 – приемная емкость;
 4 – нагнетательный шнек в кожухе; 5 – вентилятор охлаждения магнетронов;
 6 – мотор-редуктор; 7 – преобразователь частоты; 8 – шкаф управления

Технологический процесс происходит следующим образом. Восковое сырье загружается в приемную емкость. При включении электропривода нагнетательного шнека во фторопластовом корпусе сырье посредством витков поступает в первый резонатор. После чего включить СВЧ-генераторы первого резонатора, которые возбуждают электромагнитное поле сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) (12,24 см, 2450 МГц). Витки нагнетательного шнека, находящиеся под приемной емкостью и средние витки выполнены из ферромагнитного материала, что ограничивает распространение ЭМП. Частота вращения нагнетательного шнека и мощности СВЧ-генераторов подобраны таким образом, чтобы фракция меда, содержащаяся в восковом сырье, находясь в первом резонаторе, разогревалась до 44 °С – при этом значении увеличится ее текучесть и она через перфорацию фторопластового корпуса стечет в нижнюю часть резонатора, где через запредельный волновод при открытии шарового крана попадет в накопительную емкость. Оставшаяся часть воска, находясь еще в твердом состоянии, шнеком подается во второй полусферический резонатор с более высокой интенсивностью воздействия ЭМП СВЧ, достаточной, чтобы разогреть его до температуры плавления (63,5–63,7 °С). Жидкий воск также через перфорацию корпуса шнека, а затем через запредельный волновод второго резонатора стекает в соответствующую накопительную емкость.

В библиотеке университета размещены:

– **патенты**, подтверждающие новизну конструктивных исполнений разработанных СВЧ-воскотопок для вытопки пчелиного воска:

1. Патент 2728659 Российская Федерация, МПК С11В 11/00, А01К 59/06. Двухмодульная СВЧ установка для термообработки пчелиного воскового сырья / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. ; заявитель и патентообладатель НГИЭУ. № 2020107762; заявл. 19.02.2020, опубл. 30.07.2020, Бюл. № 22. 11 с.

2. Патент 2737142 Российская Федерация, МПК А01К 59/04, А01К 59/06. СВЧ установка для отделения меда от вытапливаемого воскового сырья в резонаторах непрерывного действия / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. ; заявитель и патентообладатель НГИЭУ. № 2020108477; заявл. 26.02.2020, опубл. 25.11.2020, Бюл. № 33. 9 с.

3. Патент 2740095 Российская Федерация, МПК А01К 59/06. СВЧ-установка с взаимосвязанными цилиндрическими резонаторами для термообработки воскового сырья в непрерывном режиме / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др.; заявитель и патентообладатель НГИЭУ. № 2020108478 заявл. 26.02.2020, опубл. 11.01.2021. Бюл. № 2. 9 с.

4. Патент 2770496 Российская Федерация, МПК С11В 11/00, А01К 59/06. Установка СВЧ непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами для вытопки пасечного воска с отделением меда / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и

др.; Заявитель и патентообладатель НГИЭУ. № 2021127581 заявл. 21.09.2021, опубл. 18.04.2022. Бюл. № 11. 15 с.

5. Патент 2789490 Российская Федерация, МПК С11В 11/00. Способ вытопки воска с отделением меда / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. Заявитель и патентообладатель НГИЭУ. № 2022111579 заявл. 28.04.2022. Бюл. № 4. 12 с.

6. Патент 2803541 Российская Федерация, МПК С11В 11/00. СВЧ воскотопка непрерывно-поточного действия с тороидальным резонатором] / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. ; Заявитель и патентообладатель НГИЭУ. № 2023104153 заявл. 22.02.2023, опубл. 14.09.2023. Бюл. № 26. 16 с.

– публикации в ведущих изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Обоснование собственной добротности резонаторов СВЧ-установок для вытопки пасечного воска / А. В. Шевелев, О. В. Михайлова, Г. В. Новикова, М. В. Просвирякова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 8 (190). С. 124–130.

2. Шевелев, А. В. СВЧ-установка для вытопки пчелиного воска / А. В. Шевелев, Г. В. Новикова, О. В. Михайлова, М. В. Белова // Вестник НГИЭИ. 2020. № 5 (108). С. 16–28.

3. Теоретическое обоснование электродинамических параметров СВЧ-установки с полусферическими резонаторами для вытопки воска / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. // Вестник НГИЭИ. 2021. № 10 (125). С. 46–56.

4. Шевелев, А. В. Исследование динамики нагрева воскового сырья в электромагнитном поле СВЧ / А. В. Шевелев, М. С. Жужин, Е. А. Сбитнев // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 6 (133). – С. 32–43.

5. Особенности разработки установок с СВЧ-энергоподводом для переработки сырья агропредприятий / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. // Вестник НГИЭИ. 2022. № 12 (139). С. 54–65.

6. Оптимизация конструктивно-технологических режимов работы СВЧ-воскотопки / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. // Аграрная наука. 2022. Т. 364. № (11). С. 88–93.

7. Шевелев, А. В. Обоснование рационального режима работы СВЧ-воскотопки / А. В. Шевелев // Вестник НГИЭИ. 2023. № 3 (142). С. 17–25.

8. Шевелев А. В. Согласование электродинамических параметров с объемом резонатора СВЧ-воскотопки / А. В. Шевелев // Вестник НГИЭИ. 2024. № 5 (156). С. 70–81.

9. Оптимизация технологических параметров и режимов работы СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами / А. В. Шевелев, О. В. Михайлова, М. В. Просвирякова, В. В. Коновалов // Вестник НГИЭИ. 2025. № 5 (168). С. 53–67.

Использование представленных результатов научных исследований, патентов на изобретения позволит освоить передовые технологии и технические средства с источниками электромагнитных излучений сантиметрового диапазона для переработки продукции пчеловодства и изготовить лабораторные стенды для изучения основных разделов обязательных дисциплин, входящих в вариативную часть учебного плана.

Председатель комиссии:

Кандидат экономических наук, доцент,
директор Инженерного института
(e-mail: e_voronov@list.ru)


Е. В. Воронов

Члены комиссии:

Кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
«Электрификация и автоматизация»
(e-mail: dulepov.86@mail.ru)


Д. Е. Дулепов

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электрификация и автоматизация»
(e-mail: osokinvl@mail.ru)


В. Л. Осокин

Порядок изготовления СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами

Полусферы, кольцевой диск			
Лист фторопласта 3 мм, вал, кожух, фторопластовый виток шнека			
Шнек с разным шагом витков для 1 и 2 резонатор- ной камеры и кожух с перфо- рацией			
Полусфера с отверстием под вал			
Шнек внутри кожуха с кольцевым диском в полусфере			
Расположение волноводов с внутренней стороны и на поверхности полусферы			

<p>Столешница с отверстием под резонаторные камеры</p>			
<p>Установка магнетронов на поверхность полусферы</p>			
<p>Вентилятор охлаждения магнетронов</p>			
<p>Установка мотор-редуктора с частотным преобразователем</p>			
<p>Шкаф управления электрической схемой СВЧ-воскотопки</p>			

(обязательное)

Хронометраж нагрева воскового сырья при разных удельных мощностях

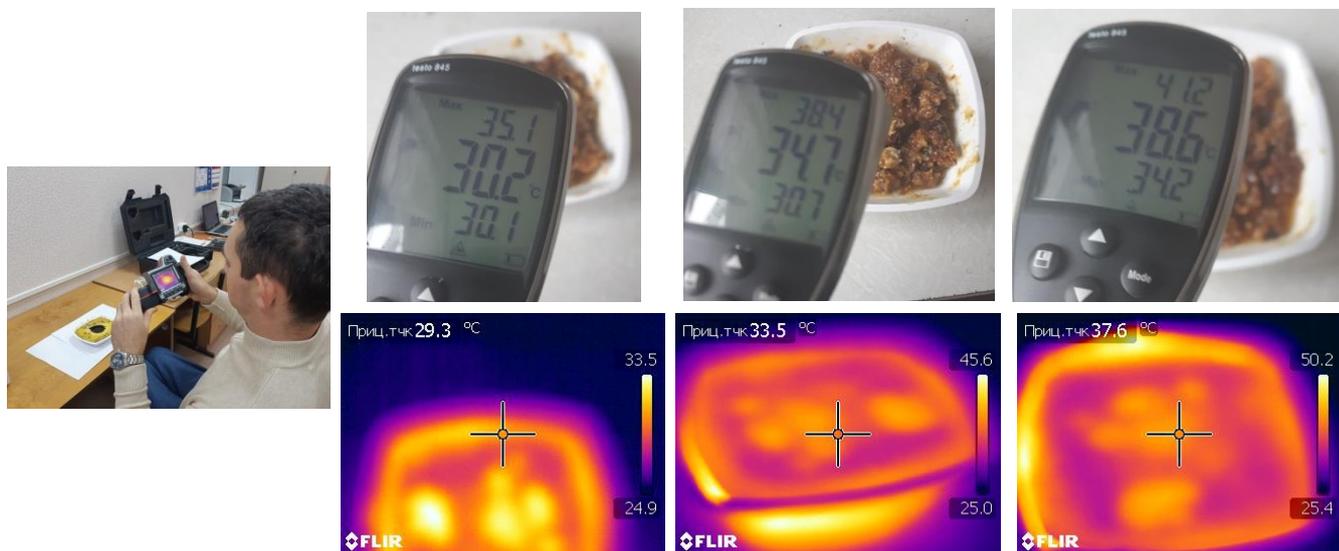


Рисунок Г1 – Хронометраж нагрева забруса с содержанием меда 7–10 % при удельной мощности 0,6 Вт/г



Рисунок Г2 – Хронометраж нагрева забруса с содержанием меда 7–10 % при удельной мощности 0,75 Вт/г

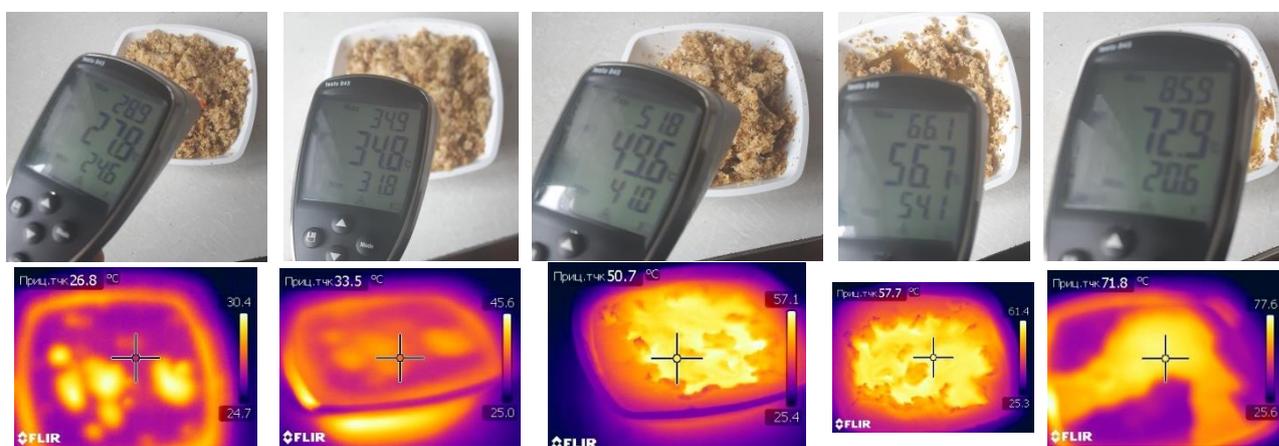


Рисунок Г3 – Хронометраж нагрева забруса с содержанием меда менее 3 % при удельной мощности 0,85 Вт/г



Рисунок Г4 – Хронометраж нагрева забруса с содержанием меда менее 3 % при удельной мощности 1,15 Вт/г



Рисунок Г5 – Хронометраж нагрева забруса с содержанием меда менее 3 % при удельной мощности 1,45 Вт/г



Рисунок Г6 – Хронометраж нагрева забруса с содержанием меда менее 3 % при удельной мощности 1,7 Вт/г



Рисунок Г7 – Хронометраж нагрева закристаллизованного меда при удельной мощности 0,75 Вт/г



Рисунок Г8 – Хронометраж нагрева закристаллизованного меда при удельной мощности 0,9 Вт/г



Рисунок Г9 – Хронометраж нагрева закристаллизованного меда при удельной мощности 1,05 Вт/г

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(справочное)

Протоколы оценки качества вытопленного воска и меда

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
КОМИТЕТ ГОСУДАРСТВЕННОГО
ВЕТЕРИНАРНОГО
НАДЗОРА НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ
«ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЕТЕРИНАРНОЕ
УПРАВЛЕНИЕ КНЯГИНИНСКОГО РАЙОНА»
606340, Нижегородская область, г. Княгинино,
Ул. Новостаринская, д. 85
ИНН 52170003831 КПП 521701001 ОГРН 1035201239138
телефон: (83166) 4-14-96, факс: (83166) 4-13-00
эл. адрес: kng-vetupr@mail.ru
№ _____ от 05.04.2024
на № _____ от _____

Протокол**оценки микробиологических и органолептических показателей
пчелиного воска, полученного при воздействии на него
электромагнитного поля сверхвысокой частоты**

В ГБУ НО «Государственное ветеринарное управление Княгининского района» Нижегородской области проведены исследования изменения бактериальной обсемененности и органолептических показателей пчелиного воска до и после воздействия на него электромагнитных полей сверхвысокой частоты (ЭМПСВЧ) разной напряженности.

Исследованы пробы в 3-кратной повторности согласно ГОСТ 31747-2012 «Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий)» методом подсчета колоний:

1–3 – пробы воска, взятые после воздействия ЭМПСВЧ при разной удельной мощности генератора, нагретые до 65 °С в СВЧ-воскотопке;

4 – контрольный образец воска (полученный в паровой воскотопке ВТП-23).

Таблица – Результаты исследования проб

№ пробы	Удельная мощность генератора, Вт/г	Продолжительность воздействия, мин.	Содержание ОМЧ, $\times 10^6$ КОЕ/г (среднее по повторности)
1	0,85	3,5	0,7
2	1,15	3	0,5
3	1,45	2,5	0,4
4	Контрольный образец (полученный в паровой воскотопке ВТП-23)	45	1,0

Результаты исследования микробиологических показателей пчелиного воска при воздействии ЭМП СВЧ показывают, что снижение общего микробного числа (ОМЧ) до предельно допустимого уровня (500 тыс. КОЕ/г) происходит в пробах № 2 и 3 при удельных мощностях генератора 1,15 и 1,45 Вт/г.

Оценку органолептических показателей (цвет, структура на изломе, запах) взятых проб воска проводили согласно ГОСТ 21179-2000 «Воск пчелиный. Технические условия».

Результаты исследования органолептических показателей пчелиного воска:

внешний вид, вкус и запах опытного образца № 2, полученного при воздействии ЭМП СВЧ при удельной мощности генератора 1,15 Вт/г, оценены в 24 балла (максимально возможное значение), а именно: цвет – темно-желтый; запах – естественный, восковой; структура расколотой пробы воска – однородная, мелкозернистая. Эти же показатели в контрольном образце оценены в 20 баллов: цвет – светло-желтый, запах – естественный восковой; структура – однородная, среднезернистая.

Рекомендации: способ вытопки пасечного воска воздействием ЭМП СВЧ, реализуемый СВЧ-воскотопкой, рекомендуется для практического применения при минимальной удельной мощности генератора 1,15 Вт/г как альтернативный вариант паровой воскотопки.

Начальник ГБУ НО
«Госветуправление
Княгининского района»



П.Э. Меграбян



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
КОМИТЕТ ГОСУДАРСТВЕННОГО
ВЕТЕРИНАРНОГО
НАДЗОРА НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ
«ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЕТЕРИНАРНОЕ
УПРАВЛЕНИЕ КНЯГИНИНСКОГО РАЙОНА»
 606340, Нижегородская область, г. Княгинино,
 Ул. Новостаринская, д. 85
 ИНН 52170003831 КПП 521701001 ОГРН 1035201239138
 телефон: (83166) 4-14-96, факс: (83166) 4-13-00
 эл. адрес: kng-vetupr@mail.ru
 № ____ от 05.04.2024
 на № _____ от _____

Протокол
оценки органолептических и физико-химических показателей меда,
полученного при воздействии на него электромагнитного поля
сверхвысокой частоты

В ГБУ НО «Государственное ветеринарное управление Княгининского района» Нижегородской области проведена оценка органолептических и физико-химических показателей меда, полученного из воскового сырья воздействием на него электромагнитных полей сверхвысокой частоты (ЭМПСВЧ).

Оценка пробы проводилась согласно ГОСТ 19792-2017 «Мед натуральный. Технические условия».

Результаты органолептической оценки опытного образца меда

Показатель	Значение	Нормативное значение
Внешний вид (консистенция)	Жидкий	Жидкий, частично или полностью закристаллизованный
Аромат	Приятный, без постороннего запаха	Приятный, от слабого до сильного, без постороннего запаха
Вкус	Сладкий, без постороннего привкуса	Сладкий, приятный, без постороннего привкуса

Результаты оценки органолептических показателей свидетельствуют о соответствии опытного образца меда нормативным значениям.

Результаты оценки опытного образца меда
по физико-химическим показателям

Показатель	Значение	Нормативное значение
Массовая доля воды, %	16	Не более 20
Массовая доля редуцирующих сахаров, %	75	Не менее 65
Массовая доля фруктозы и глюкозы суммарно, %	70	Не менее 60
Массовая доля сахарозы, %	3	Не более 5
Диастазное число, ед. Готе	11	Не менее 8

Результаты оценки опытного образца меда свидетельствуют о том, что его физико-химические показатели не выходят за пределы нормативных значений.

Заключение: мед, отделившийся из воскового сырья в процессе воздействия ЭМП СВЧ, соответствует нормативным значениям и может быть пригоден в пищу.

Начальник ГБУ НО
«Госветуправление
Княгининского района»



П.Э. Меграбян

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(справочное)

Патенты



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2789490

Способ вытопки пасечного воска с отделением меда

Патентообладатель: *Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Нижегородский государственный инженерно-экономический университет (НГИЭУ) (RU)*

Авторы: *Новикова Галина Владимировна (RU), Шевелев Александр Владимирович (RU), Просвирякова Марьяна Валентиновна (RU), Михайлова Ольга Валентиновна (RU), Сторчевой Владимир Федорович (RU), Зайцев Сергей Петрович (RU)*

Заявка № 2022111579

Приоритет изобретения 28 апреля 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 03 февраля 2023 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 28 апреля 2042 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 692490078 | 4-1910194edbd24145d5c7
Владимир Зубов Юлий Сергеевич
Действителен с 28.01.2022 по 28.03.2023

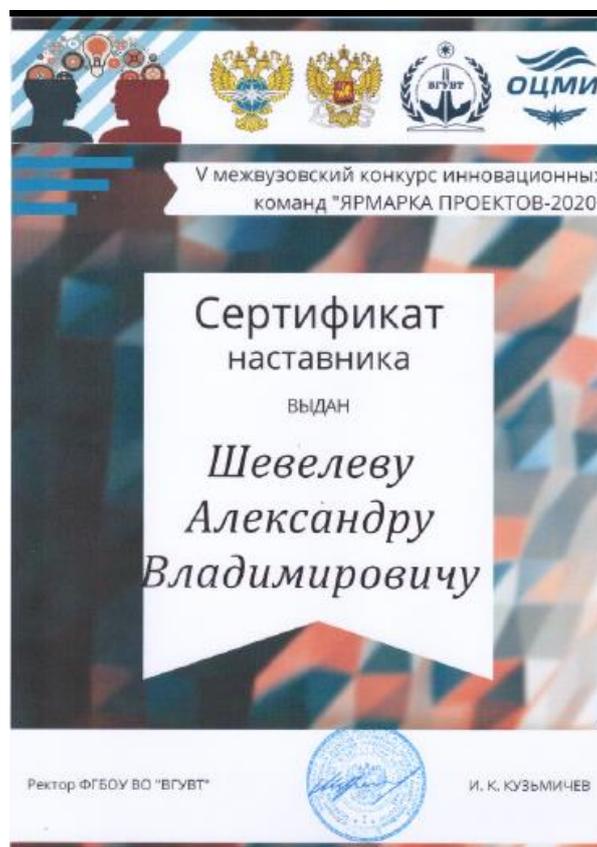
Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

(справочное)

Дипломы



Расчет электродинамических параметров СВЧ-воскотопок**Вычисление ЭД параметров полусферических резонаторов**

(патент № 2770496)

Проведено по формулам, представленным в алгоритме (таблица 2.1).

Собственная добротность (Q) полусферического резонатора

Если диаметр сферического резонатора в 5 раз больше, чем длина волны, то радиус $R = 0,306$ м.

Объем полусферы: $V_{пол} = (2/3) \cdot \pi \cdot R^3 = 4 \cdot 3,14 \cdot 0,306^3 = 0,06$ м³.

Площадь поверхности полусферы:

$$S_{пол} = 3 \cdot \pi \cdot R^2 = 3 \cdot 3,14 \cdot 0,306^2 = 0,882$$
 м².

Собственная добротность полусферического резонатора:

$$Q_{пол} = \frac{2 \cdot (4/3) \cdot \pi \cdot R^3}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 3 \cdot \pi \cdot R^2} = \frac{8 \cdot R}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot 18} = \frac{8 \cdot 0,306}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot 18} = 79254.$$

Напряженность электрического поля (E) в полусферическом резонаторе

по, с учетом мощности генератора:

- при мощности $P = 850$ Вт (первый резонатор):

$$E = \frac{Q \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V} = \frac{79254 \cdot 850}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,06} = 3,05 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}.$$

- при мощности $P = 1700$ Вт (второй резонатор):

$$E = \frac{Q \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V} = \frac{79254 \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,06} = 6,11 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}.$$

Зависимости диэлектрических параметров воска от температуры ($T = 20-65$ °С) нагрева:

$$\varepsilon_r = -0,041 \ln(T) + 2,49; k = 4,4 \ln(T) - 12,9; \text{tg} \delta = 1,8818 \ln(T) - 5,52,$$

или:

$$\varepsilon_r = 2,35-2,31; k = 1,16-5,3; \text{tg} \delta = 0,49-2,25.$$

Нагруженная добротность (Q_m) первого полусферического резонатора с учетом диэлектрической проницаемости воскового сырья ($\varepsilon_r = 2,39$) и фторопластового шнека ($\varepsilon_r = 2,2-2,4$) при температуре 20 °С:

$$Q_m = Q / \sqrt{\varepsilon_r} = 79254 / \sqrt{2,39} = 49246.$$

Ввиду незначительной разницы диэлектрической проницаемости воскового сырья и материала шнека (фторопласта) в расчетах принимаем значение ε_r сырья.

Нагруженная добротность второго полусферического резонатора с сырьем (с учетом изменения диэлектрической проницаемости сырья при температуре 20–65 °С) равна

$$Q_m = Q / \sqrt{\varepsilon_r} = 79254 / \sqrt{2,35...2,31} = 51699...52175.$$

Эмпирическое выражение, описывающее изменение нагруженной добротности полусферического резонатора при изменении диэлектрической проницаемости (ε_r) в процессе нагрева:

$$Q_m = Q / \sqrt{\varepsilon_r} = 79254 / \sqrt{-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49}.$$

В первом резонаторе напряженность ЭП (E_m), создаваемая в материале шнека и в восковом сырье общим объемом $V_m = 0,009 \text{ м}^3$ (объем воскового сырья и фторопластового шнека занимают 15 % всего объема полусферического резонатора), составит:

$$E_{m1} = \frac{Q_m \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m} = \frac{49246 \cdot 850}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,39 \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,009} = 4,88 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}.$$

Напряженность ЭП во втором резонаторе:

$$E_{m2} = \frac{Q_m \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m} = \frac{(51699...51141) \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (2,35...2,31) \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,009} = 11,3...11,37 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}.$$

В среднем напряженность электрического поля в сырье 11,33 кВ/см.

Эмпирическая зависимость напряженности ЭП в сырье (воск) от температуры нагрева:

$$E_m = \frac{Q_m \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r(T) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m} =$$

$$\frac{(79254 / \sqrt{-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49}) \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49) \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,009} =$$

$$= 40,72 \cdot (-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49)^{-1,5} \text{ кВ / см.}$$

Вычисление ЭД параметров СВЧ-установки (патент № 2737142)

Первый резонатор установки

Форма резонатора – сфера, сырье – воск с медом.

При объеме равном $V = 0,06 \text{ м}^3$ радиус (R) и площадь поверхности (S) сферического резонатора: $R^3 = (3 \cdot \pi \cdot V) \div 4 = (3 \cdot 3,14 \cdot 0,06) \div 4 = 0,01413$, $R = 0,244 \text{ м}$.

Диаметр сферы 4-кратный длине волны.

$$S_{\text{сферы}} = 4 \cdot \pi \cdot R^2 = 4 \cdot 3,14 \cdot 0,244^2 = 0,7478 \text{ м}^2.$$

Собственная добротность сферического резонатора:

$$Q_{\text{сферы}} = \frac{2 \cdot (4/3) \cdot \pi \cdot R^3}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2} = \frac{2 \cdot R}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot 3} = \frac{2 \cdot 0,244}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot 3} = 94794.$$

Напряженность электрического поля (E) в сферическом резонаторе, с учетом мощности генератора $P = 850 \text{ Вт}$:

$$E = \frac{Q \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V} = \frac{94794 \cdot 850}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,06} = 3,653 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}.$$

Нагруженная добротность сферического резонатора с восковым сырьем (Q_m) (с учетом $\varepsilon_r = 2,39$ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$Q_m = Q / \sqrt{\varepsilon_r} = 94794 / \sqrt{2,39} = 58878.$$

Напряженность ЭП в загрузочном материале объемом $V_m = 0,009 \text{ м}^3$:

$$E_m = \frac{Q_m \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m} =$$

$$\frac{58878 \cdot 850}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,39 \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,009} = 5,84 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}.$$

Второй резонатор установки

Форма – кольцевой резонатор, сырье – воск.

При объеме кольцевого резонатора $V = 0,06 \text{ м}^3$ принят радиус тора ($r = 0,1224 \text{ м}$), радиус среднего периметра ($R = 0,2031 \text{ м}$):

$$V = 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot r^2 = 2 \cdot \pi^2 \cdot 0,2031 \cdot 0,1224^2 = 0,06 \text{ м}^3.$$

Длина кольцевого резонатора:

$$l = 2 \cdot \pi \cdot R = 6,28 \cdot 0,2031 = 1,2755 \text{ м}.$$

Для обеспечения бегущей волны в торе, средний его периметр должен быть кратным половине длины волны. Кратность половины длины волны среднего периметра составляет $1,2755 / 0,0612 \approx 21$.

Площадь поверхности (S) кольцевого резонатора:

$$S = 4 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot r = 39,4384 \cdot 0,2031 \cdot 0,1224 = 0,9804 \text{ м}^2.$$

Вычислить собственную добротность (Q) кольцевого резонатора по методике Ю. Н. Пчельникова [115]:

$$Q = \frac{2 \cdot 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot r^2}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot r} = \frac{r}{1,716 \cdot 10^{-6}} = \frac{0,1224}{1,716 \cdot 10^{-6}} = 71329.$$

Напряженность электрического поля (E) в резонаторе с учетом мощности генератора ($P = 1700 \text{ Вт}$):

$$E = \frac{Q \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V} = \frac{71329 \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,06} = 5,5 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}.$$

Нагруженная добротность кольцевого резонатора с сырьем (Q_m) с учетом изменения диэлектрической проницаемости сырья ($\varepsilon = 2,35 \dots 2,31$) при температуре $20\text{--}65 \text{ }^\circ\text{C}$: $Q_m = Q / \sqrt{\varepsilon_r} = 71329 / \sqrt{2,35 \dots 2,31} = 46529 \dots 46927$.

При зависимости диэлектрических параметров воска от температуры нагрева $\varepsilon_r = -0,041 \ln(T) + 2,49$, эмпирическое выражение, описывающее изменение нагруженной добротности кольцевого резонатора при изменении диэлектрической проницаемости (ε_r) в процессе нагрева:

$$Q_m = Q / \sqrt{\varepsilon_r} = 71329 / \sqrt{-0,041 \ln(T) + 2,49}.$$

Напряженность ЭП в сырье, объемом $V_m = 0,009 \text{ м}^3$:

$$E_m = \frac{Q_m \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m} =$$

$$= \frac{(46529...46927) \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (2,35..2,31) \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,009} = 10,17...10,44 \frac{\kappa B}{\text{см}}$$

Напряженность ЭП в процессе нагрева сырья от 20 до 65 °С остается почти постоянной равной 10,17...10,44 кВ/см.

Эмпирическая зависимость напряженности ЭП в сырье от температуры нагрева:

$$E_m = \frac{Q_m \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r(T) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m} =$$

$$= \frac{(71329 / \sqrt{-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49}) \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49) \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,009} =$$

$$= 36,65 \cdot (-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49)^{-1,5} \text{ кВ / см.}$$

Вычисление ЭД параметров СВЧ-установки с цилиндрическим и сферическим резонаторами (патент № 2728659)

Первый резонатор

Форма – цилиндр, сырье – воск с медом

При объеме цилиндрического резонатора $V = 0,06 \text{ м}^3$ с радиусом $R = 0,306 \text{ м}$, высота цилиндра будет составлять:

$$H = \frac{V}{\pi \cdot R^2} = \frac{0,06}{3,14 \cdot 0,306^2} = 0,204 \text{ м.}$$

При этом резонансная частота не зависит от высоты резонатора.

Площадь поверхности (S) цилиндрического резонатора:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot (R^2 + R \cdot H) = 6,28 \cdot (0,306^2 + 0,306 \cdot 0,204) = 0,98 \text{ см}^2.$$

Собственная добротность (Q) цилиндрического резонатора:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot (H + R)} = \frac{6,28 \cdot 0,306^2 \cdot 0,204}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot 6,28 \cdot 0,306 \cdot (0,204 + 0,306)} = 71329.$$

Напряженность электрического поля (E) в резонаторе с учетом мощности генератора $P = 850 \text{ Вт}$:

$$E = \frac{Q \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V} = \frac{71329 \cdot 850}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,06} = 2,75 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$$

Нагруженная добротность цилиндрического резонатора с восковым сырьем (Q_M) с учетом его диэлектрической проницаемости ($\varepsilon_r = 2,39$) при температуре 20

$$^{\circ}\text{C}: \quad Q_M = Q / \sqrt{\varepsilon_r} = 71329 / \sqrt{2,39} = 44304.$$

Напряженность ЭП в загрузочном материале объемом $V_M = 0,009 \text{ м}^3$:

$$E_M = \frac{Q_M \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_M} = \frac{44304 \cdot 850}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,39 \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,009} = 4,4 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$$

Второй резонатор установки

Форма резонатора – сфера, сырье – воск.

Размеры резонатора и вычисление собственной добротности см. выше.

Напряженность электрического поля (E) в сферическом резонаторе с учетом мощности генератора ($P = 1700 \text{ Вт}$):

$$E = \frac{Q \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V} = \frac{94794 \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,06} = 7,31 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$$

Нагруженная добротность резонатора с сырьем (Q_M), с учетом изменения диэлектрической проницаемости сырья ($\varepsilon = 2,35 \dots 2,31$) в диапазоне температур

$$20 \dots 65 \text{ } ^{\circ}\text{C}: \quad Q_M = Q / \sqrt{\varepsilon_r} = 94794 / \sqrt{2,35 \dots 2,31} = 61836 \dots 62364.$$

Эмпирическое выражение, описывающее изменение нагруженной добротности сферического резонатора при изменении диэлектрической проницаемости

$$(\varepsilon_r) \text{ в процессе нагрева:} \quad Q_M = Q / \sqrt{\varepsilon_r} = 94794 / \sqrt{-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49}.$$

Напряженность ЭП в загрузочном материале объемом $V_M = 0,009 \text{ м}^3$:

$$E_M = \frac{Q_M \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_M} = \frac{(61836 \dots 62364) \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (2,35 \dots 2,31) \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,009} = 13,51 \dots 13,87 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$$

Напряженность ЭП в процессе нагрева сырья от 20 до 65 $^{\circ}\text{C}$ в среднем остается 13,51...13,87.

Эмпирическая зависимость напряженности ЭП в сырье от температуры нагрева:

$$E_m = \frac{Q_m \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r(T) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m} =$$

$$= \frac{(94794 / \sqrt{-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49}) \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49) \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,009} =$$

$$= 48,70 \cdot (-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49)^{-1,5} \text{ кВ / см.}$$

**Вычисление ЭД параметров СВЧ-установки
с цилиндрическими резонаторами (патент № 2740095)**

Первый резонатор

При объеме цилиндрического резонатора $V = 0,06 \text{ м}^3$ с радиусом $R = 0,1836$ м его высота H будет составлять:

$$H = \frac{V}{\pi \cdot R^2} = \frac{0,06}{3,14 \cdot 0,1836^2} = 0,5665 \text{ м, принимаем } 0,5508 (4,5 \text{ длины волны}).$$

При этом резонансная частота не зависит от длины резонатора.

Если отношение длины к диаметру больше 2,03 ($0,5508:0,1836 = 3$), то основным колебанием является E_{010} , и при этом будет продольная однородность электрического поля.

Площадь поверхности (S) цилиндрического резонатора:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot (R^2 + R \cdot H) = 6,28 \cdot (0,1836^2 + 0,1836 \cdot 0,5508) = 0,8472 \text{ см}^2.$$

Собственная добротность (Q) цилиндрического резонатора:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot (H + R)} = \frac{6,28 \cdot 0,1836^2 \cdot 0,5508}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot 6,28 \cdot 0,1836 \cdot (0,5508 + 0,1836)} = 80224.$$

Напряженность электрического поля (E) в резонаторе с учетом мощности генератора $P = 850 \text{ Вт}$:

$$E = \frac{Q \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V} = \frac{80224 \cdot 850}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,06} = 3,09 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}.$$

Нагруженная добротность цилиндрического резонатора с восковым сырьем (Q_m) с учетом его диэлектрической проницаемости ($\varepsilon_r = 2,39$) при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$Q_m = Q / \sqrt{\varepsilon_r} = 80224 / \sqrt{2,39} = 51892.$$

Напряженность ЭП в загрузочном материале объемом $V_m = 0,009 \text{ м}^3$:

$$E_m = \frac{Q_m \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m} = \frac{51892 \cdot 850}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,39 \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,009} = 5,57 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}.$$

Второй резонатор

Напряженность электрического поля (E) в резонаторе с учетом мощности генератора $P = 1700 \text{ Вт}$:

$$E = \frac{Q \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V} = \frac{51892 \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,06} = 6,18 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}.$$

Нагруженная добротность цилиндрического резонатора с сырьем (Q_m) с учетом изменения диэлектрической проницаемости сырья $\varepsilon = 2,35 \dots 2,31$ при температуре $20 \dots 65 \text{ }^\circ\text{C}$: $Q_m = Q / \sqrt{\varepsilon_r} = 80224 / \sqrt{2,35 \dots 2,31} = 52332 \dots 52783$.

Эмпирическое выражение, описывающее изменение нагруженной добротности цилиндрического резонатора при изменении диэлектрической проницаемости (ε_r) в процессе нагрева: $Q_m = Q / \sqrt{\varepsilon_r} = 80224 / \sqrt{-0,041 \ln(T) + 2,49}$.

Напряженность ЭП в загрузочном материале объемом $V_m = 0,009 \text{ м}^3$:

$$E_m = \frac{Q_m \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m} = \frac{(52332 \dots 52783) \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (2,35 \dots 2,31) \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,009} = 11,5 \dots 11,64 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}.$$

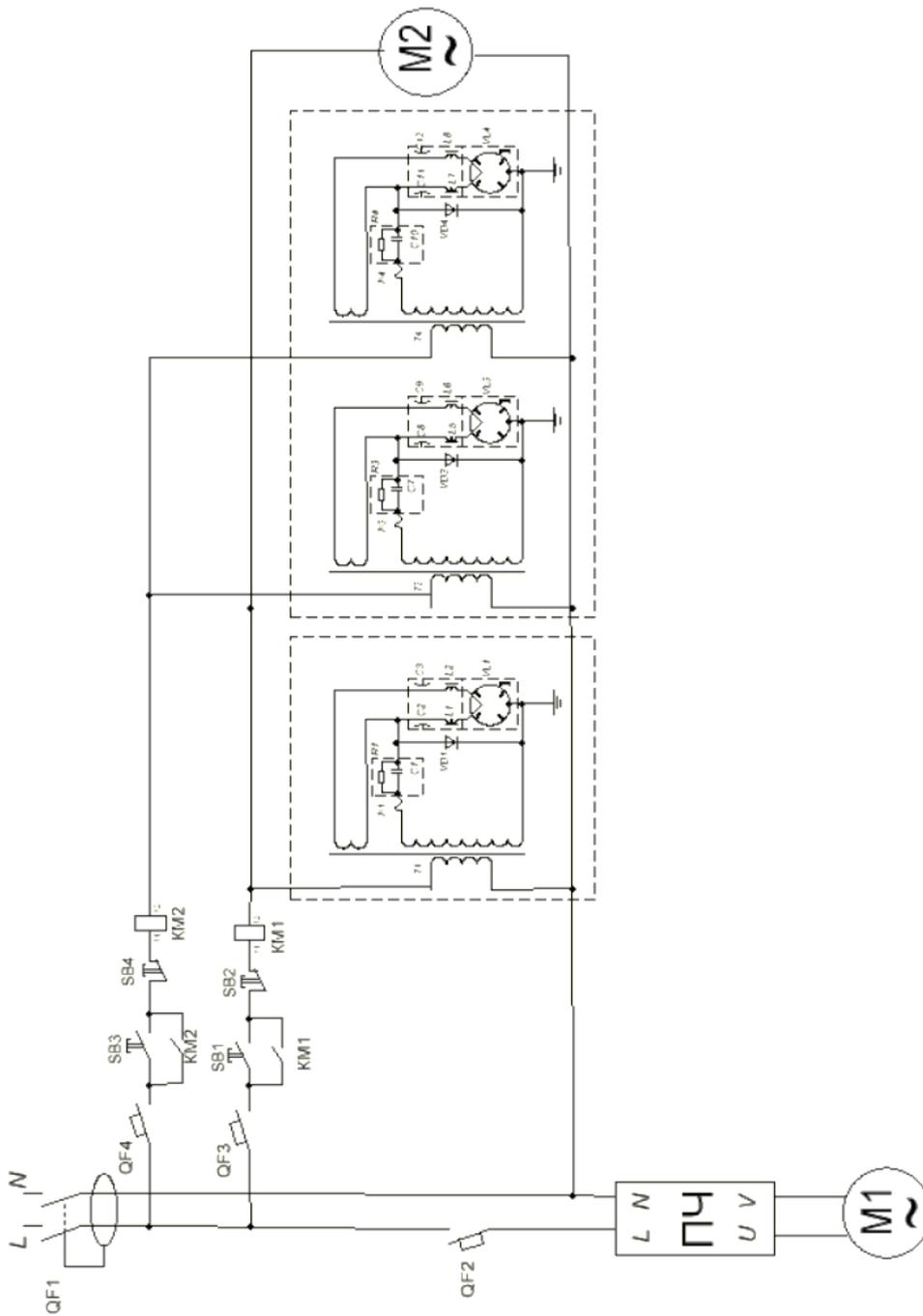
Средняя напряженность ЭП в сырье $11,57 \text{ кВ/см}$.

Эмпирическая зависимость напряженности ЭП в сырье от температуры нагрева:

$$E_m = \frac{Q_m \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r(T) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m} = \frac{(79254 / \sqrt{-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49}) \cdot 1700}{0,27 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49) \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,009} = 40,72 \cdot (-0,041 \cdot \ln(T) + 2,49)^{-1,5} \text{ кВ/см}.$$

Приложение К
(справочное)

Принципиальная электрическая схема управления СВЧ-воскотопкой непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами



Вентилятор,
0,2 кВт

СВЧ генераторы
второго
резонатора,
1,7 кВт

СВЧ-генератор
первого
резонатора,
0,85 кВт

Мотор-редуктор
нагнетательного
шнека, 0,2 кВт

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

(обязательное)

ЛИНЕЙНЫЙ МНОГОФАКТОРНЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ

Статистический анализ выполнен с помощью программы Statistica 12

СВЧ-воскотопка с резонаторами в виде сферы в кольцевом резонаторе*Зависимая переменная – температура нагрева воскового сырья (Т).*

Независимые переменные: удельная мощность генератора ($P_{уд}$), продолжительность воздействия ЭМП СВЧ (τ), содержание меда в восковом сырье (K) (табл. 4.10).

Предсказательная сила полученной регрессионной модели очень высока, так как значение коэффициента детерминации близок к 1 ($R^2 = 0,930$). То есть, дисперсия отклика на 93,0% определяется независимыми переменными. Остальные 7,0% дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически значима: $F = 30,8$; $p < 0,001$. Все переменные по отдельности, **кроме К**, статистически значимо влияют на отклик ($P < 0,05$) (табл. К1).

Таблица К1 – Итоги регрессии для зависимой переменной T

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t-Стьюдента	p-знач.
Св.член			-65,02	13,18	-4,93	0,002
$P_{уд}$	0,749	0,100	0,059	0,008	7,47	<0,001
τ	0,596	0,100	844,4	141,9	5,95	0,001
К	0,116	0,100	1,37	1,19	1,15	0,287

Таким образом, были получены параметры линейного уравнения регрессии:

$$Y = a_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_n,$$

где Y – предсказанное значение отклика; a_0 – свободный член уравнения; $b_1, b_2 \dots b_n$ – весовые коэффициенты регрессии (В).

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$T = -65,02 + 0,059 \cdot P_{уд} + 844,4 \cdot \tau + 1,37 \cdot K.$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: $P_{уд}$, τ и К.

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с положительными коэффициентами ($P_{уд}$, τ и К) приводит к увеличению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно точно соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вблизи теоретической прямой и в границах диапазона доверительной вероятности для 95 %. Так как большинство точек сосредоточено вблизи теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков небольшая. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

Зависимая переменная – удельные энергетические затраты (УЭЗ).

Предсказательная сила полученной регрессионной модели очень высока, так как значение коэффициента детерминации близок к 1 ($R^2 = 0,997$). То есть, дисперсия отклика на 99,7% определяется независимыми переменными. Остальные 0,3% дисперсии являются случайными,

то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически значима: $F = 924,7$; $p < 0,001$. Все переменные по отдельности статистически значимо влияют на отклик ($P < 0,05$) (табл. К2).

Таблица К2 – Итоги регрессии для зависимой переменной УЭЗ

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t-Стьюдента	p-знач.
Св.член			-42,86	2,48	-17,3	<0,001
$P_{уд}$	0,372	0,019	0,029	0,001	19,6	<0,001
τ	0,924	0,019	1300,0	26,7	48,7	<0,001
К	0,071	0,019	0,833	0,223	3,7	0,007

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$УЭЗ = -42,86 + 0,029 \cdot P_{уд} + 1300,0 \cdot \tau + 0,833 \cdot К.$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: τ , $P_{уд}$ и К.

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с положительными коэффициентами (τ , $P_{уд}$ и К) приводит к увеличению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно точно соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вблизи теоретической прямой и в границах диапазона доверительной вероятности для 95%. Так как большинство точек сосредоточено вблизи теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков небольшая. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

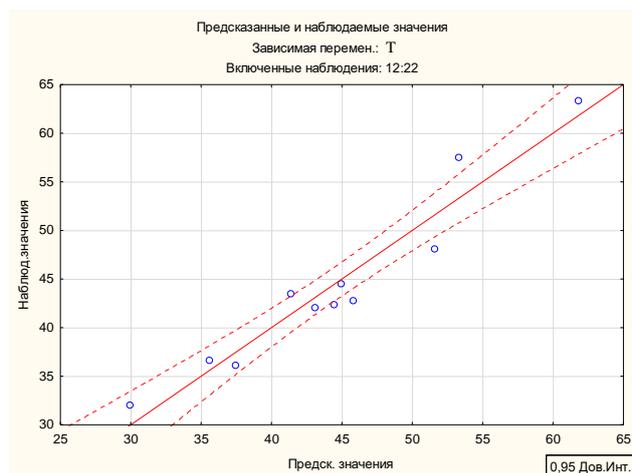


Рисунок К1 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной T

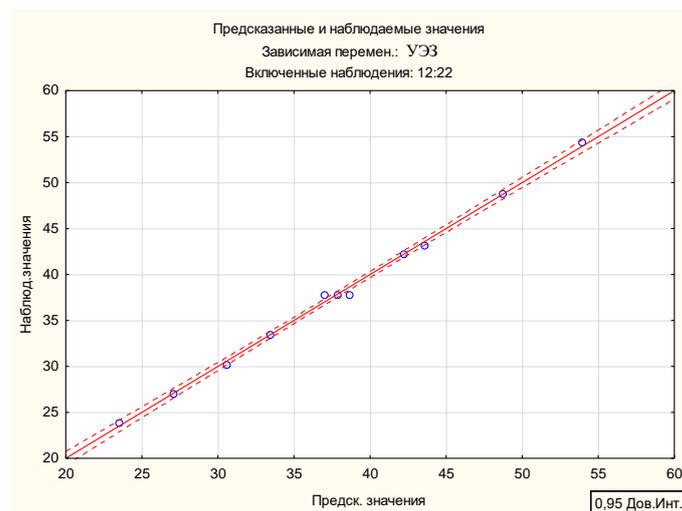


Рисунок К2 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной УЭЗ

**СВЧ-воскотопка с совмещенными цилиндрическим
и сферическим резонаторами** (патент № 2728695)

Зависимая переменная – температура нагрева воскового сырья (T).

Независимые переменные: удельная мощность генератора ($P_{уд}$), продолжительность воздействия ЭМП СВЧ (τ), содержание меда в восковом сырье (K) (табл. 4.11).

Предсказательная сила полученной регрессионной модели высока, так как значение коэффициента детерминации выше 0,7, но ниже 0,9 ($R^2 = 0,841$). То есть, дисперсия отклика на 84,1% определяется независимыми переменными. Остальные 15,9% дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически значима: $F = 12,3$; $p = 0,004$. Однако статистически значимо влияет на отклик только переменная τ ($P < 0,05$) (табл. К3).

Таблица К3 – Итоги регрессии для зависимой переменной T

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t-Стьюдента	p-знач.
Св.член			-45,80	26,02	-1,76	0,122
$P_{уд}$	0,285	0,151	0,029	0,015	1,89	0,101
τ	0,869	0,151	1590,3	276,0	5,76	0,001
K	0,062	0,151	0,950	2,305	0,41	0,693

Таким образом, были получены параметры линейного уравнения регрессии

$$Y = a_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_n.$$

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$T = -45,80 + 0,029 \cdot P_{уд} + 1590,3 \cdot \tau + 0,950 \cdot K.$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: τ , $P_{уд}$ и K .

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с положительными коэффициентами (τ , $P_{уд}$ и K) приводит к увеличению прогнозируемого значения отклика.

На **невысокую** математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно **не часто** соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вдали теоретической прямой и за пределами границ диапазона доверительной вероятности для 95%. Так как большинство точек удалены от теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков значительная. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

Зависимая переменная – удельные энергетические затраты (УЭЗ).

Предсказательная сила полученной регрессионной модели очень высока, так как значение коэффициента детерминации близок к 1 ($R^2 = 0,991$). То есть, дисперсия отклика на 99,1% определяется независимыми переменными. Остальные 0,9% дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически значима: $F = 247,4$; $p < 0,001$. Все переменные по отдельности статистически значимо влияют на отклик ($P < 0,05$) (табл. К4).

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$УЭЗ = -318,5 + 0,100 \cdot P_{уд} + 6506,1 \cdot \tau + 7,50 \cdot K.$$

Таблица К4 – Итоги регрессии для зависимой переменной УЭЗ

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t-Стьюдента	p-знач.
Св.член			-318,5	23,6	-13,52	<0,001
$P_{уд}$	0,262	0,035	0,100	0,014	7,19	<0,001
τ	0,951	0,035	6506,1	26,1	26,05	<0,001
К	0,131	0,035	7,50	3,59	3,59	0,009

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: τ , $P_{уд}$ и К.

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с положительными коэффициентами (τ , $P_{уд}$ и К) приводит к увеличению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно точно соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вблизи теоретической прямой и в границах диапазона доверительной вероятности для 95%. Так как большинство точек сосредоточено вблизи теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков небольшая. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

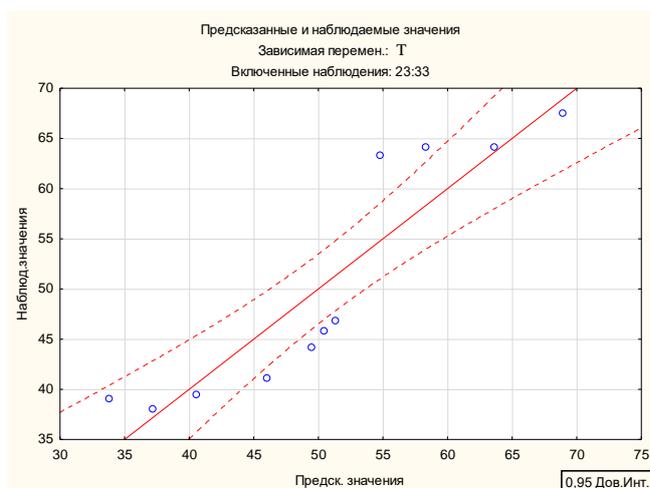
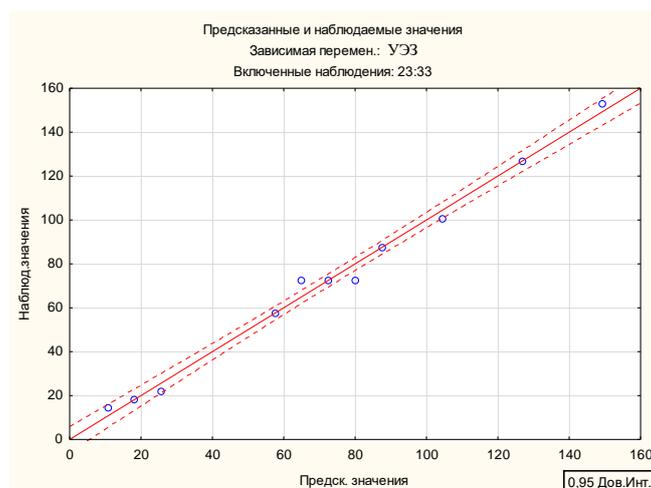
Рисунок К3 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной T 

Рисунок К4 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной УЭЗ

4. СВЧ-воскотка с состыкованными цилиндрическими резонаторами

Зависимая переменная – температура нагрева воскового сырь (Т).

Независимые переменные: удельная мощность генератора ($P_{уд}$), продолжительность воздействия ЭМП СВЧ (τ), содержание меда в восковом сырье (К) (табл. 4.12)

Предсказательная сила полученной регрессионной модели очень высока, так как значение коэффициента детерминации близок к 1 ($R^2 = 0,918$). То есть, дисперсия отклика на 91,8% определяется независимыми переменными. Остальные 8,2% дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически значима: $F = 26,3$; $p = 0,004$. Все переменные по отдельности статистически значимо влияют на отклик ($P < 0,05$) (табл. К5).

Таблица К5 – Итоги регрессии для зависимой переменной T

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t-Стьюдента	p-знач.
Св.член			-21,83	7,81	-2,80	0,027
$P_{уд}$	0,265	0,108	0,014	0,006	2,46	0,044
τ	0,865	0,108	1223,4	152,7	8,01	<0,001
К	0,316	0,108	2,47	0,84	2,93	0,022

Таким образом, были получены параметры линейного уравнения регрессии

$$Y = a_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_n.$$

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$T = -21,83 + 0,014 \cdot P_{уд} + 1223,4 \cdot \tau + 2,47 \cdot K.$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: τ , К и $P_{уд}$.

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с положительными коэффициентами (τ , К и $P_{уд}$) приводит к увеличению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно точно соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вблизи теоретической прямой и в границах диапазона доверительной вероятности для 95 %. Так как большинство точек сосредоточено вблизи теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков небольшая. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

Зависимая переменная – удельные энергетические затраты (УЭЗ).

Предсказательная сила полученной регрессионной модели очень высока, так как значение коэффициента детерминации близок к 1 ($R^2 = 0,996$). То есть, дисперсия отклика на 99,6% определяется независимыми переменными. Остальные 0,4% дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически значима: $F = 523,2$; $p < 0,001$. Все переменные по отдельности статистически значимо влияют на отклик ($P < 0,05$) (табл. К6).

Таблица К6 – Итоги регрессии для зависимой переменной УЭЗ

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t-Стьюдента	p-знач.
Св.член			-23,80	1,37	-17,38	<0,001
$P_{уд}$	0,700	0,025	0,027	0,001	27,78	<0,001
τ	0,705	0,025	750,0	26,8	28,00	<0,001
К	0,094	0,025	0,550	0,148	3,73	0,007

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$УЭЗ = -23,80 + 0,027 \cdot P_{уд} + 750,0 \cdot \tau + 0,550 \cdot K.$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: τ , $P_{уд}$ и К.

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с положительными коэффициентами (τ , $P_{уд}$ и K) приводит к увеличению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно точно соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вблизи теоретической прямой и в границах диапазона доверительной вероятности для 95%. Так как большинство точек сосредоточено вблизи теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков небольшая. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

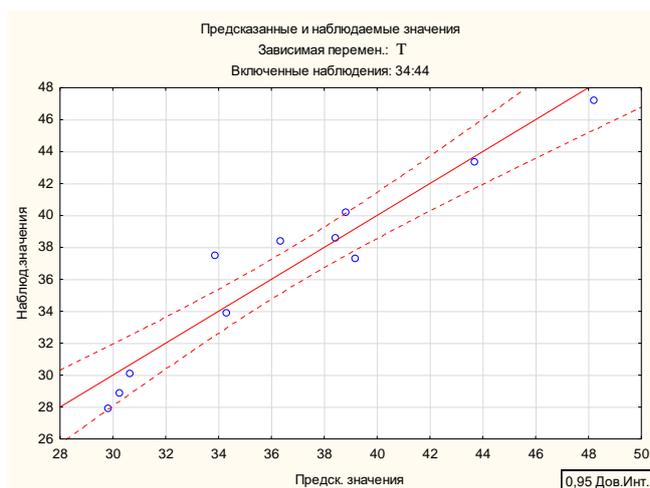


Рисунок К5 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной T

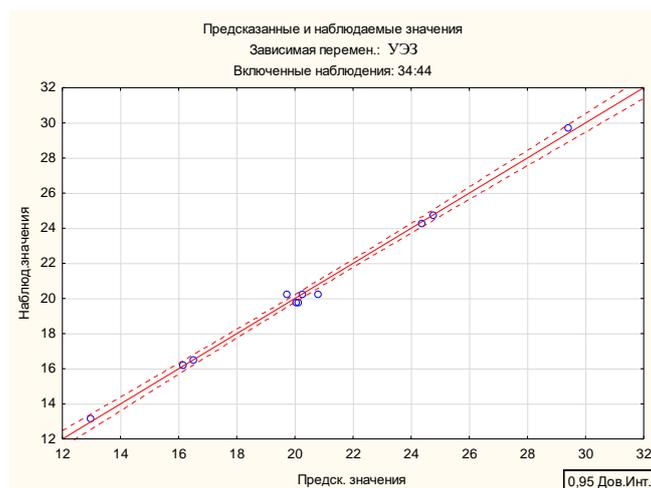


Рисунок К6 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной $УЭЗ$

Результаты оценки рабочего процесса вытопки воскового сыря в СВЧ-воскотопках

Второй резонатор СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами

Зависимая переменная – температура нагрева воскового сыря (T).

Независимые переменные (факторы, предикторы): удельная мощность генератора ($P_{уд}$), продолжительность воздействия ЭМП СВЧ (τ) (табл. 4.14).

Предсказательная сила полученной регрессионной модели **низкая**, так как значение коэффициента детерминации меньше 0,7 ($R^2 = 0,598$). То есть, дисперсия отклика на 59,8% определяется независимыми переменными. Остальные 40,2% дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически значима: $F = 7,43$; $p = 0,011$. По отдельности статистически значимо влияют на отклик только переменная $P_{уд}$ ($P < 0,05$) (табл. К7).

Таблица К7 – Итоги регрессии для зависимой переменной T

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t-Стьюдента	p-знач.
Св.член			-2,66	21,53	-0,12	0,904
$P_{уд}$	0,705	0,201	0,036	0,010	3,51	0,006
τ	0,318	0,201	571,8	360,2	1,59	0,144

Таким образом, были получены параметры линейного уравнения регрессии

$$Y = a_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_n.$$

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$T = -130,13 - 0,03 \cdot P_{y\partial} + 7580,24 \cdot \tau - 3,04 \cdot 10^{-5} \cdot P_{y\partial}^2 + 2,81 \cdot P_{y\partial} \cdot \tau - 1,03 \cdot 10^5 \cdot \tau^2.$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: $P_{уд}$ и τ .

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с положительными коэффициентами ($P_{уд}$ и τ) приводит к увеличению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

На **невысокую** математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно **не часто** соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вдали теоретической прямой и за пределами границ диапазона доверительной вероятности для 95%. Так как большинство точек удалены от теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков значительная. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

Зависимая переменная – производительность (Q , кг/ч).

Предсказательная сила полученной регрессионной модели **низкая**, так как значение коэффициента детерминации меньше 0,7 ($R^2 = 0,392$). То есть, дисперсия отклика на 39,2 % определяется независимыми переменными. Остальные 60,8 % дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически **не значима**: $F = 3,22$; $p = 0,083$. По отдельности статистически значимо переменные **не влияют** ($P > 0,05$) (табл. К8).

Таблица К8 – Итоги регрессии для зависимой переменной Q

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t-Стьюдента	p-знач.
Св.член			75,17	21,43	3,51	0,006
$P_{уд}$	-0,535	0,247	-0,022	0,010	-2,17	0,055
τ	-0,326	0,247	-474,3	358,6	-1,32	0,215

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$Q = -16,43 - 0,01 \cdot P_{y\partial} + 2916,58 \cdot \tau - 2,15 \cdot 10^{-5} \cdot P_{y\partial}^2 + 0,63 \cdot P_{y\partial} \cdot \tau - 41425,88 \cdot \tau^2$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: $P_{уд}$ и τ .

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с отрицательными коэффициентами ($P_{уд}$ и t) приводит к уменьшению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

На **невысокую** математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно **редко** соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вдали теоретической прямой и за пределами границ диапазона доверительной вероятности для 95%. Так как большинство точек удалены от теоретической

прямой регрессии, средняя величина остатков значительная. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

Зависимая переменная – ОМЧ.

Предсказательная сила полученной регрессионной модели **низкая**, так как значение коэффициента детерминации меньше 0,7 ($R^2 = 0,186$). То есть, дисперсия отклика на 18,6% определяется независимыми переменными. Остальные 81,4% дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически **не значима**: $F = 1,14$; $p = 0,357$. По отдельности статистически значимо переменные **не влияют** ($P > 0,05$) (табл. К9).

Таблица К9 – Итоги регрессии для зависимой переменной *ОМЧ*

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t-Стьюдента	p-знач.
Св.член			1,39	0,55	2,52	0,030
$P_{уд}$	-0,374	0,285	-0,0003	0,0003	-1,31	0,220
τ	-0,216	0,285	-6,97	9,20	-0,76	0,466

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$ОМЧ = 4,96 + 0,01 \cdot P_{уд} - 172,02 \cdot \tau + 1,2298 \cdot 10^{-6} \cdot P_{уд}^2 - 0,07 \cdot P_{уд} \cdot \tau + 2457,97 \cdot \tau^2.$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: $P_{уд}$ и τ .

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с отрицательными коэффициентами ($P_{уд}$ и τ) приводит к уменьшению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

На **низкую** математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно **редко** соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вдали теоретической прямой и за пределами границ диапазона доверительной вероятности для 95%. Так как большинство точек удалены от теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков значительная. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

Зависимая переменная – удельные энергетические затраты (УЭЗ).

Предсказательная сила полученной регрессионной модели очень высока, так как значение коэффициента детерминации близок к 1 ($R^2 = 0,982$). То есть, дисперсия отклика на 98,2% определяется независимыми переменными. Остальные 1,8% дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически значима: $F = 278,2$; $p < 0,001$. Все переменные по отдельности статистически значимо влияют на отклик ($P < 0,05$) (табл. К10).

Таблица К10 – Итоги регрессии для зависимой переменной *УЭЗ*

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t-Стьюдента	p-знач.
Св.член			-51,76	5,21	-9,93	<0,001
$P_{уд}$	0,853	0,042	0,050	0,002	20,30	<0,001
τ	0,505	0,042	1048,4	87,2	12,02	<0,001

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$УЭЗ = 30,06 + 0,01 \cdot P_{y\delta} - 1309,25 \cdot \tau - 3,85 \cdot 10^{-6} \cdot P_{y\delta}^2 + P_{y\delta} \cdot \tau + 12145,42 \cdot \tau^2.$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: $P_{уд}$ и τ .

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с положительными коэффициентами ($P_{уд}$ и τ) приводит к увеличению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно точно соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вблизи теоретической прямой и в границах диапазона доверительной вероятности для 95%. Так как большинство точек сосредоточено вблизи теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков небольшая. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

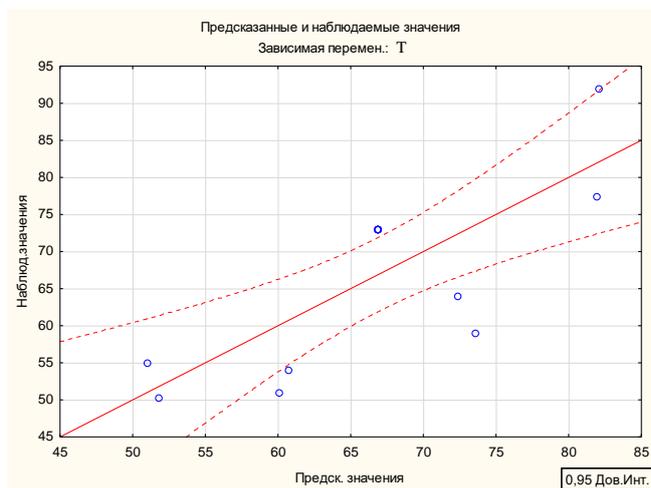


Рисунок К7 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной T

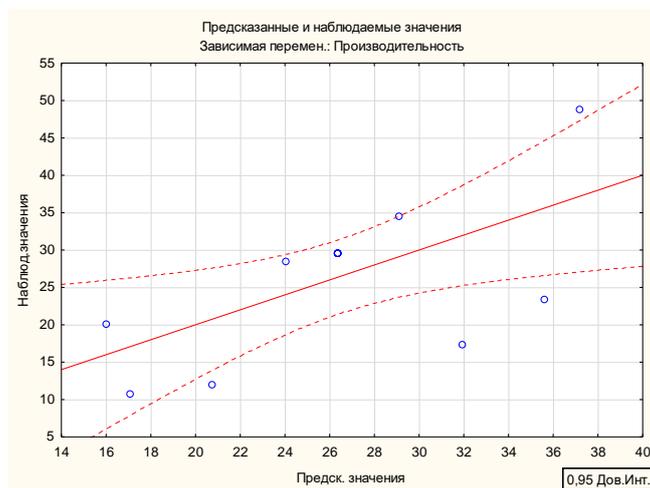


Рисунок К8 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной Q

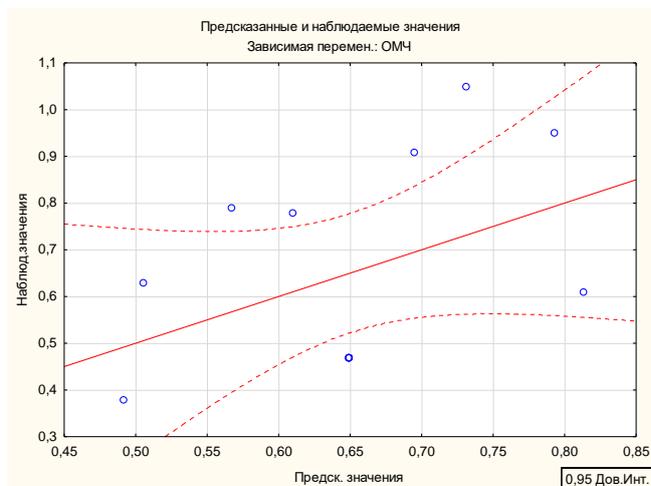


Рисунок К9 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной $ОМЧ$

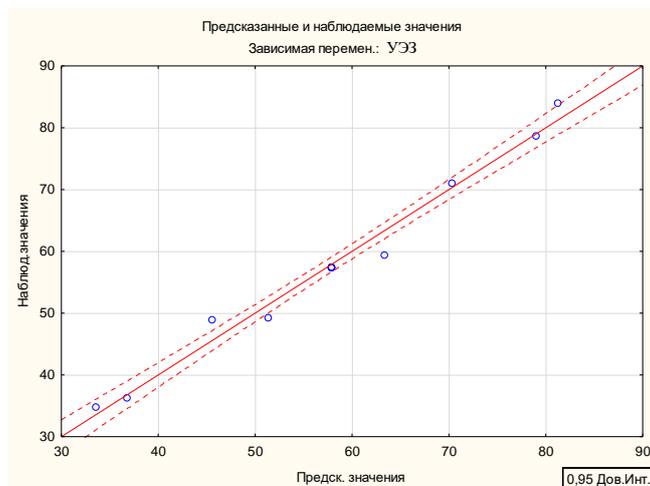


Рисунок К10 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной $УЭЗ$

Второй резонатор СВЧ-воскотопки с резонаторами в виде сферы в кольцевом резонаторе

Зависимая переменная – температура нагрева воскового сырья (T).

Независимые переменные (факторы, предикторы): удельная мощность генератора ($P_{уд}$), продолжительность воздействия ЭМП СВЧ (τ) (табл. 4.15).

Предсказательная сила полученной регрессионной модели **низкая**, так как значение коэффициента детерминации меньше 0,7 ($R^2 = 0,646$). То есть, дисперсия отклика на 64,6% определяется независимыми переменными. Остальные 35,4% дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически значима: $F = 9,12$; $p = 0,006$. По отдельности статистически значимо влияют на отклик все переменные ($P < 0,05$) (табл. К11).

Таблица К11 – Итоги регрессии для зависимой переменной T

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t-Стьюдента	p-знач.
Св.член			-10,56	22,75	-0,46	0,653
$P_{уд}$	0,500	0,188	0,039	0,015	2,66	0,024
τ	0,629	0,188	339,0	101,5	3,34	0,007

Таким образом, были получены параметры линейного уравнения регрессии

$$Y = a_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_n.$$

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$T = 121,95 - 0,14 \cdot P_{уд} + 90,54 \cdot \tau + 5,81 \cdot 10^{-5} \cdot P_{уд}^2 + 0,13 \cdot P_{уд} \cdot \tau + 506,59 \cdot \tau^2.$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: τ и $P_{уд}$.

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с положительными коэффициентами (τ и $P_{уд}$) приводит к увеличению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно точно соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вблизи теоретической прямой и в границах диапазона доверительной вероятности для 95%. Так как большинство точек сосредоточено вблизи теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков небольшая. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

Зависимая переменная – производительность (Q, кг/ч).

Предсказательная сила полученной регрессионной модели **низкая**, так как значение коэффициента детерминации меньше 0,7 ($R^2 = 0,670$). То есть, дисперсия отклика на 67,0% определяется независимыми переменными. Остальные 33,0% дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически значима: $F = 10,17$; $p = 0,004$. По отдельности статистически значимо влияют на отклик только переменная τ ($P < 0,05$) (табл. К12).

Таблица К12 – Итоги регрессии для зависимой переменной Q

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t-Стьюдента	p-знач.
Св.член			92,93	26,61	3,49	0,006
$P_{уд}$	-0,224	0,182	-0,021	0,017	-1,23	0,246
τ	-0,788	0,182	-514,9	118,7	-4,34	0,001

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$Q = 199,92 - 0,09 \cdot P_{y\partial} - 2352,71 \cdot \tau + 1,4221 \cdot 10^{-5} \cdot P_{y\partial}^2 + 0,43 \cdot P_{y\partial} \cdot \tau + 8091,01 \cdot \tau^2.$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: τ и $P_{уд}$.

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с отрицательными коэффициентами (τ и $P_{уд}$) приводит к уменьшению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

На **невысокую** математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно **редко** соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вдали теоретической прямой и за пределами границ диапазона доверительной вероятности для 95%. Так как большинство точек удалены от теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков значительная. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

Зависимая переменная – ОМЧ.

Предсказательная сила полученной регрессионной модели **низкая**, так как значение коэффициента детерминации меньше 0,7 ($R^2 = 0,501$). То есть, дисперсия отклика на 50,1% определяется независимыми переменными. Остальные 49,9% дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически **не значима**: $F = 5,02$; $p = 0,031$. По отдельности статистически значимо влияют на отклик только переменная $P_{уд}$ ($P < 0,05$) (табл. К13).

Таблица К13 – Итоги регрессии для зависимой переменной $ОМЧ$

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t-Стьюдента	p-знач.
Св.член			1,97	0,49	4,04	0,002
$P_{уд}$	-0,578	0,223	-0,0008	0,0003	-2,59	0,027
τ	-0,409	0,223	-3,97	2,17	-1,83	0,097

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$ОМЧ = 2,98 - 0,01 \cdot P_{y\partial} - 24,52 \cdot \tau - 7,34 \cdot 10^{-8} \cdot P_{y\partial}^2 + 0,01 \cdot P_{y\partial} \cdot \tau + 37,19 \cdot \tau^2.$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: $P_{уд}$ и τ .

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с отрицательными коэффициентами ($P_{уд}$ и τ) приводит к уменьшению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

На **низкую** математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно **редко** соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вдали теоретической прямой и за пределами границ диапазона доверительной вероятности для 95%. Так как большинство точек удалены от теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков значительная. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

Зависимая переменная – удельные энергетические затраты (УЭЗ).

Предсказательная сила полученной регрессионной модели очень высока, так как значение коэффициента детерминации близко к 1 ($R^2 = 0,974$). То есть, дисперсия отклика на 97,4% определяется независимыми переменными. Остальные 2,6% дисперсии являются случайными, то есть детерминируются не учтенными факторами. В целом модель статистически значима: $F = 191,1$; $p < 0,001$. Все переменные по отдельности статистически значимо влияют на отклик ($P < 0,05$) (табл. К14).

Таблица К14 – Итоги регрессии для зависимой переменной УЭЗ

Параметры	БЕТА	Ст.Ош. - БЕТА	В	Ст.Ош. - В	t-Стьюдента	p-знач.
Св.член			-96,81	17,46	-5,55	<0,001
$P_{уд}$	0,301	0,051	0,067	0,011	5,95	<0,001
τ	0,940	0,051	1449,9	77,9	18,62	<0,001

Расчетная формула, позволяющая спрогнозировать значение отклика в конкретном случае, имела вид:

$$УЭЗ = 0,01 - 1,32 \cdot 10^{-7} \cdot P_{уд} + 0,03 \cdot \tau - 2,81 \cdot 10^{-10} \cdot P_{уд}^2 + P_{уд} \cdot \tau - 0,55 \cdot \tau^2.$$

Из таблицы также видно относительное влияние каждого предиктора на отклик. Это влияние оценивается по абсолютным величинам стандартизованных коэффициентов регрессии (Бета). По силе влияния на отклик предикторы расположились по убыванию в следующем порядке: $P_{уд}$ и τ .

Учитывая знаки коэффициентов, следует понимать, что увеличение значений предикторов с положительными коэффициентами ($P_{уд}$ и τ) приводит к увеличению прогнозируемого значения отклика.

На математическую адекватность регрессионной модели указывают также график зависимости между фактическими и предсказанными значениями отклика.

Предсказанные значения достаточно точно соответствуют наблюдаемым значениям, так как большинство точек находится вблизи теоретической прямой и в границах диапазона доверительной вероятности для 95%. Так как большинство точек сосредоточено вблизи теоретической прямой регрессии, средняя величина остатков небольшая. Остатки – это разности между предсказанными значениями отклика и фактическими.

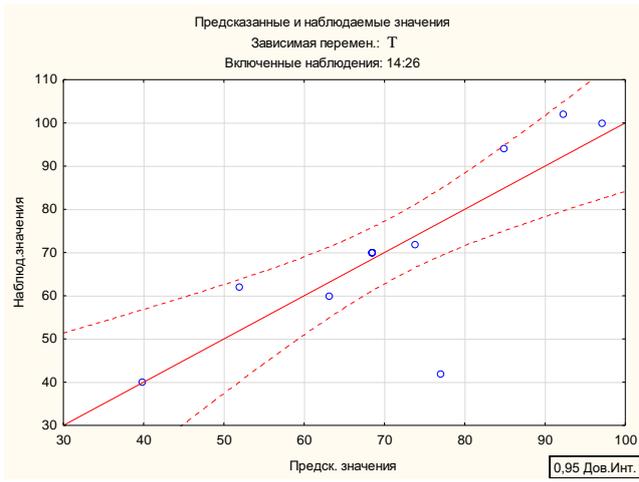


Рисунок K11 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной T

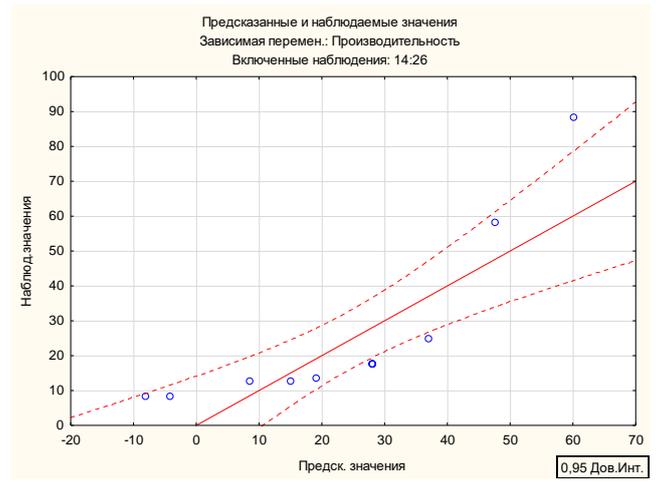


Рисунок K12 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной Q

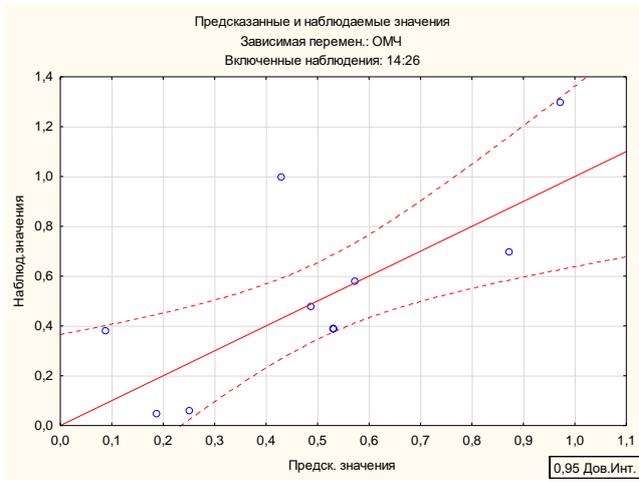


Рисунок K13 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной $OMЧ$

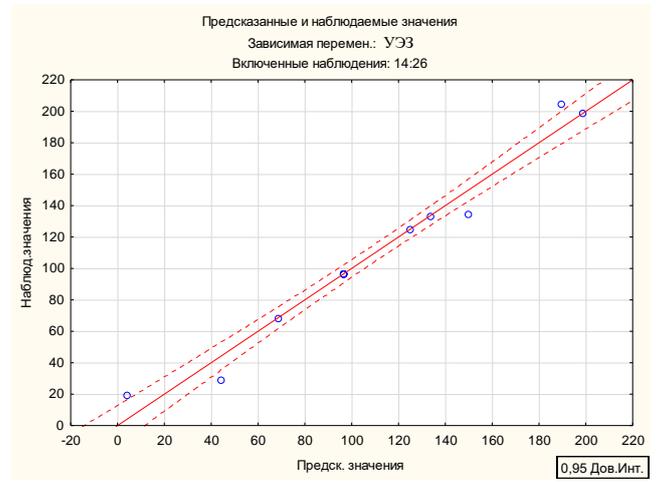


Рисунок K13 – Предсказанные и наблюдаемые значения для переменной $UЭЗ$

**Рекомендации по эксплуатации СВЧ-воскотопки
непрерывно-поточного действия**

Разработанная СВЧ-воскотопка с полусферическими резонаторами относится к микроволновому оборудованию, работающему на частоте 2450 МГц. Эксплуатация подобного оборудования в России регламентируется нормами СанПиН 2.2.4./2.1.8.055-96 «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона», которые предусматривают, что уровень плотности излучения на расстоянии 1,5 метра от оборудования не должен превышать 10 мкВт/см².

Перед началом и во время эксплуатации СВЧ-воскотопки оператором должен осуществляться контроль следующих параметров:

1. Электропитание СВЧ-воскотопки возможно только от электросети 220 В с надлежащими характеристиками, не допускается использование розетки без кабеля заземления.

2. Эксплуатация СВЧ-воскотопки запрещена в помещении с повышенной влажностью, вблизи объектов хранения легковоспламеняющихся веществ.

3. Проверка работы УЗО и вентилятора охлаждения магнетронов перед началом эксплуатации СВЧ-воскотопки.

4. Категорически запрещена «холостая» работа магнетронов – отсутствие сырья в резонаторной камере.

5. Контроль отсутствия в сырье металлосодержащих предметов – кусков проволоки, оставшейся от сотовых рамок. Это предотвратит образование электрического пробоя, что приводит к выходу из строя магнетронов.

6. Санитарная обработка основных узлов и консервация СВЧ-воскотопки после окончания переработки воскового сырья.

При переработке воскового сырья следует учитывать вид содержащегося в нем меда (липовый, каштановый, акациевый...) и регулировать продолжительность воздействия ЭМП СВЧ.

Консервация СВЧ-воскотопки на зимний период предусматривает хранение в защищенном от влажности и воды укрытии. При необходимости – упаковка установки и основных ее узлов в парафиновую бумагу для предотвращения образования коррозионных процессов на их поверхностях.

ПРИЛОЖЕНИЕ Н

(справочное)

**Протокол измерений плотности потока энергии ЭМП СВЧ-воскотопки
с полусферическими резонаторами****ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ВОЛГО-ВЯТСКИЙ ЦЕНТР ИСПЫТАНИЙ»
(ООО «ВВЦИ»)**

603155, РОССИЯ, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Семашко, д. 2, пом. П2

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ603155, РОССИЯ, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Семашко, д. 2, пом. П2;
606093, РОССИЯ, Нижегородская область, Володарский район, рабочий поселок Решетиха, ул. Затылкова, д. 2А
тел. (831) 262-18-60; e-mail: vvci-nn@yandex.ru

Уникальный номер записи об аккредитации в реестре аккредитованных лиц RA.RU.21AO10

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника
лаборатории Носова И.П.
(подпись) (инициалы)

19.06.2025

**ПРОТОКОЛ**

исследований (испытаний), измерений плотности потока энергии электромагнитного поля

№ 2-ППЭ/14336/ПК от 19.06.2025
(идентификационный номер, дата протокола)

1. Заказчик (наименование организации): Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»
2. Юридический и фактический адрес заказчика: 606340, Нижегородская обл., г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а
3. Адрес, место проведения измерений: Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Агрохимиков 26
4. Дата и время проведения измерений: 18.06.2025, 10:00-12:00
5. Цель проведения измерений: Производственный контроль

6. Сведения о средствах измерения:

Наименование средства измерения	Заводской номер	Сведения о результатах поверки СИ ФИФ ОЕИ (№ свидетельства)	Дата поверки	Действительно до:	Погрешность измерения
Измеритель плотности потока энергии электромагнитного поля ПЗ-33М	80824	С-БН/24-02-2025/411963143, выдал ФБУ "НИЖЕГОРОДСКИЙ ЦСМ"	24.02.2025	23.02.2026	Для диапазона: (1-5) мкВт/см ² - ±3%. Для диапазона: >5 мкВт/см ² - ±2%
Рулетка измерительная металлическая Р10УЗК	28	С-АК3/31-10-2024/383165250	31.10.2024	30.10.2025	для мм интервала - ± 0,2 мм; для отрезка шкалы 1 м и более - ±(0,4+0,2*(L-1)) мм, где L – число полных и неполных метров
Секундомер электронный "Интеграл С-01"	407507	С-ГХС/05-09-2024/367812619	05.09.2024	04.09.2025	± (9,6×10 ⁻⁶ ×Тх+0,01) с., Тх – значение изм. интервала времени в сек.

7. Сведения о средствах измерений окружающей среды:

Наименование средства измерения	Заводской номер	Сведения о результатах поверки СИ ФИФ ОЕИ (№ свидетельства)	Дата поверки	Действительно до:	Погрешность измерения
Измеритель параметров микроклимата "Метеоскоп" (в комплекте с шаровым термометром (зачерненным шаром), зав. №552)	105511	С-ДЮП/15-08-2023/270497843	15.08.2023	14.08.2025	Температура окружающего воздуха ± 0.2 °С; атмосферное давление ± 0.13 кПа; относительная влажность: ±3%; скорость воздушного потока, м/с - в диапазоне от 0,1 до 1 м/с: ±(0.05+0.05V) м/с

8. Условия проведения исследований (испытаний), измерений:

Наименование рабочей зоны	Температура воздуха, °С	Атмосферное давление, кПа	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Помещение с оборудованием	23.0	101.2	41.0	<0.1

9. Нормативный документ, устанавливающий метод проведения измерений и регламентирующий ПДУ измеряемого фактора:

Область действия	Наименование нормативного документа
Измерение	МИ ПЭМРЧ.ИНТ-09.01-2018 Электромагнитные поля. Методика измерений параметров переменного электромагнитного поля радиочастотного диапазона для целей специальной оценки условий труда
Регламентирующие ПДУ измеряемого фактора	СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" (утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года N 2)

Протокол № 2-ППЭ/14336/ПК

Стр. 2 из 3

Протокол не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения лаборатории. Результаты относятся только к объектам, прошедшим испытания или отбор. Основание – ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Межгосударственный стандарт. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.

10. Результаты измерений:

№ п/п	Место проведения измерений, рабочее место, сведения об оборудовании	Время воздействия, мин*	Высота от уровня пола, м	Результаты (не менее трех) измерений, мкВт/см ²	U095	Значение по нормам
	Помещение с СВЧ-установкой с полусферическими резонаторами для вытопки воска	60	0.5	41;26;30;37	6.8	1000
			1.0	110;96;112;95	9	
			1.7	214;188;203;196	11.1	

Основные обозначения: ПДУ – предельно-допустимые уровни. U095 – значение расширенной неопределенности для P=0.95.

* Значения предоставлены организацией-заказчиком. ИЛ не несет ответственность за достоверность сведений, предоставленных заказчиком.

Примечание: Если с результатом измерений стоит знак «<» в графе «Результаты измерений», то данный результат менее нижнего предела методики измерений. Результат не может быть использован для дальнейшего анализа в рамках реализации процедур заказчика.

11. Сотрудники организации, проводившие измерения:

Эксперт по анализу факторов условий труда
(должность)


(подпись)

Федотов А.Р.
(Ф.И.О.)

12. Сотрудники организации, составившие протокол:

Эксперт по анализу факторов условий труда
(должность)


(подпись)

Федотов А.Р.
(Ф.И.О.)

13. Дата выдачи протокола: 19.06.2025

о к о н ч а н и е п р о т о к о л а

Протокол № 2-ППЭ/14336/ПК

Стр. 3 из 3

Протокол не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения лаборатории. Результаты относятся только к объектам, прошедшим испытания или отбор. Основание – ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Межгосударственный стандарт. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.