

На правах рукописи



ШЕВЕЛЕВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

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

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Княгинино – 2025

Работа выполнена в Государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (ГБОУ ВО НГИЭУ) на кафедре «Электрификация и автоматизация»

**Научный
руководитель:**

доктор технических наук, профессор
Михайлова Ольга Валентиновна

**Официальные
оппоненты:**

Цугленок Николай Васильевич

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, АНО ДПО НОПЦ «Солнечно-земной энергетике и биоэнергетики СО РАН», директор

Попов Виталий Матвеевич

доктор технических наук, профессор, Институт агро-экологии – филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет», заведующий кафедрой энергообеспечения и автоматизации технологических процессов

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный аграрный университет»

Защита состоится 02.10.2025 в 10:00 на заседании диссертационного совета 72.2.016.02 при государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (ГБОУ ВО НГИЭУ) по адресу: 606340, РФ, г. Княгинино, ул. Октябрьская, дом 22а, аудитория 207.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГБОУ ВО НГИЭУ и на сайте <https://ngie.u.ru/state-scientific-attestation/dissovet-72201602/>.

Автореферат разослан _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тареева Оксана Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 хозяйств, 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 конструктивно-технологическими параметрами, реализующими способ вытопки воска при сниженных эксплуатационных затратах, позволяющий отделить из воскового сырья остаточную фракцию меда, является актуальной задачей.

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 конструкционные 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 ротатабельного 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 %).

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение включает в себя актуальность выбранной темы, степень ее разработанности, цель, объект и предмет исследования, научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, методику исследований, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов.

В первом разделе «Оценка современного состояния исследуемой темы» проанализированы объемы производства пчеловодческой продукции в РФ, существующие воскотопки и требования, предъявляемые к качеству пчеловодческой продукции. Приведены физические характеристики воска.

Второй раздел «Теоретическое обоснование конструктивно-технологических параметров СВЧ-воскотопок» содержит разработанную методику согласования ЭД-параметров резонаторов с удельной мощностью генераторов, электрофизическими параметрами сырья и скоростью его нагрева:

1. Вычислить объем ($V_{рез}, м^3$) и площадь поверхности ($S, м^2$) резонатора и выбрать мощность генератора ($P_{ген}, Вт$).

2. Вычислить собственную добротность (Q) объемного резонатора:

$$Q = \frac{2 \cdot V}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot S}, \quad (1)$$

где $1,716 \cdot 10^{-6}$, m – толщина поверхностного слоя алюминиевого корпуса резонатора.

3. Вычислить напряженность электрического поля (E , кВ/см) в резонаторе с учетом мощности генератора ($P_{ген}, Вт$), частоты ЭМП (f , Гц) и диэлектрической проницаемости вакуума $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м по методике Ю. Н. Корчагина:

$$E = \frac{Q \cdot P_{ген}}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \epsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_{рез}}. \quad (2)$$

4. Определить зависимость диэлектрической проницаемости (ϵ_r) и фактора диэлектрических потерь (k) воска от температуры по данным И. А. Рогова.

5. Вычислить диэлектрические параметры меда через его удельную электропроводность (σ , См/м) по методике И. А. Рогова:

$$\epsilon_r = \frac{\sigma}{(2 \cdot \pi \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12})}, \quad k = \frac{\sigma}{(\omega \cdot \epsilon_0 \cdot tg \delta)}, \quad (3)$$

где $tg \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

6. Вычислить диэлектрическую проницаемость двухкомпонентной смеси (воска с медом), используя формулу Лихтенеккера. Для мелкодисперсной смеси с хорошо перемешенными компонентами:

$$\ln \epsilon_r = x_1 \cdot \ln \epsilon_1 + (1 - x_1) \cdot \ln \epsilon_2, \quad (4)$$

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.

7. Вычислить нагруженную добротность резонаторов (Q_m) с учетом диэлектрической проницаемости сырья (ϵ_r) (воск или воск с медом):

$$Q_m = \frac{Q}{\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (5)$$

8. Вычислить напряженность ЭП в сырье (E_m , кВ/см) объемом (V_m , см³). Варьировать объем загружаемого сырья с соответствующими значениями диэлектрической проницаемости:

$$E_m = \frac{Q_m \cdot P_{\text{ген}}}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m}. \quad (6)$$

9. Вычислить удельную мощность, генерируемую в единице объема сырья (Вт/см³) по методике А. В. Лыкова:

$$P_{y\partial} = 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot k \cdot E_m^2 = 1362,2 \cdot 10^{-6} \cdot k \cdot E_m^2, \text{ Вт} / \text{м}^3 = \\ = 1362,2 \cdot 10^{-6} \cdot k \cdot E_m^2 \cdot 10^6, \text{ Вт} / \text{см}^3 = 1362,2 \cdot k \cdot E_m^2. \quad (7)$$

10. Вычислить при удельной мощности генератора ($P_{y\partial}$, Вт/см³) продолжительность воздействия ЭМП СВЧ (τ) с учетом напряженности ЭП (E_m , кВ/см):

$$\Delta \tau = 1,67 \cdot \frac{\Delta T}{P_{y\partial}} \cdot \rho \cdot C = \frac{1,67 \cdot \rho \cdot C \cdot \Delta T}{1362,2 \cdot k \cdot E_m^2}. \quad (8)$$

11. Вычислить производительность (Q , кг/ч) воскотопки как отношение массы загрузки сырья к продолжительности воздействия ЭМП СВЧ:

$$Q = G \div \tau. \quad (9)$$

12. Оценить эффективную конструкцию двухрезонаторной СВЧ-воскотопки сравнением собственных добротностей, напряженностей ЭП в резонаторе и в сырье, потребляемой мощности, удельных энергетических затрат, компактности.

Результаты вычисления ЭД-параметров системы «генератор–резонатор–сырье» приведены в таблице 1. Значения собственной добротности исследуемых резонаторов находятся в пределах 71300–94800, нагруженной добротности – 44300–62300, напряженности ЭП – 2,75–7,31 кВ/см.

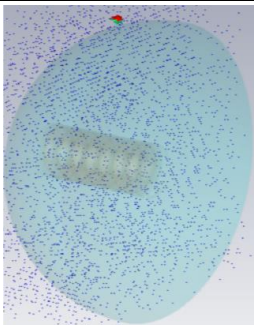
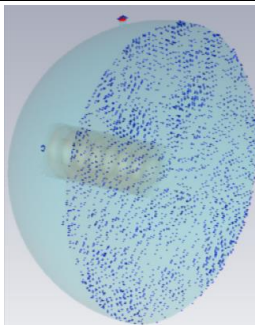
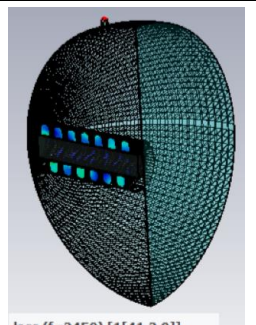
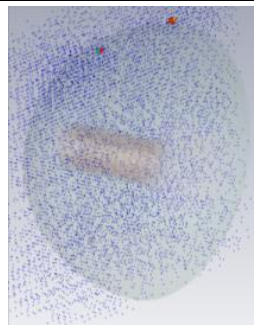
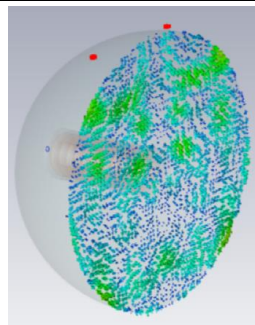
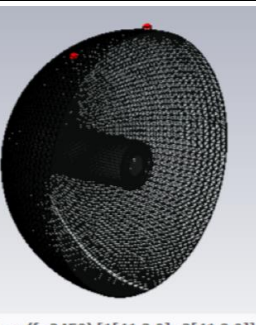
Таблица 1 – Значения ЭД-параметров разработанных резонаторов

№ воскотопки	1		2		3		4	
№ резонатора	1	2	1	2	1	2	1	2
Мощность генераторов, кВт	0,85	1,7	0,85	1,7	0,85	1,7	0,85	1,7
Объем резонатора, (м ³) и его площадь (м ²)	0,06/ 0,882	0,06/ 0,882	0,06/ 0,4	0,06/ 0,98	0,06/ 0,748	0,06/ 0,98	0,06/ 0,847	0,06/ 0,847
Собственная добротность	79254	79254	94794	71329	71329	94794	80224	80224
Нагруженная добротность	49246	52175	58878	46927	44304	62364	51892	52783
Напряженность в резонаторе, кВ/см	3,06	6,11	3,65	5,5	2,75	7,31	3,09	6,18
Напряженность в сырье, кВ/см	4,88	11,4	5,84	10,44	7,31	13,87	5,57	11,5

Примечание по номерам воскотопок: 1 – полусферические резонаторы; 2 – сферический резонатор в кольцевом резонаторе; 3 – взаимосвязанные цилиндрический со сферическим резонаторами; 4 – взаимосвязанные цилиндрические резонаторы.

Результаты вычислений основных ЭД-параметров полусферических резонаторов при заданной мощности магнетронов с расположенными внутри шнеком и восковым сырьем представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты вычислений ЭД-параметров полусферических резонаторов в программе CST Microwave Studio

	Напряженность ЭП в сырье, В/м	Плотность поверхностных токов, А/м	Удельная мощность, Вт/м ³																													
Первый резонатор, 850 Вт	 e-field (f=2450) [1[41.2,0]] Frequency 2450 MHz Phase 0 Maximum 464767 V/m	 h-field (f=2450) [1[41.2,0]] Frequency 2450 MHz Phase 0 Maximum 55.4833 A/m	 loss (f=2450) [1[41.2,0]] Frequency 2450 MHz Cross section C Cutplane at Z 0.000 Maximum 77214.2 W/m ³ Minimum 0 W/m ³																													
	Нагруженная добротность резонатора																															
	<table><tr><th>Material/Solid</th><th>Conductivity</th><th>Mu</th><th>Loss/W</th><th>Loss/%</th><th>Q</th></tr><tr><td>**Cond. Enclosure**</td><td>5.8000e+07</td><td>1</td><td>5.9483e-02</td><td>30.1</td><td>5.3759e+04</td></tr><tr><td>**Sum of Surface Losses**</td><td></td><td></td><td>5.9483e-02</td><td>30.1</td><td>5.3759e+04</td></tr><tr><td>**Volume Losses**</td><td></td><td></td><td>1.3784e-01</td><td>69.9</td><td>2.3198e+04</td></tr><tr><td>**Sum**</td><td></td><td></td><td>1.9733e-01</td><td></td><td>1.6205e+04</td></tr></table>			Material/Solid	Conductivity	Mu	Loss/W	Loss/%	Q	**Cond. Enclosure**	5.8000e+07	1	5.9483e-02	30.1	5.3759e+04	**Sum of Surface Losses**			5.9483e-02	30.1	5.3759e+04	**Volume Losses**			1.3784e-01	69.9	2.3198e+04	**Sum**			1.9733e-01	
Material/Solid	Conductivity	Mu	Loss/W	Loss/%	Q																											
Cond. Enclosure	5.8000e+07	1	5.9483e-02	30.1	5.3759e+04																											
Sum of Surface Losses			5.9483e-02	30.1	5.3759e+04																											
Volume Losses			1.3784e-01	69.9	2.3198e+04																											
Sum			1.9733e-01		1.6205e+04																											
Второй резонатор, 1700 Вт	 e-field (f=2450) [1[41.2,0]+2[41.2,0]] Frequency 2450 MHz Phase 0 Maximum 2.50837e+06 V/m	 h-field (f=2450) [1[41.2,0]+2[41.2,0]] Frequency 2450 MHz Phase 0 Maximum 78.8513 A/m	 loss (f=2450) [1[41.2,0]+2[41.2,0]] Frequency 2450 MHz Maximum 5.74571e+07 W/m ³ Minimum 0 W/m ³																													
	Нагруженная добротность резонатора																															
	<table><tr><th>Material/Solid</th><th>Conductivity</th><th>Mu</th><th>Loss/W</th><th>Loss/%</th><th>Q</th></tr><tr><td>**Cond. Enclosure**</td><td>5.8000e+07</td><td>1</td><td>1.4331e-01</td><td>0.281</td><td>5.5765e+04</td></tr><tr><td>**Sum of Surface Losses**</td><td></td><td></td><td>1.4331e-01</td><td>0.281</td><td>5.5765e+04</td></tr><tr><td>**Volume Losses**</td><td></td><td></td><td>5.0916e+01</td><td>99.7</td><td>4.4372e+02</td></tr><tr><td>**Sum**</td><td></td><td></td><td>5.1060e+01</td><td></td><td>4.4247e+02</td></tr></table>			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	
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																											

Результаты вычислений ЭД-параметров полусферических резонаторов в программе CST Microwave Studio: напряженность ЭП в сырье в первом резонаторе – 4,64 кВ/см, во втором – 25 кВ/см, максимальная плотность поверхностных токов в первом резонаторе – 0,5 А/см, во втором – 0,8 А/см, удельная мощность соответственно 0,77 и 5,7 кВт/см³, нагруженная добротность – 53759 и 55765.

Проведено обоснование конструктивно-технологических параметров и режимов работы СВЧ-воскотопки непрерывно-поточного действия с полусферическими резонаторами (рисунок 1).

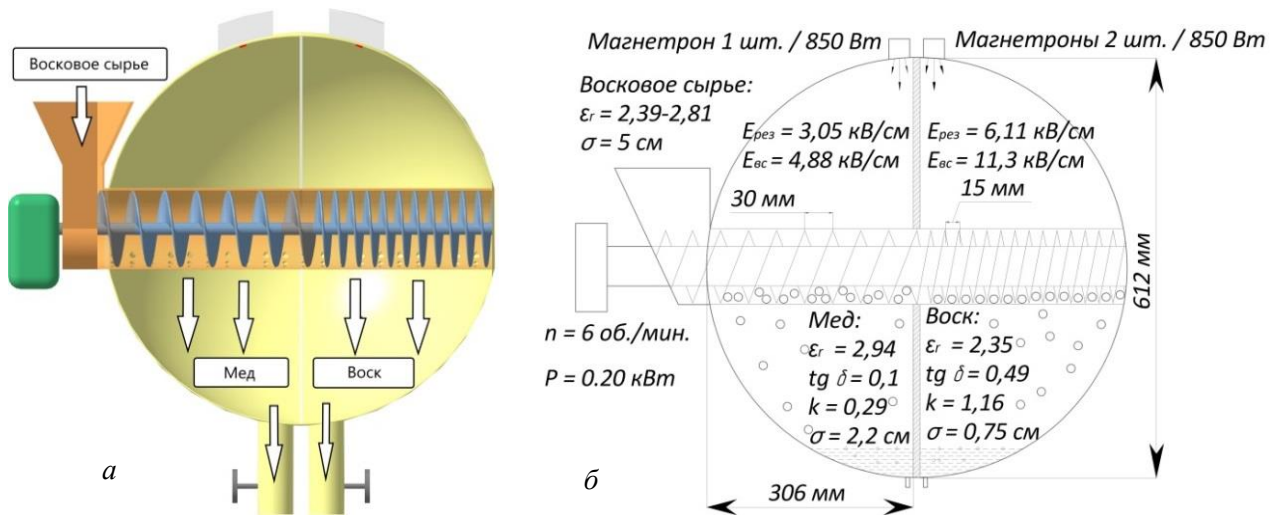


Рисунок 1 – СВЧ-воскотопка с полусферическими резонаторами:
а) схематическое изображение процесса вытопки воска;
б) конструктивно-технологические параметры

Расстояние между витками нагнетательного шнека согласовано с глубиной проникновения волны в сырье, что позволяет осуществлять его равномерный нагрев. Глубину проникновения волны в сырье оценивали с учетом изменения диэлектрических параметров в процессе нагрева.

Исследования показывают, что глубина проникновения волны в восковое сырье в процессе нагрева (25–65 °С) уменьшается с 5,0 до 0,75 см. Следовательно, шаг витков шнека во втором резонаторе не должен превышать двух глубин проникновения волны (1,5 см).

Частота вращения фторопластового шнека и мощности магнетронов на соответствующих резонаторах согласованы так, чтобы фракции воскового сырья в процессе перемещения нагрелись до необходимых температур плавления и через перфорацию корпуса шнека и соответствующие запердельные волноводы попали в приемные емкости.

Интерференция волн в полусферическом резонаторе. По методике Б. М. Яворского проводили вычисление интерференции волн двух излучателей, расположенных во втором резонаторе с определенным сдвигом (рисунок 2). Для обоснованного выбора месторасположения двух магнетронов, работающих на одной частоте, мощности, с одинаковым анодным напряжением, на полусферическом резонаторе с диаметром, пятикратным длине волны (61,2 см), необходимо определить, как будут интерферироваться волны. Волны, возбуждаемые от излучателей S_1 и S_2 , описываются выражениями:

$$S_1 = E_1 \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot r_1 + \alpha_1\right), \quad S_2 = E_2 \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot r_2 + \alpha_2\right), \quad (10)$$

где E_1, E_2 – амплитуды напряженностей электрических полей соответствующих излучателей; ω – частота ЭМП; α_2, α_1 – начальные фазы волн; r_1, r_2 – ход соответствующих волн; $r_2 - r_1$ – разность хода волн; λ – длина волны, см; $(2 \cdot \pi / \lambda)$ – волновое число.

Амплитуда напряженности электрического поля (E , кВ/см) в точке M :

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \cos[(2 \cdot \pi / \lambda) \cdot (r_2 - r_1) - (\alpha_2 - \alpha_1)]. \quad (11)$$

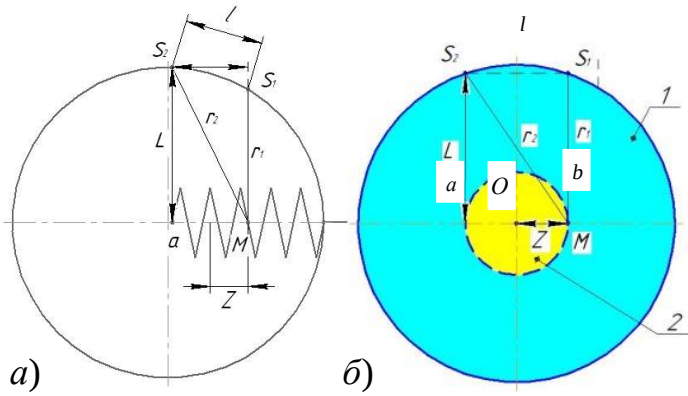


Рисунок 2 – Схема расположения двух источников излучения на полусферическом резонаторе с фторопластовым шнеком:

а) вид сбоку;

б) вид со стороны основания;

1 – полусферический резонатор;

2 – фторопластовый шнек

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

$$E_{\text{макс.}} = E_1 + E_2, \quad E_{\text{мин.}} = |E_1 - E_2|. \quad (12)$$

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

$$(2 \cdot \pi / \lambda) \cdot (r_2 - r_1) - (a_2 - a_1) = 2 \cdot m \cdot \pi, \quad (13)$$

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

Минимальная амплитуда напряженности ЭП в точке М будет при условии:

$$(2 \cdot \pi / \lambda) \cdot (r_2 - r_1) - (a_2 - a_1) = (2 \cdot m - 1) \cdot \pi, \quad (14)$$

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

Условия интерференционных максимумов и минимумов двух волн сантиметрового диапазона:

$$r_2 - r_1 = \pm m \cdot \lambda + \frac{a_2 - a_1}{2 \cdot \pi} \cdot \lambda \quad (\text{максимумы}); \quad (15)$$

$$r_2 - r_1 = \pm (2 \cdot m - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} + \frac{a_2 - a_1}{2 \cdot \pi} \cdot \lambda \quad (\text{минимумы}). \quad (16)$$

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 $r_2 - r_1 = (2 \cdot m - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} = (2 \cdot 1 - 1) \cdot \frac{12,24}{2} = 6,12$ см (минимум). Максимум волн нулевого порядка ($m = 0$) находится в точке О, равноудаленный 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:

$$r_2 - r_1 = l \cdot Z \div L. \quad (17)$$

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° . Тогда максимуму волн m -го и $(m+1)$ -го порядка соответствуют следующие значения:

$$Z_m = \frac{m \cdot \lambda \cdot L}{l} = \frac{1 \cdot 12,24 \cdot 30,6}{24,48} = 15,3 \text{ см}; \quad Z_{m+1} = \frac{(m+1) \cdot \lambda \cdot L}{l} = \frac{2 \cdot 12,24 \cdot 30,6}{24,48} = 30,6 \text{ см}, \quad (18)$$

разность хода волн кратна длине волны:

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

$$r_2 - r_1 = l \cdot Z / L = 24,48 \cdot 30,6 \div 30,6 = 24,48 \text{ см}. \quad (19)$$

Расстояние между соседними максимумами волн равно:

$$\lambda \cdot L / l = 12,24 \cdot 30,6 \div 24,48 = 15,3 \text{ см}. \quad (20)$$

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

Для исследования динамики нагрева воскового сырья учитывались изменения его электрофизических параметров в процессе воздействия ЭМП СВЧ. Поэтому анализированы, как изменяются в зависимости от температуры диэлектрическая проницаемость (ϵ_r), тангенс угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$), фактор диэлектрических потерь (k), теплоемкость (C , Дж/кг °С) и плотность (ρ , г/см³) воска и меда. Эмпирические выражения, описывающие зависимость диэлектрических параметров пчелиного воска от температуры, полученные по данным И. А. Рогова:

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

При загрузке шнека 90 % напряженность ЭП в восковом сырье составит $E_m = 11,3$ кВ/см. При такой напряженности ЭП удельные диэлектрические потери в диапазоне температур 45–65 °С составят:

$$P_{y\partial 2} = 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot k \cdot E^2 (B / \text{см}) =$$

$$= 1362,2 \cdot 10^{-6} \cdot (4...5,3) \cdot (11300)^2 = 0,69...0,92 \text{ Вт} / \text{см}^3. \quad (21)$$

Динамика нагрева воскового сырья в первом резонаторе при мощности генератора 0,85 кВт и воска во втором резонаторе при мощности генератора 1,7 кВт приведена на рисунке 3.

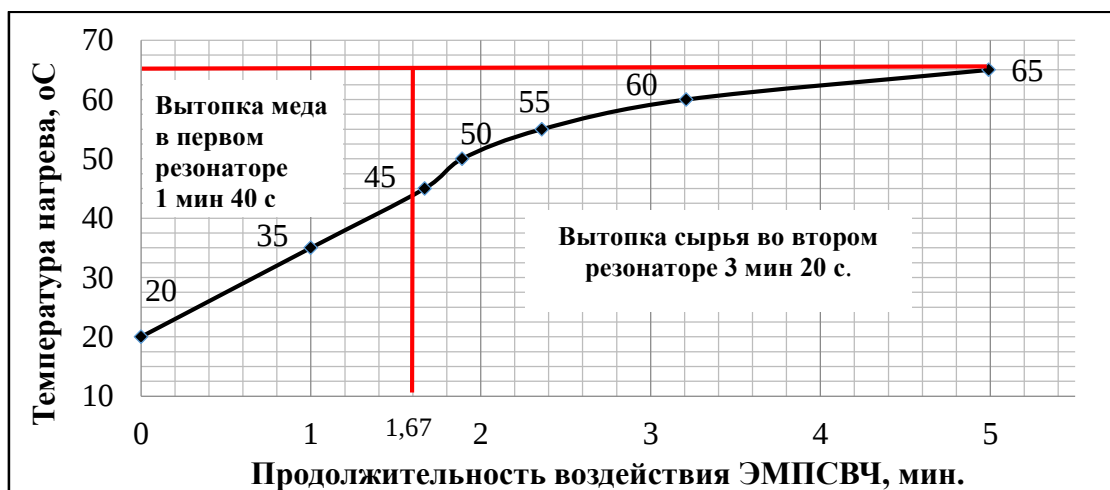


Рисунок 3 — Динамика нагрева воскового сырья в первом (0,85 кВт) и во втором (1,7 кВт) полусферических резонаторах

Сравнительный анализ воскотопок по основным критериям проектирования СВЧ-техники, а также с точки зрения компактности показывает, что наиболее эффективным является воскотопка с полусферическими резонаторами.

Третий раздел «Разработанные двухрезонаторные СВЧ-воскотопки непрерывно-поточного действия».

СВЧ-воскотопка с полусферическими резонаторами (патент 2770496) (рисунок 4) содержит две полусферы 1, 2, состыкованные с общим кольцевым диском 3. Особенности этой конструкции и обоснование параметров приведены на рисунке 1.

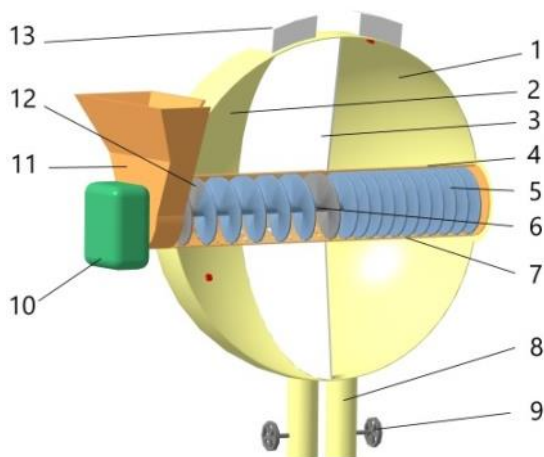


Рисунок 4 – СВЧ-воскотопка с полусферическими резонаторами:
1, 2 – резонаторы; 3 – кольцевой диск;
4 – фторопластовый корпус;
5 – фторопластовые витки нагнетательного шнека;
6 – фторопластовый вал;
7 – перфорированная часть корпуса;
8 – заперделные волноводы; 9 – шаровые краны;
10 – электропривод шнека;
11 – приемная емкость;
12 – неферромагнитные витки шнека;
13 – магнетроны

В четвертом разделе «Результаты исследования технологического процесса вытопки пчелиного воска с отделением меда» приведены регрессионные уравнения и обоснованные эффективные режимы работы СВЧ-воскотопок.

Исследования распределения теплового потока по поверхности воскового сырья при воздействии ЭМП СВЧ разной удельной мощности проводили с помощью дифференциального термометра Testo 845 и тепловизора FLIR T335.

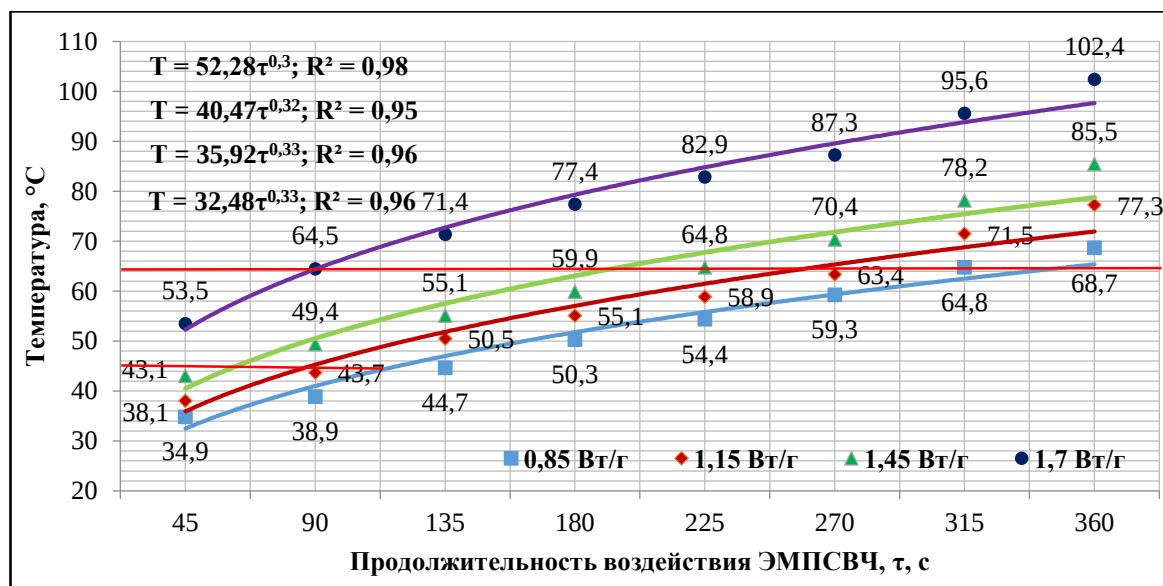


Рисунок 5 – Динамика нагрева пчелиного воска с содержанием меда менее 3 % при варьировании удельной мощностью генератора, Вт/г: 0,85; 1,15; 1,45; 1,7

*Исследования проводились в лабораторных условиях

Динамика нагрева воскового сырья при разных удельных мощностях генератора с содержанием меда менее 3 % (рисунок 5) описываются эмпирическими выражениями ($R^2 = 0.95\text{--}0.98$):

$$\begin{aligned} T &= 32,48 \cdot \tau^{0,33}, \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (0,85 Вт/г); } T = 35,92 \cdot \tau^{0,33}, \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (1,15 Вт/г); } \\ T &= 40,47 \cdot \tau^{0,32}, \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (1,45 Вт/г); } T = 52,28 \cdot \tau^{0,3}, \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (1,7 Вт/г).} \end{aligned} \quad (22)$$

Результаты исследования *органолептических* показателей, согласно ГОСТ 21179-2000 «Воск пчелиный», свидетельствуют, что цвет и структура на изломе опытного образца пасечного воска оценены по 8 баллов (максимальное значение). Контрольного образца: цвет оценен на 5 баллов, структура на изломе на 7 баллов. *Запах* обоих образцов оценен на 8 баллов. При температуре выше 70 °С происходит снижение общего микробного числа (ОМЧ) до ПДУ – 500 тыс. КОЕ/г. *Мед* по органолептическим и физико-химическим показателям оценивали согласно ГОСТ 19792-2017 «Мед натуральный. Технические условия». Результаты оценки опытного образца меда свидетельствуют о его соответствии действующим санитарным и ветеринарным нормам, пригодности для пищи.

Эффективные режимы термообработки воскового сырья в СВЧ-воскотопке с полусферическими резонаторами определяли через регрессионные модели, полученные при реализации: матрицы трехфакторного активного планирования эксперимента типа 2^3 (план Хартли) – для первого резонатора; рототабельного планирования второго порядка – для второго резонатора. Обработку результатов эксперимента проводили, пользуясь программой «STATISTICA 12».

Для *первого* резонатора критериями оптимизации служили: температура нагрева сырья T , °С; удельные энергетические затраты $УЭЗ$, кВт·ч/кг. При этом варьировали удельной мощностью генератора ($P_{уд}$: 0,6–0,9 Вт/г), продолжительностью воздействия (τ : 0,018–0,028 ч), содержанием меда в восковом сырье (k : 5–7 %).

Получены уравнения регрессии, описывающие зависимости критериев оптимизации от варьируемых параметров:

$$T = -17,71 + 0,014 \cdot P_{уд} + 1360,0 \cdot \tau + 2,40 \cdot k, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (23)$$

$$УЭЗ = -20,25 + 0,023 \cdot P_{уд} + 750,0 \cdot \tau + 0,500 \cdot k, \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}. \quad (24)$$

Эффективным режимом работы первого резонатора СВЧ-воскотопки 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.

Для *второго* резонатора критериями оптимизации служили: температура нагрева T , °С; производительность Q , кг/ч; общее микробное число $ОМЧ$, КОЕ/г· 10^6 ; удельные энергетические затраты $УЭЗ$, кВт·ч/кг. При этом варьировали удельной мощностью генератора ($P_{уд}$: 0,85–1,45 Вт/г), продолжительностью воздействия (τ : 0,0382–0,0618 ч). Построены поверхности откликов и их двумерные сечения в изолиниях моделей (рисунок 6).

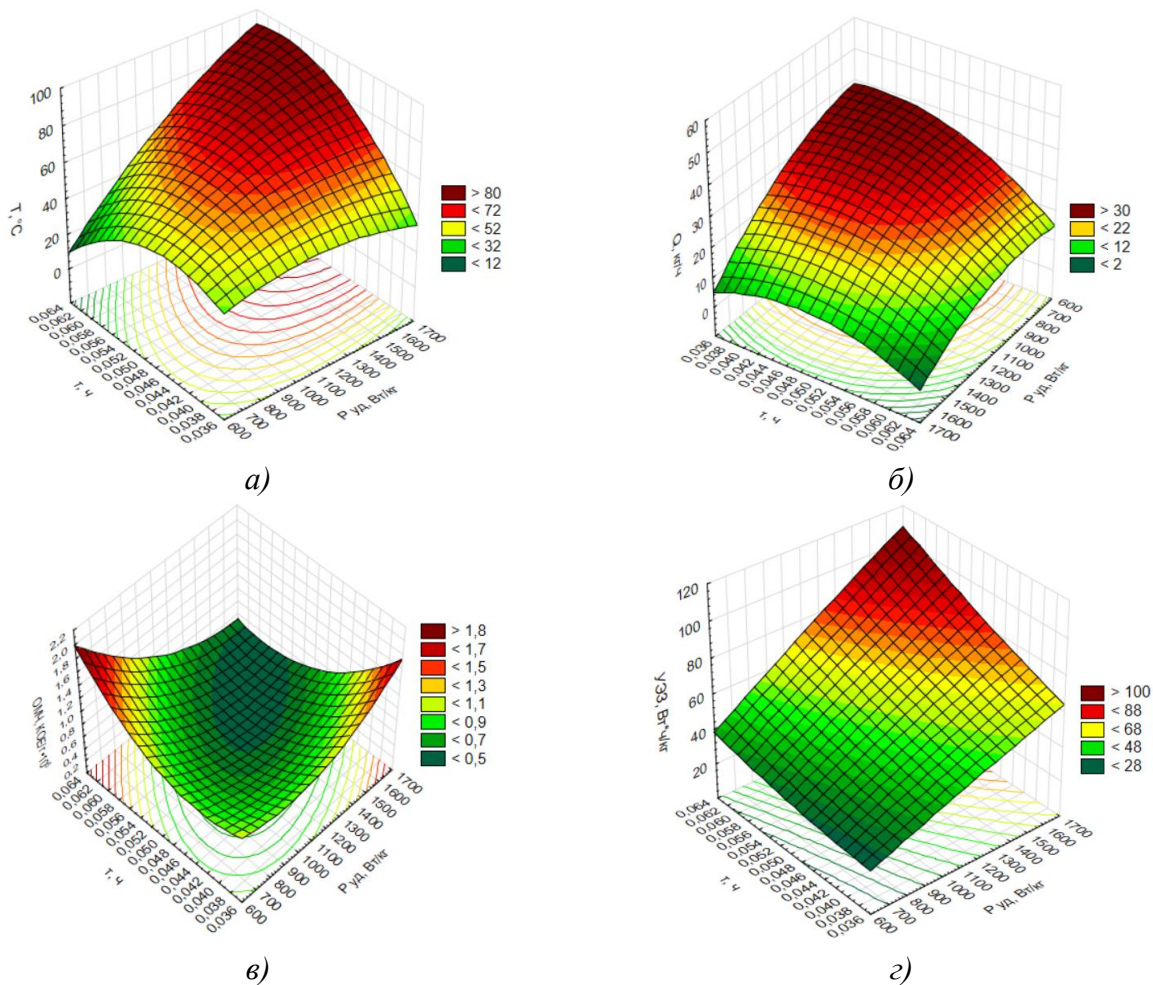


Рисунок 6 – Поверхности откликов и двумерные сечения в изолиниях трехфакторных моделей изменения: а) температуры сырья; б) производительности воскотопки; в) общего микробного числа; г) удельных энергетических затрат на вытопку воска

Получены уравнения регрессии, описывающие зависимости критериев оптимизации от варьируемых параметров:

$$T = -130,13 - 0,03 \cdot P_{y\partial} + 7580,24 \cdot \tau - 3,04 \cdot 10^{-5} \cdot P_{y\partial}^2 + 2,81 \cdot P_{y\partial} \cdot \tau - 1,03 \cdot 10^5 \cdot \tau^2, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (25)$$

$$Q = -16,43 - 0,01 \cdot P_{y\partial} + 2916,58 \cdot \tau - 2,15 \cdot 10^{-5} \cdot P_{y\partial}^2 + 0,63 \cdot P_{y\partial} \cdot \tau - 41425,88 \cdot \tau^2, \text{ кг/ч}; \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{ОМЧ} = & 4,96 + 0,01 \cdot P_{y\partial} - 172,02 \cdot \tau + 1,2298 \cdot 10^{-6} \cdot P_{y\partial}^2 - \\ & - 0,07 \cdot P_{y\partial} \cdot \tau + 2457,97 \cdot \tau^2, \text{ КОЕ/г} \cdot 10^6; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\text{УЭЗ} = 30,06 + 0,01 \cdot P_{y\partial} - 1309,25 \cdot \tau - 3,85 \cdot 10^{-6} \cdot P_{y\partial}^2 + P_{y\partial} \cdot \tau + 12145,42 \cdot \tau^2, \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}. \quad (28)$$

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. Общие удельные энергетические затраты на процесс вытопки воска в СВЧ-воскотопке 130 Вт·ч/кг.

Технические характеристики изготовленного образца СВЧ-воскотопки (рисунок 7) приведены в таблице 3.

Таблица 3 – 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
Удельные энергетические затраты на вытопку воска и отделение меда, кВт·ч/кг	0,13

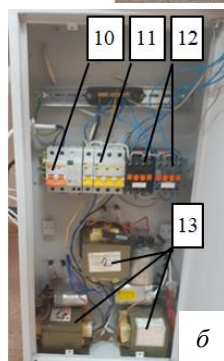
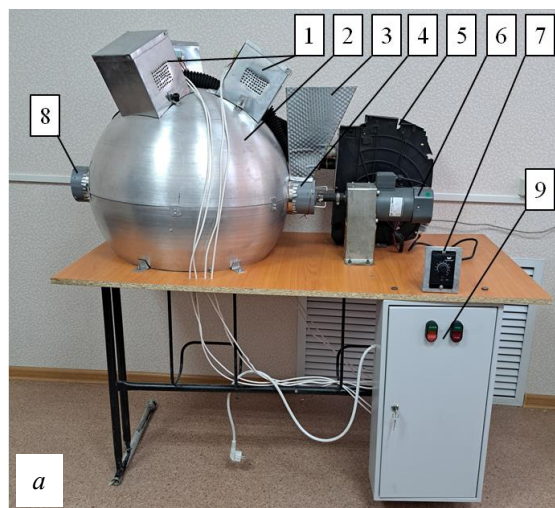


Рисунок 7 – СВЧ-воскотопка:
а – общий вид;
б – пускозащитная аппаратура;
в – фторопластовый нагнетательный шнек, кожух и кольцевой диск;
 1 – магнетроны с волноводами;
 2 – полусферические резонаторы;
 3 – приемная емкость;
 4 – нагнетательный шнек в корпусе;
 5 – вентилятор для охлаждения магнетронов; 6 – мотор-редуктор (100YT200WGV22B);
 7 – преобразователь частоты (Wanshsin 0,2 кВт);
 8 – выгрузное окно; 9 – шкаф управления; 10 – УЗО;
 11 – автоматический выключатель, соответственно: мотор-редуктора, магнетронов 1-го и 2-го резонаторов; 12 – магнитные пускатели;
 13 – высоковольтные трансформаторы 220 В/4,5 кВ

Результаты измерений мощности потока излучений через объемные резонаторы показал, 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.

Пятый раздел «Экономическая эффективность применения СВЧ-воскотопки в условиях пасеки» содержит результаты экономической оценки эффективности применения СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами в сравнении с базовой паровой воскотопкой Kopigin.

Ожидаемый годовой экономический эффект от применения воскотопки непрерывно-поточного действия 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.

Рентабельность процесса вытопки воска по сравнению с базовым вариантом повышается на 52,9 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты исследования динамики нагрева воскового сырья с учетом изменения его диэлектрических ($\epsilon_r = 2,31\text{--}2,39$; $k = 1,16\text{--}5,3$; $\operatorname{tg}\delta = 0,49\text{--}2,25$) и теплофизических параметров ($\rho = 442\text{--}970 \text{ кг/м}^3$, $C = 1,05\text{--}2,93 \text{ кДж/кг}\cdot^\circ\text{C}$) 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 отделении 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.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science

1. Shevelev, A. Justification of structural and technological parameters of microwave installations for heat treatment of wax raw materials [Текст] / A. Shevelev, G. Novikova, M. Prosviryakova [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. «International AgroScience Conference, AgroScience 2020». – 2020. – С. 012008. – doi:10.1088/1755-1315/604/1/012008.

Статьи в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий

2. Шевелев, А. В. Обоснование собственной добротности резонаторов СВЧ-установок для вытопки пасечного воска [Текст] / А. В. Шевелев, О. В. Михайлова, Г. В. Новикова, М. В. Просвирякова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 8 (190). – С. 124–130.

3. Шевелев, А. В. СВЧ-установка для вытопки пчелиного воска [Текст] / А. В. Шевелев, Г. В. Новикова, О. В. Михайлова, М. В. Белова // Вестник НГИЭИ. – 2020. – № 5 (108). – С. 16–28.

4. Шевелев, А. В. Теоретическое обоснование электродинамических параметров СВЧ-установки с полусферическими резонаторами для вытопки воска [Текст] / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. // Вестник НГИЭИ. – 2021. – № 10 (125). – С. 46–56.

5. Шевелев, А. В. Исследование динамики нагрева воскового сырья в электромагнитном поле СВЧ [Текст] / А. В. Шевелев, М. С. Жужин, Е. А. Сбитнев // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 6 (133). – С. 32–43.

6. Шевелев, А. В. Особенности разработки установок с СВЧ-энергоподводом для переработки сырья агропредприятий [Текст] / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 12 (139). – С. 54–65.

7. Шевелев, А. В. Оптимизация конструктивно-технологических режимов работы СВЧ-воскотопки [Текст] / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. // Аграрная наука. – 2022. – Т. 364. – № (11). – С. 88–93.

8. Шевелев, А. В. Обоснование рационального режима работы СВЧ-воскотопки [Текст] / А. В. Шевелев // Вестник НГИЭИ. – 2023. – № 3 (142). – С. 17–25.

9. Шевелев, А. В. Согласование электродинамических параметров с объемом резонатора СВЧ-воскотопки [Текст] / А. В. Шевелев // Вестник НГИЭИ. – 2024. – № 5 (156). – С. 70–81.

10. Шевелев, А. В. Оптимизация технологических параметров и режимов работы СВЧ-воскотопки с полусферическими резонаторами [Текст] / А. В. Шевелев, О. В. Михайлова, М. В. Просвирякова, В. В. Коновалов // Вестник НГИЭИ. – 2025. – № 5 (168). – С. 53–67.

Патенты

11. Пат. 2728659 Российская Федерация, МПК С11В 11/00, А01К 59/06. Двухмодульная СВЧ установка для термообработки пчелиного воскового сырья [Текст] / 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. : ил.

12. Пат. 2737142 Российская Федерация, МПК А01К 59/04, А01К 59/06. СВЧ установка для отделения меда от вытапливаемого воскового сырья в резонаторах непрерывного действия [Текст] / 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. : ил.

13. Пат. 2740095 Российская Федерация, МПК А01К 59/06. СВЧ-установка с взаимосвязанными цилиндрическими резонаторами для термообработки воскового сырья в непрерывном режиме [Текст] / 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. : ил.

14. Пат. 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 [Текст] / 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. : ил.

15. Пат. 2789490 Российская Федерация, МПК С11В 11/00. Способ вытопки воска с отделением меда [Текст] / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. – Заявитель и патентообладатель НГИЭУ. – № 2022111579 заявл. 28.04.2022. Бюл. № 4. – 12 с. : ил.

16. Пат. 2803541 Российская Федерация, МПК С11В 11/00. СВЧ воскотопка непрерывно-поточного действия с тороидальным резонатором [Текст] / 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. : ил.

Научные статьи и участие в конференциях

17. Шевелев, А. В. СВЧ-установка для термообработки воскового сырья / А. В. Шевелев, О. В. Михайлова, Г. В. Новикова, Р. А. Храмов [Текст] // Актуальные направления развития техники и технологий в России и за рубежом – реалии, возможности, перспективы. – Княгинино, 26 марта 2020 г. – Том II. – С. 94–97.
18. Шевелев, А. В. Обоснование параметров СВЧ установки для вытопки пасечного воска / А. В. Шевелев, М. В. Просвирякова, Г. В. Новикова и др. // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 3 (18). – С. 112–120.
19. Шевелев, А. В. СВЧ установки для термообработки воскового сырья в непрерывном режиме [Текст] / А. В. Шевелев, О. В. Михайлова, Г. В. Новикова [и др.] // Перспективы развития аграрных наук : Материалы Международной научно-практической конференции: тезисы докладов, Чебоксары, 10 апреля 2020 года. – Чебоксары: Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 2020. – С. 191–192.
20. Шевелев, А. В. Обеспечение электромагнитной безопасности проектируемой СВЧ-воскотопки [Текст] / 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.
21. Шевелев, А. В. Определение эффективных режимов работы СВЧ воскотопки [Текст] / 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.

Подписано в печать 28.07.2025 г.

Бумага писчая. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 19а.

Отпечатано в ИПЦ НГИЭУ с оригинал-макета.

606340, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, 22а