

#### 4.3.2. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 621.385.6

DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2024\_1\_138

EDN: RSWHEJ

### Интенсификация процесса термообработки мясных отходов в установке со сверхвысокочастотным энергоподводом

Евгений Викторович Воронов<sup>1✉</sup>, Галина Владимировна Новикова<sup>2</sup>,  
Сергей Александрович Суслов<sup>3</sup>, Марьяна Валентиновна Просвирякова<sup>4</sup>,  
Ольга Валентиновна Михайлова<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 5</sup> Нижегородский государственный инженерно-экономический университет,  
Княгинино, Россия

<sup>4</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева,  
Москва, Россия

<sup>1</sup> e\_voronov@list.ru✉

**Аннотация.** Технология термообработки мясных отходов, обеспечивающая сохранение ценности кормового продукта, относится к энергозатратному производству. Для реализации этой технологии на агропредприятиях используется различное оборудование, в частности сверхвысокочастотные установки. Представлены результаты исследования, проведенного с целью интенсификации процесса термообработки жиросодержащих мясных отходов в установке непрерывно-поточного действия, реализующей микроволновую технологию. Разработана установка с СВЧ энергоподводом в тороидальный резонатор с электроприводным внутренним цилиндром с керамическими вогнутыми отсеками, обеспечивающая равномерность распределения электрического поля бегущей волны, позволяющая обеззараживать продукт и обеспечивать электромагнитную безопасность без дополнительного экранирующего корпуса с запредельными волноводами. Эффективные режимы работы установки: удельная мощность генератора – 2,7 Вт/г; продолжительность воздействия ЭМП СВЧ – 6–8 мин; напряженность электрического поля – 2–6 кВ/см; температура нагрева продукта – 108–110 °С; производительность установки – 20,0–24,5 кг/ч; собственная добротность тороидального резонатора – 57 000. Результаты исследования электродинамических параметров с использованием программы CAD/CAE-системы CST Microwave Studio 2017 с достаточной достоверностью (0,95) совпадают со значениями, полученными с помощью теоретических формул. При собственной добротности тороидального резонатора 57 000, напряженность электрического поля в конденсаторной части резонатора составляет 6 кВ/см. Неферромагнитный внутренний электроприводной цилиндр с керамическими вогнутыми отсеками обеспечивает непрерывный режим при равномерной загрузке сырья в тороидальный резонатор. В его конденсаторной части возбуждается электрическое поле высокой напряженности, а это интенсифицирует процесс термообработки жиросодержащего сырья с вытопкой жира, следовательно, снижаются эксплуатационные затраты при сохранении потребительских свойств жира и шквары.

**Ключевые слова:** сверхвысокочастотные установки, непрерывный режим, электроприводной цилиндр, керамические отсеки, жир, шквара

**Для цитирования:** Воронов Е.В., Новикова Г.В., Суслов С.А., Просвирякова М.В., Михайлова О.В. Интенсификация процесса термообработки мясных отходов в установке со сверхвысокочастотным энергоподводом // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2024. Т. 17, № 1(80). С. 138–151. [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2024\\_1\\_138](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_1_138)–151.

#### 4.3.2. ELECTROTECHNICS, ELECTRICAL EQUIPMENT AND ELECTRICAL POWER SUPPLY FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

### Intensification of the process of meat waste heat treatment in an installation with a microwave power supply

Evgeniy V. Voronov<sup>1✉</sup>, Galina V. Novikova<sup>2</sup>, Sergey A. Suslov<sup>3</sup>,  
Mariana V. Prosviryakova<sup>4</sup>, Olga V. Mikhailova<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 5</sup> Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russia

<sup>4</sup> Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy, Moscow, Russia

<sup>1</sup> e\_voronov@list.ru✉

**Abstract.** The technology of heat treatment of meat waste, which ensures the preservation of the value of the feed product, refers to energy-intensive production. To implement this technology, agricultural enterprises use various equipment, in particular ultrahigh frequency devices. The results of studies carried out with the aim of intensifying the heat treatment process of fat-containing meat waste in a continuous device with a microwave power supply to a toroidal resonator are presented. An installation with a microwave power supply to a toroidal resonator with an electrically driven inner cylinder with ceramic concave compartments has been developed, ensuring uniform distribution of the traveling wave field at high electric field strength, intended to ensure product disinfection and electromagnetic safety without additional shielding housing with below-cutoff waveguides. Effective modes of operation of the installation: specific power of the generator is 2.7 W/g; duration of exposure to UHF electromagnetic field is 6-8 min; electric field strength is 2-6 kV/cm; product heating temperature is 108-110 °C; installation capacity is 20.0–24.5 kg/ h; inherent Q-factor of the toroidal resonator is 57,000. The results of the study of electrodynamic parameters using the CAD/CAE program of the CST Microwave Studio 2017 system with sufficient confidence (0.95) coincide with the values obtained using theoretical formulas. When the inherent Q-factor of the toroidal resonator is equal to 57,000 the electric field strength in the capacitor part of the resonator is 6 kV/cm. A non-ferromagnetic internal electric drive cylinder with ceramic concave compartments provides continuous operation with uniform loading of raw materials into a toroidal resonator. A high-intensity electric field is excited in its condenser part, and this intensifies the process of heat treatment of fat-containing raw materials with fat melting, therefore operating costs are reduced while maintaining the consumer properties of fat and greaves.

**Keywords:** ultrahigh frequency devices, continuous operation, electric drive cylinder, ceramic sections, fat, greaves

**For citation:** Voronov E.V., Novikova G.V., Suslov S.A., Prosviryakova M.V., Mikhailova O.V. Intensification of the process of heat treatment of meat waste in an installation with a microwave power supply. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2024;17(1): 138-151. (In Russ.). [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2024\\_1\\_138-151](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_1_138-151).

## Введение

Современный уровень развития мясной отрасли АПК требует разработки новых подходов к проблеме комплексного использования всех видов сырья, основанных на внедрении мало- и безотходных технологий, которые позволяют извлекать все ценные компоненты сырья, превращая их в полезные продукты. Технология термообработки мясных отходов, обеспечивающая сохранение ценности кормового продукта, относится к энергозатратному производству [3]. Для реализации этой технологии на агропредприятиях используется различное оборудование, в частности сверхвысокочастотные установки, в которых интенсифицируют работу за счет повышения температуры теплопередающей среды, изменяя условия теплообмена, увеличивая поверхность передачи теплоты при постоянной массе сырья. Однако повышение температуры среды выше 120 °C приводит не только к ухудшению кормовой ценности готового продукта [10], но и значительному росту затрат энергии.

Наиболее эффективным способом интенсификации теплообмена, по мнению многих экспертов, является использование энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) для воздействия на измельченное жиросодержащее сырье [4, 6, 7, 8, 9].

Существуют СВЧ-установки для вытопки жира разного конструкционного исполнения с цилиндрическими, сферическими и другими резонаторами периодического и непрерывного режимов работы. Например, известна радиогерметичная СВЧ-установка со щелевым резонатором-барабаном в цилиндрическом экранирующем корпусе, в которой термообработка субпродуктов происходит при массировании и дополнительном нагреве рассола за счет дифракционного излучения в кольцевом пространстве между цилиндрическим экранирующим корпусом и резонатором [11]. Установка выполнена в виде двух соосно расположенных резонаторов, источником возбуждения ЭМП СВЧ внутреннего щелевого резонатора-барабана является магнетрон воздушного охлаждения, установленный с открытого торца барабана, а возбуждение ЭМП СВЧ в коаксиальном резонаторе происходит за счет электромагнитных излучений через щели барабана. Предложенная Д.В. Поручиковым конструкция отличается сложностью изготовления, работает в периодическом режиме, содержит экранирующий корпус, что повышает ее балансовую стоимость.

Сотрудниками Нижегородской ГСХА создана СВЧ-установка с квазистационарным резонатором для термообработки измельченного жиросодержащего сырья в непрерывном режиме, содержащая тор и конденсаторную часть [12]. В центральной части резонатора размещена приемная емкость в виде усеченного конуса так, что его малое основание с диаметром менее четверти длины волны состыковано с имеющимся отверстием на центральном основании конденсаторной части резонатора. Образующие усеченного конуса соприкасаются с окружностью центральной части резонатора. На наружную боковую поверхность тора со сдвигом на  $120^\circ$  по периметру установлены магнетроны, излучатели которых направлены в конденсаторную часть. В таком конструкционном исполнении резонатора без общего экранирующего корпуса за счет неферромагнитной приемной емкости в виде усеченного конуса и запердельного волновода, а также неферромагнитной накопительной емкости излучения через перфорации будут ограничены до допустимого уровня. Несмотря на наличие определенных преимуществ, предложенная установка не лишена недостатков, в частности отсутствует возможность регулировать объем поступающего сырья через приемную емкость. Сырье, находящееся в емкости, не может без перемешивающего устройства попасть в конденсаторную часть резонатора.

Представлены результаты исследования, выполненного с целью интенсификации процесса термообработки жиросодержащих мясных отходов в установке непрерывно-поточного действия с СВЧ-энергоподводом в тороидальный резонатор.

#### **Методика исследования**

Исследуемым вторичным сырьем является рубец – первый и самый большой отдел четырехкамерного желудка жвачных животных.

Для достижения поставленной цели – разработки установки с СВЧ-энергоподводом в резонатор – необходимо было решить следующие задачи:

- исследовать динамику диэлектрического нагрева измельченного рубца в стационарном режиме и при перемешивании в объемном резонаторе лабораторного образца СВЧ-установки при разных удельных мощностях и определить продолжительность термообработки сырья в процессе воздействия ЭМП СВЧ;
- выявить возможности интенсификации процесса термообработки и с помощью программы Компас-3D V18 создать модель установки с нестандартным тороидальным резонатором;
- реализовать моделирование электродинамических процессов в резонаторе с использованием программы CAD/CAE-системы CST Microwave Studio [19] для достижения высокой напряженности электрического поля в конденсаторной части тороидального резонатора и вычисления собственной добротности резонатора;
- обосновать равномерность диэлектрического нагрева сырья по объему в непрерывном режиме за счет применения электроприводного внутреннего цилиндра с керамическими отсеками;
- рассчитать эффективные режимы работы установки через регрессионные модели, полученные в результате применения трехфакторного эксперимента типа  $2^3$  по плану Хартли в программах Statistic 12.0, Excel 10.0.

Моделирование возбуждения бегущей электромагнитной волны сантиметрового диапазона проводили с учетом результатов исследований Л.В. Алексейчика с соавт., В.И. Анфиногентов с соавт., В.В. Захарова с соавт., Е.В. Титова с соавт., Д.Г. Фомина с соавт. [1, 2, 5, 14, 18]. При проектировании тороидального резонатора использовали результаты исследований М.И. Тухватуллина [15, 16, 17].

### Результаты и их обсуждение

Небольшим фермерским хозяйствам, занимающимся скотоводством, предпочтительнее внедрять микроволновую технологию, преобразующую ЭМП СВЧ в тепловую энергию внутри сырья, т. е. нагревать его эндогенно (изнутри), что позволяет ускорять процесс и экономить энергию. В этом плане перспективным является разработка радиогерметичной многогенераторной установки непрерывно-поточного действия с СВЧ-энергоподводом в тороидальный резонатор с системой автоматического управления процессом термообработки вторичного мясного сырья, позволяющей интенсифицировать технологический процесс, обеззараживать и сохранять потребительские свойства продукта при сниженных эксплуатационных затратах [3, 8, 9].

В конструктивном исполнении установки для реализации термообработки жиросодержащих мясных отходов с обеззараживанием и отделением вытопленного жира в непрерывном режиме с производительностью, удовлетворяющей потребности фермерских хозяйств, должны обеспечивать:

- тонкое измельчение вторичного мясного сырья вне резонатора;
- равномерное распределение электрического поля высокой напряженности в тороидальном резонаторе за счет интерференции бегущей волны в конденсаторной части, куда направлены через волноводы излучатели от магнетронов воздушного охлаждения;
- равномерную загрузку измельченного сырья толщиной, согласованной с глубиной проникновения волны за счет электроприводного внутреннего цилиндра с керамическими отсеками;
- отделение вытопленного жира через перфорированное основание резонатора;
- выгрузку шквары и жира через патрубки, выполняющие функции запредельных волноводов;
- электромагнитную безопасность, обеспечиваемую за счет применения тороидального резонатора и запредельных волноводов, так как в конструкции не предусмотрен экранирующий корпус;
- контроль температуры нагрева измельченного сырья и продукта, мощности установки, потребления электроэнергии, частоты электромагнитного поля, мощности потока излучений;
- экономический эффект за счет снижения эксплуатационных расходов при сохранении потребительских свойств жира и шквары.

Проведены исследования динамики нагрева измельченного рубца крупного рогатого скота (КРС) и мелкого рогатого скота (МРС) при разных удельных мощностях. Результаты исследования зависимости температуры нагрева сырья от продолжительности воздействия ЭМП СВЧ в стационарном режиме показывают, что при мощности генератора 3,6 Вт/г жир вытопится и шквара сварится за 9 мин (рис. 1, а), а при перемешивании при мощности 2 Вт/г – за 6 мин (рис. 1, б).

Динамика температуры сырья при разных удельных мощностях генератора описывается эмпирическими выражениями:

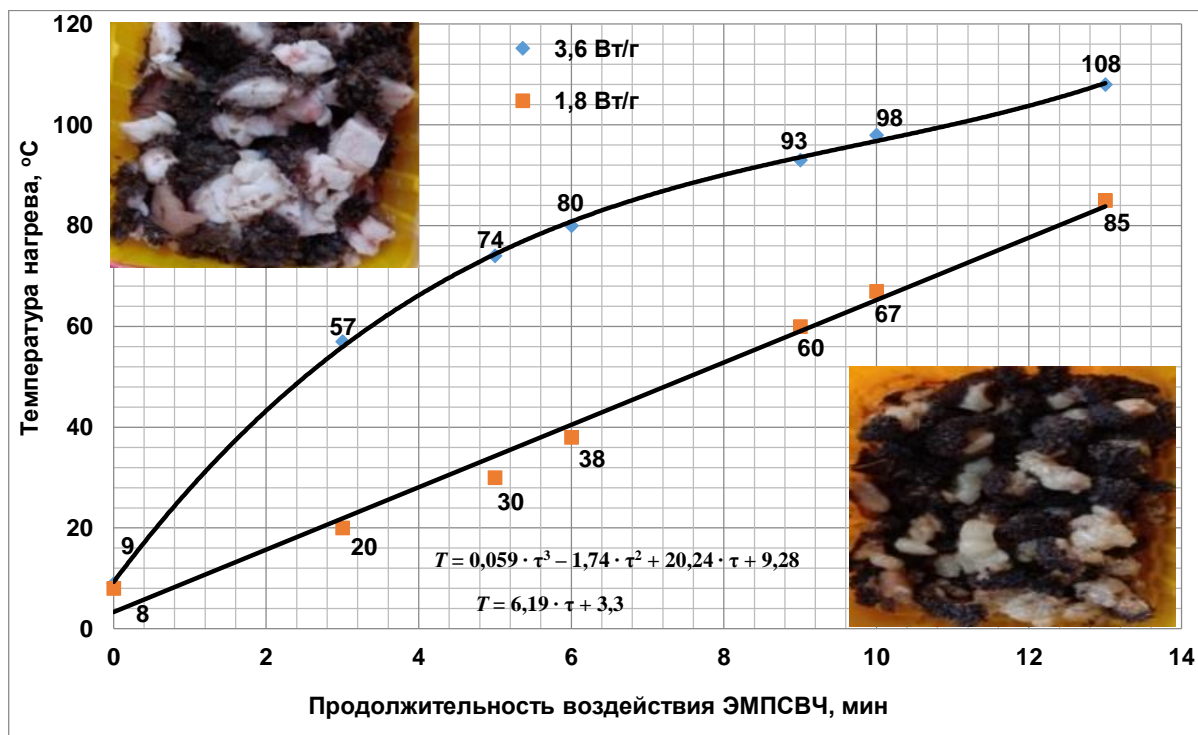
*в стационарном режиме нагрева –*

$$T = 0,059 \cdot \tau^3 - 1,74 \cdot \tau^2 + 20,24 \cdot \tau + 9,28 \text{ (при 3,6 Вт/г); } T = 6,19 \cdot \tau + 3,3 \text{ (при 1,8 Вт/г);} \quad (1)$$

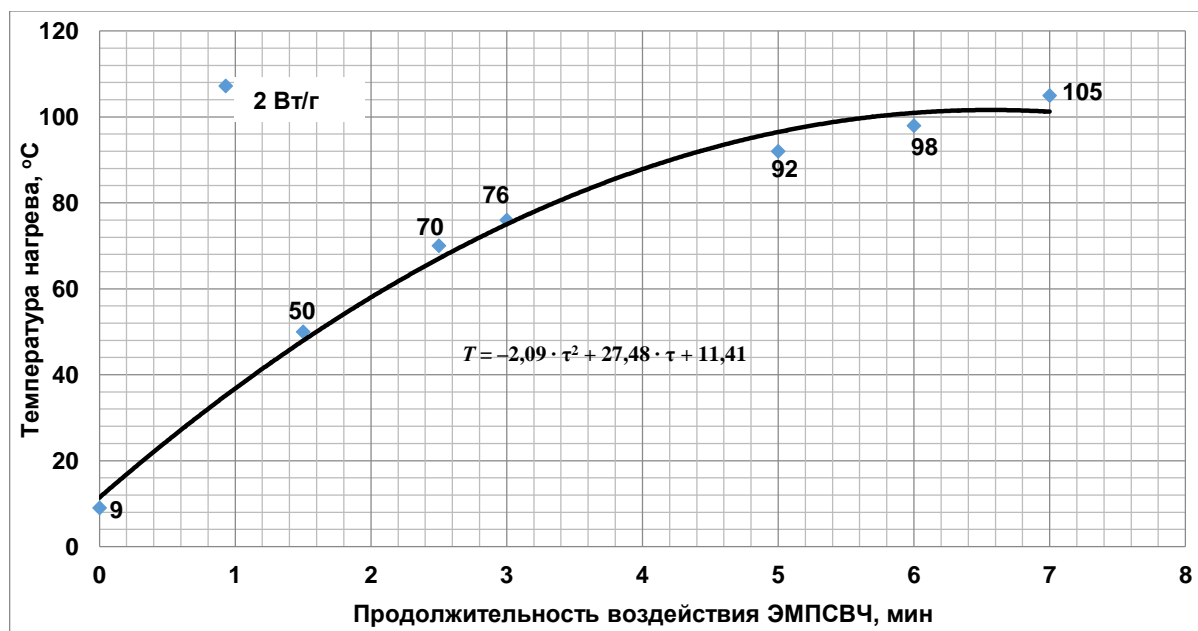
*в режиме перемешивания –*

$$T = -2,09 \cdot \tau^2 + 27,48 \cdot \tau + 11,41 \text{ (при 2 Вт/г).} \quad (2)$$

Если мощность трех магнетронов составляет 3,3 кВт, то в резонаторе в стационарном режиме при мощности 2 Вт/г сырье массой 1,65 кг может нагреться до 95 °С за 10 мин, а жир вытопиться (рис. 1, а). В этом случае установка будет работать с производительностью 10 кг/ч.



а



б

Рис. 1. Динамика нагрева измельченного рубца желудка жвачных животных в стационарном (а) и непрерывном (б) режимах нагрева при разных удельных мощностях СВЧ-генератора: 1,8 Вт/г; 2 Вт/г; 3,6 Вт/г

Конструкция объемного резонатора должна обеспечивать равномерное распределение ЭМП в объеме резонатора, а также равномерный нагрев сырья (измельченного рубца желудка КРС), поэтому необходимо:

во-первых, оптимизировать размеры резонатора, при которых будут возбуждаться определенные виды колебаний, а их интерференция обеспечит равномерное распределение электрического поля в его объеме;

во-вторых, применить несколько магнетронов воздушного охлаждения, излучатели которых, направленные в резонатор, позволят увеличить число возбуждаемых в заданном диапазоне видов колебаний и, как следствие, равномерность нагрева сырья;

в-третьих, правильно рассчитать месторасположение нескольких магнетронов и предусмотреть возможность регулирования напряженности электрического поля в резонаторе.

Так как степень загрузки резонатора и его диэлектрические параметры влияют на передачу СВЧ-энергии в сырье, то с учетом всех рекомендаций для повышения производительности установки следует обеспечивать равномерную загрузку сырья в резонатор с учетом глубины проникновения волны и перемешивания при диэлектрическом нагреве.

С учетом вышеизложенного авторами разработана установка, позволяющая реализовать микроволновую технологию термообработки сырья при перемешивании в непрерывном режиме при концентрации энергии электромагнитных излучений в сырье с помощью керамических вогнутых отсеков.

Предложенная установка с СВЧ-энергоподводом в тороидальный резонатор для термообработки жиросодержащих мясных отходов, схематичное изображение которой представлено на рисунке 2, содержит соосно расположенный в наружном неферромагнитном цилиндре 7 неферромагнитный внутренний электроприводной цилиндр 3, установленный на вал 4 и снабженный керамическими вогнутыми отсеками 5 (рис. 2).

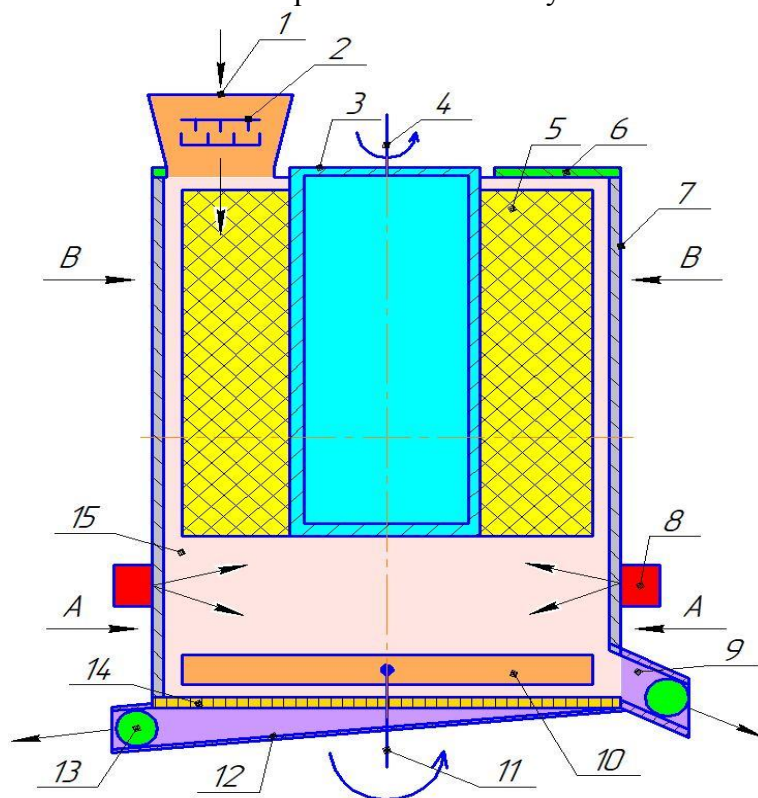


Рис. 2. Схематическое изображение установки с СВЧ-энергоподводом в тороидальный резонатор для термообработки жиросодержащего мясного сырья: 1 – загрузочная емкость; 2 – электроприводной шредер; 3 – внутренний электроприводной цилиндр; 4 – вал электропривода внутреннего цилиндра; 5 – керамические вогнутые отсеки; 6 – кольцевое основание; 7 – наружный цилиндр; 8 – магнетроны, снабженные волноводами и вентиляторами; 9 – патрубок с шаровым краном; 10 – диэлектрический электроприводной диск с радиальными направляющими; 11 – диэлектрический вал; 12 – накопительная емкость с патрубком и шаровым краном; 13 – перфорированное основание наружного цилиндра; 14 – конденсаторная часть резонатора

Отличительной особенностью конструкции является то, что неферромагнитные цилиндры расположены так, что между их основаниями образована конденсаторная часть 15 тороидального резонатора, куда направлены излучатели от магнетронов 8 воздушного охлаждения, расположенные по периметру боковой поверхности неферромагнитного наружного цилиндра со сдвигом на 120°.

На боковой поверхности внутреннего электроприводного цилиндра по всей высоте расположены вогнутые керамические отсеки, имеющие низкий коэффициент рассеивания, обладающие малым значением тангенса угла диэлектрических потерь и выдерживающие высокие механические нагрузки.

Предложенную авторами конструкцию, содержащую керамические отсеки, можно отнести к металлодиэлектрическому резонатору. Размеры тороидального резонатора согласованы с длиной волны, при этом средний периметр кольцевого объема между наружным 7 и внутренним 3 цилиндрами кратен половине длины волны, а зазор между их основаниями в конденсаторной части 15 резонатора – не менее четверти длины волны. Линейные размеры неферромагнитного тороидального резонатора в 5–6 раз превышают длину волны [19], поэтому в нем возбуждаются только определенные виды колебаний, а их интерференция приводит к равномерному распределению электрического поля бегущей волны высокой напряженности в конденсаторной части 15 резонатора [6]. Над перфорированным основанием 14 наружного цилиндра расположен диэлектрический электроприводной диск 10 с радиальными отсеками. Для слива вытопленного жира предусмотрен неферромагнитный патрубок с шаровым краном 13 из накопительной емкости 12, образованной между перфорированным основанием 14 и неферромагнитным наклонным основанием. В тороидальном резонаторе между кольцевым основанием 6 и основанием внутреннего электроприводного цилиндра 3 имеется зазор не более четверти длины волны.

Технологический процесс термообработки жиросодержащих мясных отходов в установке с СВЧ-энергоподводом в тороидальный резонатор происходит следующим образом.

Загрузить жиросодержащие мясные отходы в загрузочную емкость 1.

Последовательно включить электропривод 4 неферромагнитного внутреннего цилиндра 3, электропривод 11 (указан вал) диэлектрического диска 10, электропривод шредера 2.

Включить магнетроны 8 с вентиляторами, как только измельченное сырье окажется в керамических отсеках 5 внутреннего электроприводного цилиндра 3. В связи с тем, что поперечное сечение керамических отсеков 5 не превышает две глубины проникновения волны, сырье равномерно загружается и нагревается в конденсаторной части 15 резонатора при перемещении и перемешивании радиальными отсеками диэлектрического электроприводного диска 10. Так как излучатели от магнетронов 8 через волноводы направлены в конденсаторную часть 15 тороидального резонатора (3, 6, 7, 14), то в нем возбуждается электромагнитное поле сверхвысокой частоты: частота составляет 2450 МГц, длина волны – 12,24 см, глубина проникновения волны – 2–11 см (в зависимости от вида сырья). В конденсаторной части резонатора, где возбуждается электромагнитное поле бегущей волны, измельченное сырье при перемешивании равномерно нагревается, вытопленный жир стекает через перфорированное основание 14 наружного цилиндра в накопительную емкость 12. Шквара удаляется через патрубок 9 с помощью радиальных направляющих при вращении диэлектрического электроприводного диска 10.

Выключить электропривод шредера 2 по окончании технологического процесса термообработки жиросодержащего сырья.

Выключить магнетроны 8, когда в конденсаторной части резонатора еще находится остаточная часть продукта. Далее выключить электропривод 4 внутреннего цилиндра 3.

Выключить электродвигатель 11 (указан вал) после выгрузки остатков шквары помощью электроприводного диэлектрического диска 10.

Слить вытопленный жир из накопительной емкости 12 через неферромагнитный патрубков с шаровым краном 13. Далее провести санитарную обработку.

Основным параметром объемного резонатора является собственная добротность, характеризующая отношение запасенной энергии к средней энергии потерь за период колебания, т. е. по этому показателю можно оценить термический коэффициент полезного действия (КПД) в резонаторе.

По методике Ю.Н. Пчельникова проведен расчет собственной добротности ( $Q$ ) тороидального резонатора путем вычисления объема ( $V$ , м<sup>3</sup>) и площади поверхности стенок алюминиевого резонатора ( $S$ , м<sup>2</sup>) с учетом толщины скин-слоя ( $\Delta = 1,72$  мкм), при частоте 2450 МГц.

$$Q = k \cdot 2 \cdot V \cdot \Delta / S, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий снижение площади поверхности резонатора за счет перфорации и отверстий ( $k = 0,75$ ).

Площадь поверхности наружного цилиндра, радиус ( $R$ ) и высота ( $H$ ) которого равны соответственно 0,459 и 1,224 м, составляет

$$S = 4 \cdot \pi^2 \cdot R^3 \cdot H = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,459^2 + 2 \cdot 3,14 \cdot 1,224 = 9,01 \text{ м}^2. \quad (4)$$

Площади поверхностей внутреннего ( $s$ ) электроприводного цилиндра, радиусом  $r = 0,23$  м, и высотой  $h = 0,918$  м, и наружного цилиндра ( $S$ ;  $R = 0,459$  м;  $H = 1,224$  м) составляют:

$$S_{\text{общ}} = S + s = \pi \cdot (r^2 + 2 \cdot r \cdot h) = 3,14 \cdot (0,214^2 + 2 \cdot 0,214 \cdot 0,918) = 1,378 \text{ м}^2; \quad (5)$$

$$s = 9,01 + 1,378 = 10,388 \text{ м}^2.$$

Объем резонатора

$$V_{\text{общ}} = V - v = \pi \cdot R^2 \cdot H - \pi \cdot r^2 \cdot h = 3,14 \cdot (0,459^2 \cdot 1,224 - 0,214^2 \cdot 0,918) = 0,678 \text{ м}^3. \quad (6)$$

Собственная добротность тороидального резонатора

$$Q = k \cdot 2 \cdot V / S \cdot \Delta = 0,75 \cdot 2 \cdot 0,678 / 10,388 \cdot 1,72 \cdot 10^{-6} = 56920. \quad (7)$$

Как показывают расчеты, собственная добротность тороидального резонатора с обоснованными выше размерами составляет 56 920. По данным А.В. Стрекалова и Ю.А. Стрекалова [13], величина собственной добротности для полых резонаторов имеет порядок  $10^5$ – $10^6$ .

Средний периметр кольцевого объема равен 2,4 м, при продолжительности воздействия ЭМП СВЧ на сырье в течение 6 мин (0,1 ч) частота вращения внутреннего цилиндра составляет 0,167 об/мин.

Визуализацию распределения ЭМП в тороидальном резонаторе, определение собственной добротности и обоснование напряженности электрического поля осуществляли, моделируя электродинамические процессы с использованием программы CAD/CAE-системы CST Microwave Studio 2017 (рис. 3) [14, 18, 19].



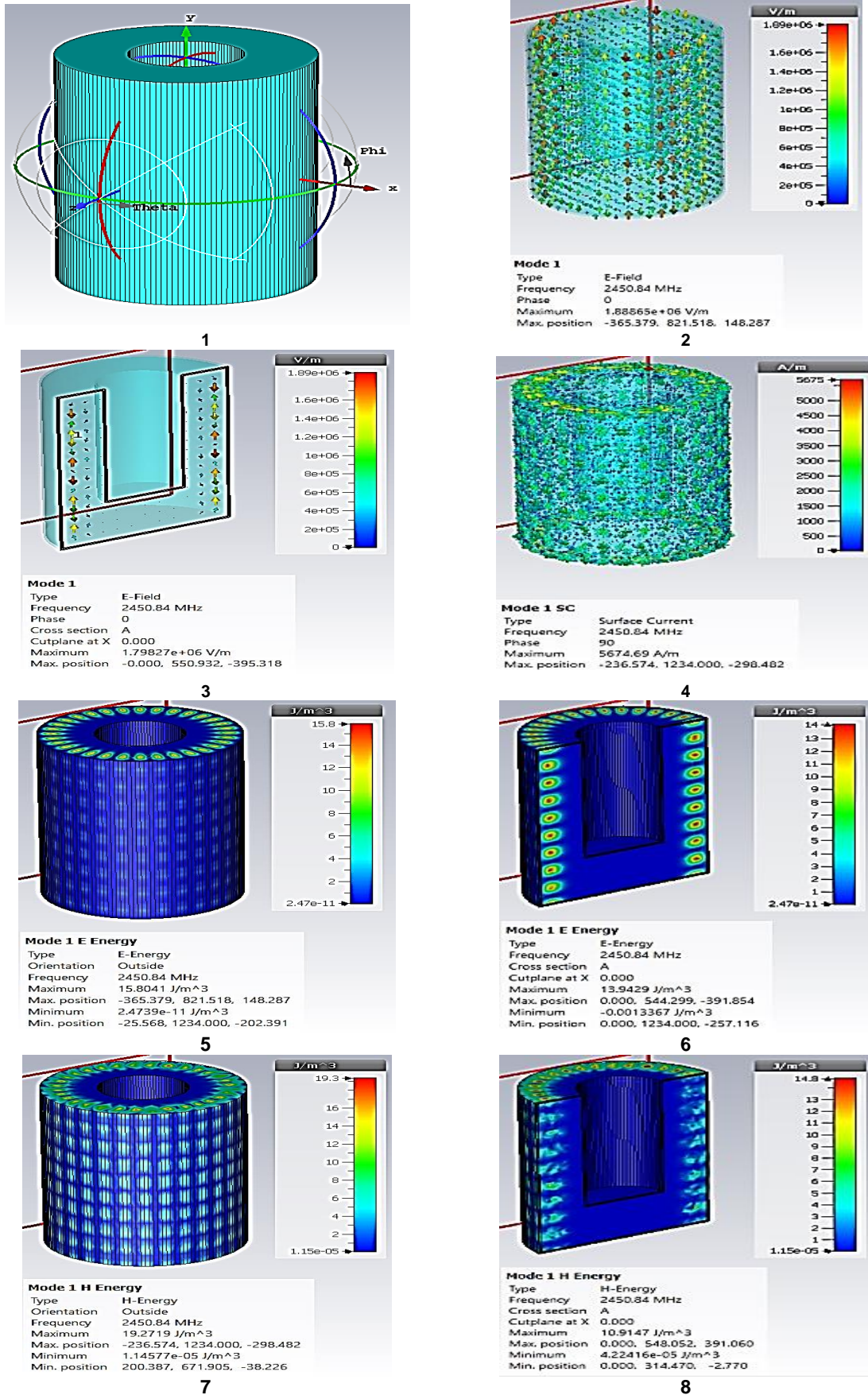


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования электродинамических процессов (мода 1): 1 – распределение ЭМП по координатам  $x, y, z$ ; 2, 3 – напряженность ЭП, В/м; 4 – напряженность магнитной составляющей, А/м; 5, 6 – Е-энергия (Е энергия), Дж/м<sup>3</sup>; 7, 8 – Н-энергия (Н энергия), Дж/м<sup>3</sup>

Результаты моделирования показывают, что напряженность электрического поля составляет 2–6 кВ/см. При таких значениях напряженности ЭП отмечается снижение бактериальной обсемененности жиросодержащего продукта до предельно допустимого уровня – 500 тыс. КОЕ/г [3].

Собственная добротность тороидального резонатора при площади его поверхности 10,388 м<sup>2</sup> и его объеме 0,678 м<sup>3</sup> достигает 57 000.

Используя матрицу планирования трехфакторного эксперимента (план Хартли) (табл. 1, 2), получили уравнения регрессии, позволяющие оценить влияние варьируемых параметров на производительность установки ( $Y_1 = Q$ , кг/ч), удельные энергетические затраты ( $Y_2 = W$ , кВт·ч/кг), приращение температуры мясного сырья ( $Y_3 = T$ , °С).

**Таблица 1. Критерии оптимизации**

№	Варьируемые параметры					
	Удельная мощность генератора, Вт/г		Продолжительность обработки, ч		Напряженность ЭП, кВ/см	
	$x_1$	$\rho$ , Вт/г	$x_2$	$t$ , ч	$x_3$	$E$ , кВ/см
1	+	3,6	+	0,200	+	9
2	+	3,6	–	0,100	–	3
3	–	1,8	+	0,200	–	3
4	–	1,8	–	0,100	+	9
5	0	2,7	0	0,133	0	6
6	–	1,8	0	0,133	0	6
7	+	3,6	0	0,133	0	6
8	0	2,7	–	0,100	0	6
9	0	2,7	+	0,200	0	6
10	0	2,7	0	0,133	–	3
11	0	2,7	0	0,133	+	9

Примечание: уровни варьирования параметров:  $x_1$  (Вт/г) – 1,8; 2,7; 3,6;  $x_2$  (ч) – 0,100; 0,133; 0,200;  $x_3$  (кВ/см) – 3; 6; 9.

**Таблица 2. Критерии оптимизации**

№	Производительность, кг/ч ( $Q$ )	Энергетические затраты, кВт·ч/кг ( $W$ )	Температура продукта, °С ( $T$ )
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
1	13,74	0,24	120
2	9,16	0,36	127
3	9,16	0,36	127
4	55,00	0,06	46
5	13,38	0,25	120
6	27,56	0,12	85
7	13,78	0,24	120
8	24,48	0,14	108
9	12,22	0,27	125
10	9,18	0,36	127
11	27,54	0,12	85

Примечание: напряженность ЭП регулировали с изменением зазора между основаниями цилиндров. Энергетические затраты только с учетом мощности генераторов 3,3 кВт.

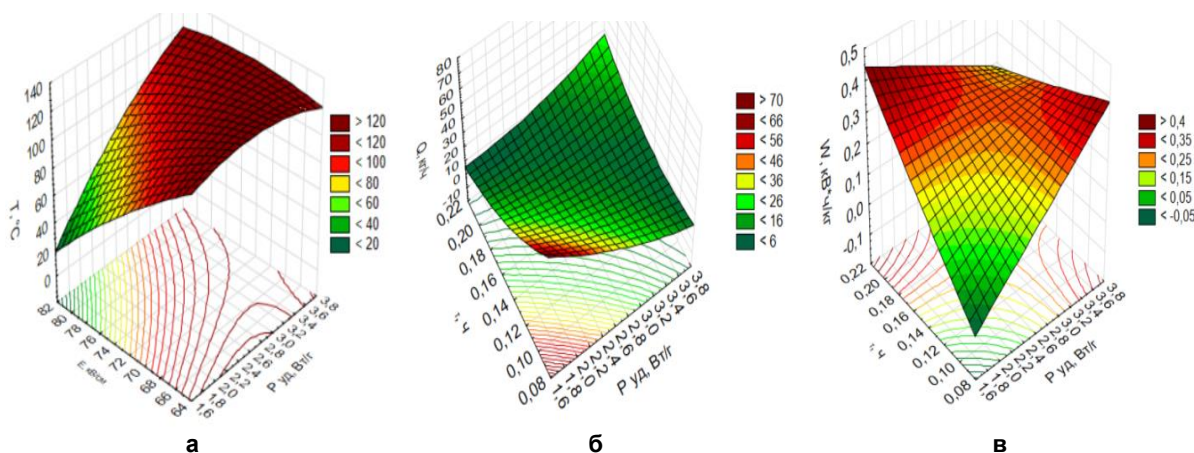
Варьируемыми параметрами являлись:

- удельная мощность генератора ( $x_1$ , Вт/г);
- продолжительность воздействия ЭМП СВЧ на сырье ( $x_2$ , мин);
- напряженность ЭП ( $x_3$ , кВ/см).

Пределы изменения варьируемых факторов следующие:

$$x_1 = 1,8-3,6 \text{ Вт/г}; \quad x_2 = 6-12 \text{ мин}; \quad x_3 = 3-9 \text{ кВ/см.}$$

Поверхности откликов и сечения трехфакторных моделей приведены на рисунке 4.



**Рис. 4.** Поверхности откликов и сечения трехфакторных моделей: а – температура нагрева сырья; б – производительность установки; в – энергетические затраты на термообработку в зависимости от удельной мощности генератора; продолжительность воздействия ЭМП СВЧ при напряженности электрического поля 6 кВ/см

Регрессионные модели изменения температуры  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), производительности  $Q$  (кг/ч), энергозатрат  $W$ , (кВт·ч/кг) от удельной мощности генератора ( $p$ , Вт/г), продолжительности воздействия ЭМП СВЧ ( $\tau$ , мин) при напряженности электрического поля 6 кВ/см:

$$T, ^{\circ}\text{C} = 343,28 - 127,12 \cdot x_1 + 0,57 \cdot x_2 - 9,52 \cdot x_1^2 + 2,74 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,075 \cdot x_2^2; \quad (8)$$

$$Q, \text{ кг/ч} = 247,15 - 72,44 \cdot x_1 - 1479,97 \cdot x_2 + 4,54 \cdot x_1^2 + 261,41 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1985,84 \cdot x_2^2; \quad (9)$$

$$W, \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг} = -0,951 + 0,398 \cdot x_1 + 6,841 \cdot x_2 - 0,0023 \cdot x_1^2 - 2,28 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,246 \cdot x_2^2. \quad (10)$$

Из уравнений (7)–(9) следует, что все три фактора оказывают влияние на производительность, энергозатраты и температуру нагрева сырья. Эффективные режимы работы установки с СВЧ-энергоподводом в тороидальный резонатор с электроприводным внутренним цилиндром для термообработки жиросодержащих мясных отходов следующие:

- удельная мощность генератора – 2,7 Вт/г;
- продолжительность воздействия ЭМП СВЧ – 6–8 мин;
- напряженность электрического поля – 6 кВ/см;
- температура нагрева продукта – 108–110  $^{\circ}\text{C}$ ;
- производительность установки – 20,0–24,5 кг/ч.

Удельные энергетические затраты на термообработку сырья в непрерывном режиме составляют 0,173 кВт·ч/кг при следующих значениях мощностей:

- генератора 3,3 кВт;
- вентилятора 0,1 кВт;
- привода внутреннего цилиндра 0,25 кВт;
- привода шредера 0,4 кВт;
- привода диэлектрического диска 0,2 кВт.

Технические характеристики установки с СВЧ-энергоподводом в тороидальный резонатор приведены в таблице 3.

Таблица 3. Технические характеристики установки

Наименование	Параметры
Производительность, кг/ч	20,0–24,5
Потребляемая мощность СВЧ-установки, кВт	4,25
Удельные энергетические затраты, кВт·ч/кг	0,173
Частота вращения внутреннего цилиндра, об/мин	0,16–1,70
Габаритные размеры, м диаметр высота	0,918 1,224

Для характеристики качества готового продукта использовали органолептический метод оценки таких показателей, как цвет, запах, консистенция, вкус. В результате проведенных в специализированной лаборатории анализов установлено, что шквара и вытопленный жир соответствовали нормативным требованиям.

### Выводы

Разработана установка с СВЧ-энергоподводом в тороидальный резонатор с электроприводным внутренним цилиндром с керамическими вогнутыми отсеками, обеспечивающая равномерность распределения электрического поля бегущей волны высокой напряженности, позволяющая обеззараживать продукт и обеспечивать электромагнитную безопасность без дополнительного экранирующего корпуса с запредельными волноводами.

Удельные энергетические затраты на термообработку вторичного жиросодержащего мясного сырья в непрерывном режиме при реализации СВЧ-установки с тороидальным резонатором производительностью 24,5 кг/ч составляет 0,173 кВт·ч/кг.

Результаты исследования параметров электродинамических процессов с использованием САД/САЕ-системы CST Microwave Studio 2017 с достаточной достоверностью (0,95) совпадают со значениями, полученными с помощью теоретических формул: собственная добротность тороидального резонатора 57 000, а напряженность электрического поля в конденсаторной части резонатора – 6 кВ/см.

Неферромагнитный внутренний электроприводной цилиндр с керамическими вогнутыми отсеками обеспечивает непрерывный режим при равномерной загрузке сырья в неферромагнитный тороидальный резонатор, где возбуждается электрическое поле бегущей волны высокой напряженности, что интенсифицирует процесс термообработки жиросодержащего сырья с вытопкой жира при сокращении эксплуатационных затрат при сохранении потребительских свойств жира и шквары.

### Список источников

1. Алексейчик Л.В., Курушин А.А. Моделирование возбуждения диэлектрического резонатора полем плоской электромагнитной волны // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 11. С. 6. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.11.1.
2. Анфиногентов В.И., Морозов Г.А., Морозов О.Г. и др. Математическое моделирование и экспериментальное исследование процесса микроволновой сушки органических отходов // Вестник НЦ БЖД. 2020. № 3(45). С. 142–149.
3. Горбунова Н.А., Петрунина И.П. Проблемы использования отходов при производстве продукции предприятиями мясной отрасли // Мясная индустрия. 2023. № 9. С. 32–36. DOI: 10.37861/2618-8252-2023-09-32-36.
4. Гришина Е.М. Расчет установки для СВЧ обработки материалов с различными диэлектрическими свойствами // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. Т. 2, № 2(66). С. 54–58.

5. Захаров В.В., Тригорлы С.В. Численные и экспериментальные исследования процессов СВЧ термообработки диэлектриков в СВЧ камерах бегущей волны // Вопросы электротехнологии. 2020. № 1(26). С. 14–22.
6. Иванов А.С., Иванов В.А., Сидоренко Д.С. и др. Прорывные электро-волновые технологии и оборудование для утилизации и обезвреживания отходов // Управление муниципальными отходами как важный фактор устойчивого развития мегаполиса. 2018. № 1. С. 103–110.
7. Кабдин Н.Е., Андреев С.А. Обеспечение равномерности СВЧ-обработки сельскохозяйственных материалов в объемном резонаторе // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 5. С. 42–49.
8. Новикова Г.В., Воронов Е.В., Михайлова О.В. и др. Обоснование параметров установки с СВЧ энергоподводом для высокотемпературного формования вторичного биологического сырья // Вестник НГИЭИ. 2023. № 4(143). С. 55–66. DOI: 10.24412/2227-9407-2023-4-55-66.
9. Новикова Г.В., Воронов Е.В., Михайлова О.В. и др. Разработка и обоснование параметров установки с СВЧ энергоподводом в биконический резонатор для термообработки мясного сырья // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 5(103). С. 154–160. DOI: 10.37670/2073-0853-2023-103-5-154-160.
10. Перфилова О.В. Изменение биологически активной ценности вторичного сырья в процессе СВЧ-нагрева // Вестник Красноярского ГАУ. 2018. № 2(137). С. 123–128.
11. Поручиков Д.В. Разработка и обоснование параметров СВЧ установки для термообработки субпродуктов // Вестник Чувашского ГАУ. 2022. № 3. С. 109–113. DOI: 10.48612/vch/3fru-4g5t-4t1d.
12. СВЧ установка с квазистационарным резонатором для вытопки обеззараженного жира из измельченного жиросодержащего сырья в непрерывном режиме: пат. 2726565 Рос. Федерация. Тихонов А.А., Казаков А.В., Белова М.В. и др. № 2019122928; заявл. 16.07.2019, опубл. 14.07.2020. Бюл. № 20. 9 с.
13. Стрекалов А.В., Стрекалов Ю.А. Электромагнитные поля и волны: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. Москва: РИОР: ИНФРА-М, 2014. 375 с.
14. Титов Е.В., Сошников А.А., Васильев В.Ю. Компьютерное моделирование наложенных электромагнитных волн от источников электромагнитного поля в широком диапазоне частот // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 3(209). С. 102–108. DOI: 10.53083/1996-4277-2022-209.
15. Тухватуллин М.И. Виды модернизации существующей СВЧ электротехнологической установки для осуществления тепловой и нетепловой СВЧ модификации материалов // Российский электронный научный журнал. 2023. № 3(49). С. 8–19. DOI: 10.31563/2308-9644-2023-49-3-8-19.
16. Тухватуллин М.И. Конструкции гибридной СВЧ электротехнологической установки для обработки материалов в сельском хозяйстве // Российский электронный научный журнал. 2023. № 3(49). С. 20–33. DOI: 10.31563/2308-9644-2023-49-3-20-33.
17. Тухватуллин М.И. Обеспечение равномерной микроволновой обработки биологических субстратов в СВЧ электротехнологической установке // Российский электронный научный журнал. 2022. № 4(46). С. 22–32. DOI: 10.31563/2308-9644-2022-46-4-22-32.
18. Фомин Д.Г., Дударев Н.В., Даровских С.Н. и др. Особенности применения объемно-модульной технологии в проектировании СВЧ электронных устройств // Ural Radio Engineering Journal. 2021. Т. 5, № 2. С. 91–103. DOI: 10.15826/urej.2021.5.2.001.
19. Шпедт Е.Р., Андреев П.Г., Гришко А.К. и др. Возможности «CST STUDIO SUITE» при проектировании высокочастотных устройств // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2020. Т. 2. С. 158–160.

## References

1. Alekseychik L.V., Kurushin A.A. Simulation of microwave dielectric resonator by plane electromagnetic wave. *Journal of Radio Electronics*. 2020;11:6. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.11.1. (In Russ.).
2. Anfingentov V.I., Morozov G.A., Morozov O.G. et al. Mathematical modeling and experimental study of microwave drying of organic waste. *Vestnik NTsBZhD (Scientific Center for Life Safety)*. 2020;3(45):142-149. (In Russ.).
3. Gorbunova N.A., Petrunina I.P. Waste management problems in manufacturing products by enterprises of meat industry. *Meat Industry*. 2023;9:32-36. DOI: 10.37861/2618-8252-2023-09-32-36. (In Russ.).
4. Grishina E.M. Calculation of the installation for microwave frequency processing of materials with various dielectric properties. *Vestnik Saratov State Technical University*. 2012;2(2):54-58. (In Russ.).
5. Zakharov V.V., Trigorly S.V. Numerical and field research of microwave thermal processing of dielectrics in microwave travelling wave chambers. *Journal of Electrotechnics*. 2020;1(26):14-22. (In Russ.).
6. Ivanov A.S., Ivanov V.A., Sidorenko D.S. et al. Breakthrough electro-wave technologies and equipment for waste disposal. *Management of municipal waste as an important factor of sustainable urban development*. 2018;1:103-110. (In Russ.).
7. Kabdin N.E., Andreev S.A. Ensuring the uniformity of microwave processing of agricultural materials in volumetric resonator. *International Technical and Economic Journal*. 2018;5:42-49. (In Russ.).
8. Novikova G.V., Voronov E.V., Mikhailova O.V. et al. Justification of the parameters of the installation with a microwave power supply for high-temperature molding of secondary biological raw materials. *Bulletin NGIEI*. 2023;4(143):55-66. DOI: 10.24412/2227-9407-2023-4-55-66. (In Russ.).
9. Novikova G.V., Voronov E.V., Mikhailova O.V. et al. Development and justification of parameters of the installation with a microwave power supply to a biconic resonator for heat treatment of meat raw materials. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2023;5(103):154-160. DOI: 10.37670/2073-0853-2023-103-5-154-160. (In Russ.).

10. Perfilova O.V. Biologically active value change of secondary raw materials in microwave heating process. *Bulletin of KrasSAU*. 2018;2(137):123-128. (In Russ.).
11. Poruchikov D.V. Development and substantiation of the parameters of the microwave installation for heat treatment of by-products. *Vestnik Chuvash SAU*. 2022;3:109-113. DOI: 10.48612/vch/3fpu-4g5t-4t1d. (In Russ.)
12. Microwave unit with a quasi-stationary resonator for melting of decontaminated fat from milled fat-containing material in continuous mode: Patent 2726565 Russian Federation. Tikhonov A.A., Kazakov A.V., Belova M.V. et al. No. 2019122928; claimed 16.07.2019, published 14.07.2020. *Bulletin* 20. 9 p. (In Russ.).
13. Strekalov A.V., Strekalov Yu.A. Electromagnetic fields and waves: textbook for students of higher education institutions. Moscow: RIOR: INFRA-M; 2014. 375 p. (In Russ.).
14. Titov E.V., Soshnikov A.A., Vasiliev V.Yu. Computer simulation of superimposed electromagnetic waves from electromagnetic field sources in a wide frequency range. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2022;3(209):102-108. DOI: <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-209>. (In Russ.).
15. Tukhvatullin M.I. Types of modernization of the existing microwave electrotechnological installation for implementation of thermal and non-thermal microwave modification of materials. *Russian Electronic Scientific Journal*. 2023;3(49):8-19. DOI: 10.31563/2308-9644-2023-49-3-8-19. (In Russ.).
16. Tukhvatullin M.I. Designs of hybrid microwave electrical installation for processing materials in agriculture. *Russian Electronic Scientific Journal*. 2023;3(49):20-33. DOI: 10.31563/2308-9644-2023-49-3-20-33. (In Russ.).
17. Tukhvatullin M. I. Provision of uniform microwave processing of biological substrates in a microwave electrical installation. *Russian Electronic Scientific Journal*. 2022;4(46):22-32. DOI: 10.31563/2308-9644-2022-46-4-22-32. (In Russ.).
18. Fomin D.G., Dudarev N.V., Darovskikh S.N. et al. Specific features of volume-modular technology application in the design of microwave electronic devices. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):91-103. DOI: 10.15826/urej.2021.5.2.001. (In Russ.).
19. Shpedt E.R., Andreev P.G., Grishko A.K. et al. The possibilities of the CST STUDIO SUITE in the design of high-frequency devices. *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*. 2020;2:158-160. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

Е.В. Воронов – кандидат экономических наук, доцент, директор инженерного института ГБОУ ВО «Нижегородский инженерно-экономический университет», [e\\_voronov@list.ru](mailto:e_voronov@list.ru).

Г.В. Новикова – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ГБОУ ВО «Нижегородский инженерно-экономический университет», [NovikovaGalinaV@yandex.ru](mailto:NovikovaGalinaV@yandex.ru).

С.А. Суслов – доктор экономических наук, доцент кафедры экономики и автоматизации бизнес-процессов ГБОУ ВО «Нижегородский инженерно-экономический университет», [nccsmailu@mail.ru](mailto:nccsmailu@mail.ru).

М.В. Просвирякова – доктор технических наук, доцент кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», [prosviryakova.maryana@yandex.ru](mailto:prosviryakova.maryana@yandex.ru).

О.В. Михайлова – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи ГБОУ ВО «Нижегородский инженерно-экономический университет», [ds17823@yandex.ru](mailto:ds17823@yandex.ru).

#### **Information about the authors**

E.V. Voronov, Candidate of Economic Sciences, Director of the Engineering Institute, Nizhny Novgorod University of Engineering and Economics, [e\\_voronov@list.ru](mailto:e_voronov@list.ru).

G.V. Novikova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Research Scientist, Nizhny Novgorod University of Engineering and Economics, [NovikovaGalinaV@yandex.ru](mailto:NovikovaGalinaV@yandex.ru).

S.A. Suslov, Doctor of Economic Sciences, Docent, the Dept. of Economics and Automation of Business Processes, Nizhny Novgorod University of Engineering and Economics, [nccsmailu@mail.ru](mailto:nccsmailu@mail.ru).

M.A. Prosviryakova, Doctor of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Automation and Robotics of Technological Processes named after Academician I.F. Borodin, Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy, [prosvirya-kova.maryana@yandex.ru](mailto:prosvirya-kova.maryana@yandex.ru).

O.A. Mikhailova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Information Communication Technologies and Communication Systems, Nizhny Novgorod University of Engineering and Economics, [ds17823@yandex.ru](mailto:ds17823@yandex.ru).

**Статья поступила в редакцию 10.01.2024; одобрена после рецензирования 20.02.2024; принята к публикации 26.02.2024.**

**The article was submitted 10.01.2024; approved after reviewing 20.02.2024; accepted for publication 26.02.2024.**

© Воронов Е.В., Новикова Г.В., Суслов С.А., Просвирякова М.В., Михайлова О.В., 2024