



Обоснование параметров СВЧ-установки для обезжиривания костей убойных животных

Г. В. Новикова¹✉, А. А. Тихонов², М. В. Просвирякова³,
В. Ф. Сторчевой³, О. В. Михайлова¹, А. В. Сторчевой⁴

¹ Нижегородский государственный инженерно-экономический университет
(г. Княгинино, Российская Федерация)

² Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия
(г. Нижний Новгород, Российская Федерация)

³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева
(г. Москва, Российская Федерация)

⁴ Российский биотехнологический университет
(г. Москва, Российская Федерация)

✉ NovikovaGalinaV@yandex.ru

Аннотация

Введение. Существующие способы обезжиривания костей животных малоэффективны и требуют высоких эксплуатационных затрат. Для решения данной проблемы авторами настоящей статьи предлагается установка со сверхвысокочастотным энергоподводом в резонатор, где измельченное сырье подвергается термомеханическому воздействию. **Цель исследования.** Повышение эффективности извлечения жира из костей убойных животных с сохранением кормовой ценности продукта в СВЧ-установке непрерывно-поточного действия с коаксиальным резонатором без экранирующего корпуса путем обеспечения высокой напряженности электрического поля и термомеханического воздействия на сырье.

Материалы и методы. Трехмерное электромагнитное моделирование процессов распределения электромагнитного поля в коаксиальном резонаторе проводилось в системах проектирования CST Microwave Studio, Computer Aided Design (CAD) и Computer Aided Engineering (CAE).

Результаты исследования. Сверхвысокочастотная установка содержит ферромагнитный усеченный конус, внутри которого соосно расположен электроприводной бичевой ротор с ферромагнитным валом, образующей коаксиальный резонатор с коническим кольцевым пространством. На валу ротора со сдвигом по высоте закреплены фторопластовые ступицы, к которым попарно с обеих сторон прикреплены корундовые била. С учетом исходных параметров измельченного костно-жирового сырья определена динамика нагрева при разных удельных мощностях СВЧ-генератора. **Обсуждение и заключение.** Результаты исследования электродинамических параметров резонатора свидетельствуют о том, что напряженность электрического поля, достаточная для снижения бактериальной обсемененности продукта, составляет 2–5 кВ/см.

© Новикова Г. В., Тихонов А. А., Просвирякова М. В.,
Сторчевой В. Ф., Михайлова О. В., Сторчевой А. В., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Эффективный режим обезжиривания костного сырья достигается при удельной мощности генератора 0,71 кВт/кг, продолжительности воздействия сверхвысокочастотного электромагнитного поля 6,55 мин (при загрузке резонатора 9,3 кг), производительности 85 кг/ч, энергетических затратах 0,141 кВт·ч/кг и температуре нагрева 90–100 °С.

Ключевые слова: коаксиальный резонатор, бичевой ротор, фторопластовые ступицы, корундовое било, СВЧ-установка, обезжиривание, костное сырье

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Обоснование параметров СВЧ-установки для обезжиривания костей убойных животных / Г. В. Новикова [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 2. С. 318–335. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.318-335>

Justification of the Microwave Unit Parameters for Removing Fat from the Bones of Meat-Producing Animals

G. V. Novikova^{a✉}, A. A. Tikhonov^b, M. V. Prosviryakova^a,
V. F. Storchevoy^c, O. V. Mikhaylova^c, A. V. Storchevoy^d

^a Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University
(Knyaginino, Russian Federation)

^b Nizhny Novgorod State Agricultural Academy
(Nizhny Novgorod, Russian Federation)

^c Russian Timiryazev State Agrarian University
(Moscow, Russian Federation)

^d Russian Biotechnological University
(Moscow, Russian Federation)

✉ NovikovaGalinaV@yandex.ru

Abstract

Introduction. The existing methods of removing fat from the bones of meat-producing animals are low-efficient and require high operating costs. To solve this problem, a unit with an ultra-high-frequency energy supply to the resonator is proposed. In this unit the crushed raw materials are subjected to thermomechanical action.

Aim of the Study. The aim of the study is to increase the efficiency of removing fat from the bones of meat-producing animals while preserving the product feed value in a continuous-flow process microwave unit with a coaxial resonator without a shielding housing by providing a high electric field strength and thermomechanical effect on the raw materials.

Materials and Methods. Three-dimensional electromagnetic modeling of electromagnetic field distribution processes in a coaxial resonator was carried out in the CST Microwave Studio, Computer Aided Design (CAD) and Computer Aided Engineering (CAE).

Results. The ultrahigh frequency unit contains a non-ferromagnetic truncated cone, inside which an electrically driven whip rotor with a non-ferromagnetic shaft is coaxially located, forming a coaxial resonator with a conical annular space. Fluoroplastic hubs are fixed to the rotor shaft with a height shift, to which corundum bilas are attached in pairs on both sides. A shell of a truncated cone coated with an abrasive material is coaxially attached to the inner shell of a non-ferromagnetic truncated cone. The dynamics of heating at different specific capacities of the microwave generator is determined taking into account the initial parameters of the crushed bone and fat raw materials.

Discussion and Conclusion. The results of studying the electrodynamic parameters of the resonator indicate that the electric field strength 2–5 kV/cm is sufficient to reduce bacterial contamination of the product. An effective mode for removing fat from bone raw

materials is when the generator specific power is 0.71 kW/kg, duration of exposure to an ultrahigh frequency electromagnetic field is 6.55 min (when loading the resonator 9.3 kg), productivity is 85 kg/h, energy consumption of is 0.141 kWh/kg and heating temperature is 90–100 °C.

Keywords: coaxial resonator, whip rotor, fluoroplastic hubs, corundum bilo, microwave installation, degreasing, bone raw materials

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Novikova G.V., Tikhonov A.A., Prosviryakova M.V., Storchevoy V.F., Mikhaylova O.V., Storchevoy A.V. Justification of the Microwave Unit Parameters for Removing Fat from the Bones of Meat-Producing Animals. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):318–335. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.318-335>

Введение. Согласно данным Росстата¹, в 2022 г. объем произведенной в России мясокостной муки составляет 564 тыс. т. В этой связи увеличилась и потребность в технологиях вытопки жира из костного сырья. В принятой практике пищевую кость обезжиривают сухим или мокрым способом при температуре до 100 °C. Качество жира зависит от максимальной температуры и продолжительности термообработки. Применение температуры выше 120 °C отрицательно сказывается на свойствах жира [1–3]. Наименьшая продолжительность обработки определяется временем плавления жира и выдержки сырья для уничтожения патогенной микрофлоры. Известно, что удельная теплота, необходимая для обработки жирсырья, не зависит от способа подвода энергии, а продолжительность обработки определяется видом подвода энергии, интенсивностью переноса теплоты и массы, площадью поверхности сырья и его электрофизическими свойствами. Для технологического процесса вытопки жира из костей убойных животных и получения костного остатка для выработки желатина или производства белкового корма используются установки с различными способами энергоподвода [4–6]. Ряд авторов² [7; 8] отмечают, что объемы производства белкового корма из костного сырья достаточно низкие, и предлагают варианты расширения сферы применения костного сырья. Также они описывают основные виды аппаратов и технологий переработки костного сырья для приготовления разных продуктов.

Цель исследования – повысить эффективность извлечения жира из костей убойных животных с сохранением кормовой ценности продукта в сверхвысокочастотной установке непрерывно-поточного действия с коаксиальным резонатором без экранирующего корпуса с помощью высокой напряженности электрического поля и термомеханического воздействия на сырье. При этом решаются такие задачи, как анализ оборудования для термомеханической обработки костей животных, разработка рабочей камеры с магнетронами воздушного охлаждения, определение продолжительности сверхвысокочастотного воздействия и режимов работы установки.

¹ Аналитический обзор рынка кормовых добавок [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/39yftQ> (дата обращения: 01.08.2023).

² Мухаметова А. Э., Ямалетдинова К. Ш. Комплексное использование костной массы как метод повышения эффективности мясоперерабатывающего предприятия // Инновации и наукоемкие технологии в образовании и экономике : мат-лы X Междунар. науч.-практ. и метод. конф. Уфа : Башкирский государственный университет, 2022. С. 35–37.

Обзор литературы. В настоящее время известны гидромеханические и электроимпульсные способы извлечения жира из костей. Обезжиривание предварительно измельченных костей в смеси с водой в гидромеханической машине основано на принципе ударно-импульсного разрушения жировых клеток. Импульсы возникают при движении бил, вращающихся на электроприводном валу в корпусе машины. При ударе смеси о турбулизатор создаются гидромеханические эффекты, обеспечивающие выделение жира. Далее смесь жира, воды и костей под действием центробежной силы выбрасывается в разделитель, где жир всплывает, откуда его направляют в плавильный аппарат³.

К недостаткам такого метода необходимо отнести значительный расход воды, большое количество задействованных аппаратов (в том числе гидромеханической машины высокой производительности), а также то, что энергоэффективность самой установки не отвечает требованиям фермерских хозяйств (достаточно иметь установку до 200 кг/ч).

В электроимпульсных аппаратах нет электроприводных узлов. Для обезжиривания костей создают динамические импульсы в жидкости с помощью электрического пробоя между двумя электродами при разряде конденсаторов. При этом импульсная кавитация способствует разрушению оболочек жировых клеток и последующему вымыванию жира. После пропускания через зону разряда кость обезжиривается, а затем выгружается. Жир после отстаивания в аппарате выводится через гидрозатвор. Энергетические затраты достаточно низкие, однако аппарат работает при напряжении на электродах 30–60 кВ, а корпус заполнен водой. Пробивное напряжение воздуха – 30 кВ, поэтому требуется строгое соблюдение электробезопасности, что в условиях фермерских хозяйств выполняется не всегда.

В научной школе разработаны десятки СВЧ-установок для термообработки вторичного сырья животного происхождения [9–12]. Например, модульная СВЧ-установка непрерывно-поточного действия для термообработки и обеззараживания сырья животного происхождения [13] содержит съемные объемные резонаторы в виде трех модулей. Первый модуль предназначен для термообработки вторичного биологического сырья животного происхождения, включая замороженные блоки мясных отходов, но не может быть использован для извлечения жира из костей.

Известна СВЧ-установка с коническим резонатором для обезвоживания и термообработки мясных отходов (непищевая обрезь, субпродукты, кровь) [14]. Установка содержит конический экранирующий корпус с ситовым резонатором в виде усеченного конуса без оснований, внутри которого находится диэлектрический ротор в виде усеченного конуса, покрытый мелкозернистым абразивным материалом. Установка обеспечивает совмещение процессов обезвоживания измельченных мясных отходов, тонкого измельчения и термообработки сырья твердой фазы. Данная установка также не рассчитана на извлечение жира из костей.

³ Ивашов В. И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. Ч. 1. Оборудование для уоя и первичной обработки. М. : Колос, 2001. 552 с.

Существует СВЧ-установка с биконическим резонатором и пакетом тарелок для термообработки мясокостных конфискатов [15; 16]. Внутренний пакет фторопластовых тарелок установлен на электроприводной диэлектрический вал со спиральным диэлектрическим шнеком в нижней конической обечайке. Верхняя обечайка перфорирована и соосно расположена в экранирующем усеченном конусе. Использование данной установки позволит повысить качество обработки мясокостного сырья. Недостатком является сложная для санитарной обработки в условиях фермерских хозяйств конструкция.

Обзор существующих технологий и оборудования показал, что учеными не в полной мере решен вопрос вытопки жира из костей. Эффективность процесса вытопки зависит от способа подвода тепла, температуры нагрева сырья (не более 120 °С), величины измельченных частиц, согласованной с глубиной проникновения волны при диэлектрическом нагреве.

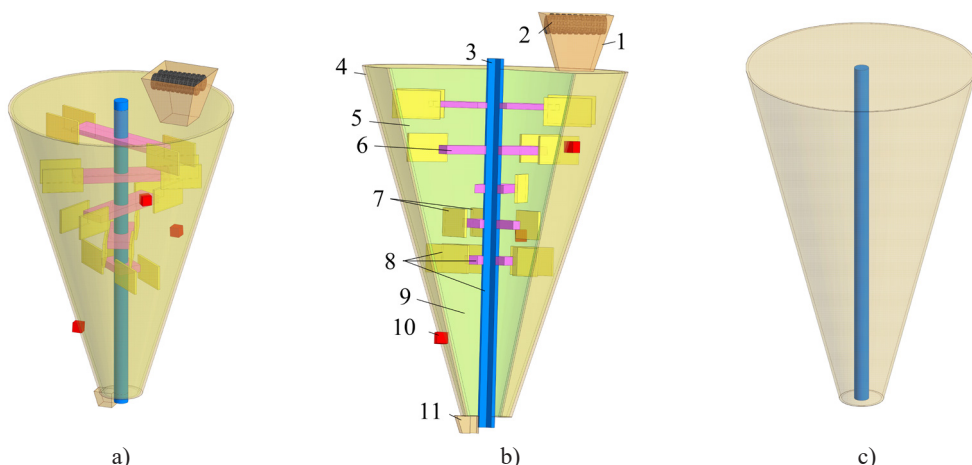
Таким образом, научная проблема заключается в низкой эффективности аппаратов для извлечения жира из костей убойных животных. Для интенсификации теплообмена авторами настоящей статьи предлагается установка СВЧ-энергоподвода в резонатор, где предварительно измельченное сырье будет подвергаться термомеханическому воздействию.

Материалы и методы. Трехмерное моделирование электродинамических процессов распределения электромагнитных полей в резонаторе нестандартной конструкции и определение рациональных электродинамических параметров проводили с использованием систем проектирования Computer Aided Design (CAD) и Computer Aided Engineering (CAE) [17–19].

Для проектирования, численного моделирования и оптимизации трехмерных электромагнитных систем использовали также пакет инструментов CST Microwave Studio Suite. Имеются разные программы [20; 21], содержащие базу данных волноводов и объемных резонаторов, из которых можно выбрать подходящие параметризованные модели и экспортировать данные в указанный пакет инструментов для выполнения моделирования и оптимизации. Частоту вращения бичевого ротора для тонкого измельчения костного сырья принимали по данным В. И. Ивашова. Она равна 200–250 об/мин.

Результаты исследования. На рисунке 1 показана СВЧ-установка непрерывно-поточного действия для извлечения жира из костей убойных животных, содержащая вертикально расположенный неферромагнитный усеченный конус 4 с загрузочной I и приемной II емкостями. Внутри загрузочной неферромагнитной емкости I расположен шредер 2. В усеченном конусе соосно расположен электроприводной бичевой ротор 8. Неферромагнитный вал 3 и неферромагнитный усеченный конус образуют коаксиальный резонатор 9. На наружной поверхности коаксиального резонатора со сдвигом на 120 °С по периметру установлены по высоте магнетроны 10 воздушного охлаждения с волноводами. На неферромагнитный валу бичевого ротора с помощью шпонок закреплены фторопластовые ступицы 6, к которым на пальцах попарно с двух противоположных сторон прикреплены четыре корундовых била 7. Каждая следующая пара бил смещена на 30 °С, что создает эффект винтовой линии. К внутренней обечайке неферромагнитного усеченного

конуса прикреплен диэлектрический усеченный конус 5, покрытый абразивным материалом. Между внешней кромкой бил 7 бичевого ротора 8 и внутренней поверхностью диэлектрического усеченного конуса образован зазор 2–3 см.



Р и с. 1. Цифровая модель СВЧ-установки для извлечения жира из костей убойных животных:

- а) общий вид; б) общий вид в разрезе с позициями;
 в) коаксиальный резонатор с коническим кольцевым пространством;
 1 – загрузочная емкость; 2 – шредер; 3 – неферромагнитный вал бичевого ротора;
 4 – неферромагнитный усеченный конус; 5 – диэлектрический усеченный конус;
 6 – ступицы фторопластовые; 7 – билы из корунда; 8 – бичевой ротор;
 9 – коаксиальный резонатор; 10 – магнетроны с волноводами; 11 – приемная емкость

F i g. 1. Digital model of the microwave installation for extracting fat from the bones of slaughtered animals: а) general view; б) general view in section with positions;

- в) coaxial resonator with conical annular space;
 1 – loading tank; 2 – shredder; 3 – non-ferromagnetic shaft of the scourge rotor;
 4 – non-ferromagnetic truncated cone; 5 – dielectric truncated cone; 6 – fluoroplastic hubs;
 7 – corundum bills; 8 – whip rotor; 9 – coaxial resonator; 10 – magnetrons with waveguides;
 11 – receiving capacity

Источник: здесь и далее в статье все рисунки составлены авторами.

Source: Hereinafter in this article all figures were drawn up by the authors.

Технологический процесс извлечения жира из костей убойных животных происходит следующим образом. Сначала необходимо включить электропривод бичевого ротора и электропривод шредера. Далее кости убойных животных загружают в емкость. Измельченные с помощью шредера кости животных поступают через загрузочную емкость в коаксиальный резонатор и попадают под вращающиеся билы (200–250 об/мин). После включения магнетронов в коаксиальном резонаторе возбуждается ЭМП СВЧ – электромагнитное поле сверхвысокой частоты (длина волны равна 12,24 см), измельченное жиросодержащее сырье подвергается эндотенному нагреву под действием токов поляризации.

Так как к внутренней обечайке усеченного неферромагнитного конуса прикреплена обечайка диэлектрического усеченного конуса, покрытая абразивным материалом, под действием центробежных сил сырье распределяется по стенкам

диэлектрического усеченного конуса, ударяясь об абразивное покрытие. В зазоре между внешними кромками бил и диэлектрическим усеченным конусом сырье движется вместе с билами вниз, так как они расположены со сдвигом на 30 °С по высоте рабочей камеры.

За счет многократного удара бичевым ротором в процессе эндогенного нагрева разрушается пограничный слой на поверхности измельченного сырья, ускоряя тем самым процесс массопереноса (повышается степень извлечения жира). При этом создаются термомеханические эффекты, обеспечивающие выделение жира из измельченных частиц сырья. Расположение бил по конической линии обеспечивает продольное смещение смеси. Сырье под действием центробежных сил вращающегося бичевого ротора отбрасывается к абразивной поверхности диэлектрического усеченного конуса. Происходит завихрение измельченных частиц костно-жирового сырья (турбулизация сырья).

Оно подвергается многократному механическому удару. Продолжительность процесса обезжиривания сырья в ЭМПСВЧ составляет 5–7 мин (в зависимости от удельной мощности генератора), после чего под действием центробежных сил смесь жира и частиц костей выбрасывается через отверстие в малом основании усеченного конуса в приемную неферромагнитную емкость *II* с заслонкой. Заполненную емкость следует передвинуть. В ней жир всплывает на поверхность, а кости оседают на дно. Большая скорость бичевого ротора и высокая напряженность электрического поля обеспечивают повышение интенсивности обезжиривания тонкоизмельченного сырья. Технологический эффект существенно зависит от частоты вращения бичевого ротора, зазора между бичами и абразивной поверхностью усеченного диэлектрического конуса, количества гонок (корундовых бил с диэлектрическими ступицами). Бичевой ротор выполняет функцию ударного и транспортирующего воздействия на сырье. Для обеспечения механического воздействия и дифференцированной скорости транспортирования сырья по высоте резонатора гонки установлены под различными углами к оси вала.

Характерной особенностью конического резонатора является наличие в резонансном объеме областей с резко выраженным экспоненциальным законом изменения электромагнитного поля. Наличие областей с таким распределением поля позволяет удалить часть поверхности с сохранением высокой собственной добротности резонатора для некоторых типов колебаний и тем самым реализовать открытую резонансную систему для функционирования СВЧ-установки в непрерывно-поточном режиме с соблюдением электромагнитной безопасности [22].

При плавлении жира происходят изменения его диэлектрических и теплофизических характеристик, что влияет на продолжительность диэлектрического нагрева до полного обезжиривания костного сырья.

С учетом удельной теплоемкости расплавленного жира 2300 Дж/кг·°С, фактора диэлектрических потерь при температуре 80–100 °С и ожидаемой напряженности электрического поля в коаксиальном резонаторе 5 кВ/см предварительно вычислена продолжительность воздействия ЭМПСВЧ на сырье.

Из выражения, характеризующего скорость нагрева жира ($\Delta T/\Delta\tau$, °C/с), продолжительность воздействия ЭМП СВЧ⁴ определяется по формуле:

$$\frac{\Delta T}{\Delta\tau} = \frac{0,555 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot k \cdot E^2 \left(\frac{B}{\text{см}}\right)^2 \cdot \eta \cdot 10^{-3}}{\rho \cdot c}, \text{ } ^\circ\text{C} / \text{с}, \quad (1)$$

где f – частота электромагнитного поля, МГц; k – фактор диэлектрических потерь; E – напряженность электрического поля, В/м; η – термический коэффициент полезного действия; ρ – плотность расплавленного жира, кг/м³; c – теплоемкость расплавленного жира, Дж/кг·°C.

Продолжительность воздействия ЭМП СВЧ рассчитаем следующим образом:

$$\Delta\tau = \frac{90 \cdot 930 \cdot 2300}{0,555 \cdot 10^{-12} \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 5000^2 \cdot 0,72} = 393 \text{ с} = 6,55 \text{ мин.} \quad (2)$$

Расчеты показывают, что при напряженности электрического поля, равной 5 кВ/см, продолжительность воздействия ЭМП СВЧ составляет 6,55 мин (0,109 ч), если термический КПД составляет 0,72–0,75.

В конструкционном исполнении установки необходимо реализовать технологическую задачу разрушения жировых клеток и выделения жира за период термомеханической обработки сырья. Для равномерного нагрева измельченного костного сырья в электромагнитном поле бегущей волны предусмотрена турбулизация частиц костно-жирового сырья под действием центробежных сил вращающегося бичевого ротора. Вычисленную продолжительность термомеханической обработки сырья следует корректировать с учетом требований технологии и результатов экспериментальных исследований.

Расчет конструктивных параметров открытого коаксиального резонатора проводился с учетом длины волны 12,24 см [23–25], уменьшения глубины проникновения волны в костное сырье при обезжиривании до 11,2–1,7 см⁵ [26–28], известных методик расчетов резонаторов сантиметрового диапазона [29–31].

Для обоснования эффективной конструкции резонатора были проведены теоретические расчеты с использованием известных математических выражений, а также компьютерное моделирование электродинамических процессов в коаксиальном резонаторе с коническим кольцевым пространством в программе CST Microwave Studio. Так, предварительно рассчитана собственная добротность резонатора при размерах усеченного конуса, согласованных с длиной волны 12,24 см. Высота равна 122,4 см; диаметр большого основания – 61,2 см; диаметр малого основания – 9 см. Собственная добротность вычислена через объем (V , м³) и площадь поверхности стенок алюминиевого резонатора (S , м²) с учетом толщины

⁴ Стрекалов А. В., Стрекалов Ю. А. Электромагнитные поля и волны : Учеб. пособие. М. : РИОР: ИНФРА-М, 2014. 375 с.

⁵ Рогов И. А. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов. М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981. 288 с.

скин-слоя ($\Delta = 1,72$ мкм) при частоте $2\,450$ МГц⁶. Объем и площадь поверхности коаксиального резонатора вычислены по нижеприведенным формулам:

$$V_{\text{конус}} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H = \frac{1}{3} \cdot 3,14 \cdot 30,6^2 \cdot 122,4 = 119\,959 \text{ см}^3; \quad (3)$$

$$S_{\text{кон.}} = \pi \cdot R \cdot (R + L) = 3,14 \cdot 30,6 \cdot (30,6 + 126,17) = 15\,063 \text{ см}^2; \quad (4)$$

$$V_{\text{конус}} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h = \frac{1}{3} \cdot 3,14 \cdot 4,5^2 \cdot 18 = 381,5 \text{ см}^3; \quad (5)$$

$$S_{\text{усеч. кон.}} = \pi \cdot r \cdot (r + l) = 3,14 \cdot 4,5 \cdot (4,5 + 7,6) = 171 \text{ см}^2; \quad (6)$$

$$V_{\text{усеч. кон.}} = 119\,959 - 381,5 = 119\,577,5 \text{ см}^3; \quad (7)$$

$$S_{\text{усеч. кон.}} = 15\,063 - 171 = 14\,892 \text{ см}^2, \quad (8)$$

где R , L , H и r , l , h – параметры конструкции: конуса и усеченной части конуса соответственно.

С учетом объема $3\,599 \text{ см}^3$ и площади $1\,176 \text{ см}^2$ поверхности неферромагнитного вала диаметром $3,06$ см объем и площадь поверхности коаксиального резонатора с коническим кольцевым объемом составляет:

$$\begin{aligned} V_{\text{резон.}} &= 119\,577,5 - 3\,599 = 115\,979 \text{ см}^3; \\ S_{\text{резон.}} &= 14\,892 - 1\,176 = 13\,716 \text{ см}^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Собственная добротность коаксиального резонатора вычисляется по формуле:

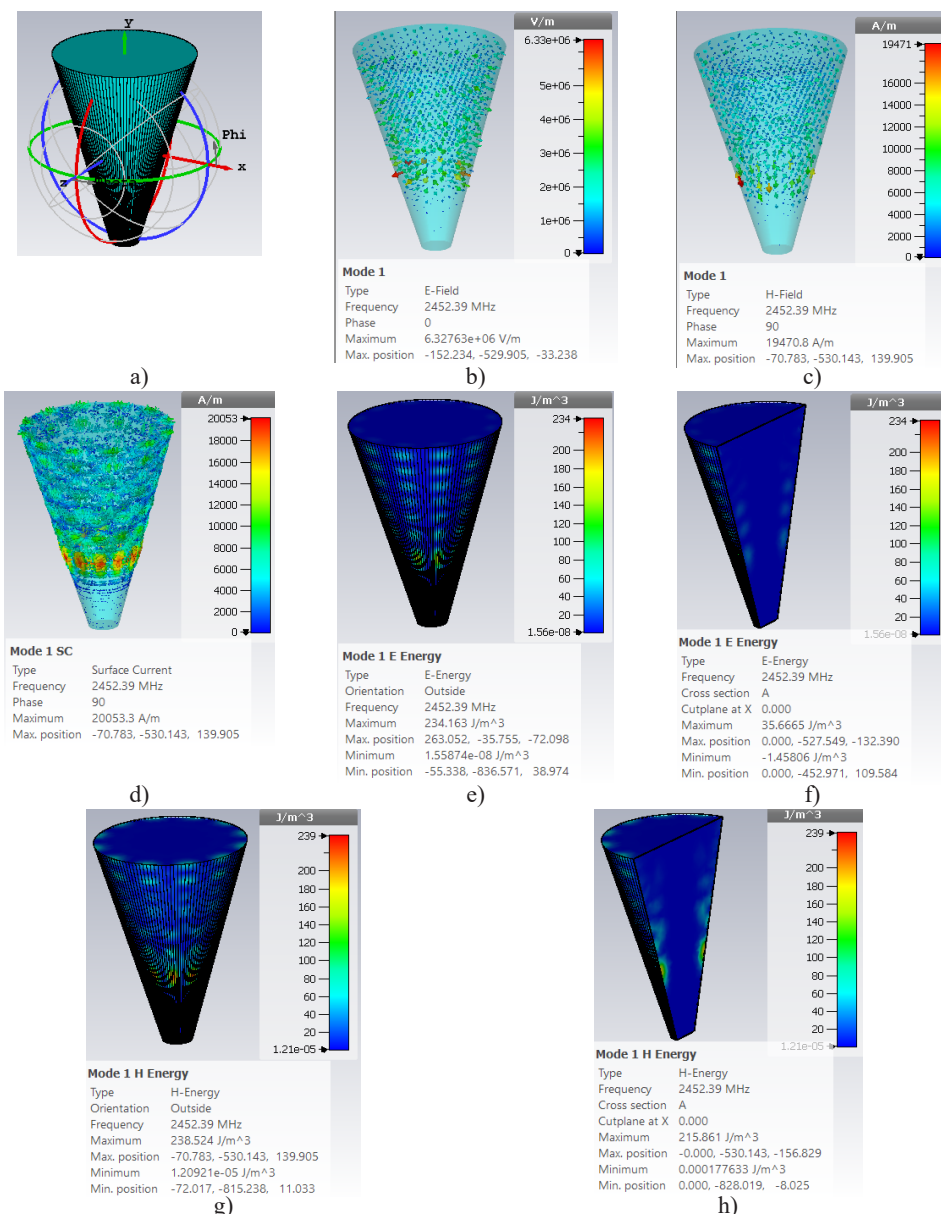
$$Q = \frac{2 \cdot V}{S \cdot \Delta} = \frac{2 \cdot 0,115979}{1,3716 \cdot 1,72 \cdot 10^{-6}} = 98\,322. \quad (10)$$

Расчеты показывают, что собственная добротность коаксиального резонатора равна $98\,322$, следовательно, термический КПД может составить $0,72\text{--}0,75$.

Результаты компьютерного моделирования электродинамических (ЭД) процессов в коаксиальном резонаторе с коническим кольцевым объемом (вышеуказанными задаваемыми параметрами конструкции) в программе CST Microwave Studio приведены на рисунке 2. Они свидетельствуют о том, что конические резонаторы исключают вырождение паразитных типов колебаний, а это позволяет достичь высоких значений собственной добротности.

Результаты моделирования распространения микроволнового поля для коаксиального резонатора с коническим кольцевым объемом $115\,979 \text{ см}^3$ (рис. 2), выполненного в программном комплексе электродинамического моделирования CST Microwave Studio, Computer Aided Design (CAD) и Computer Aided Engineering (CAE), позволили получить распределение ЭМП по координатным осям, вычислить напряженность электрического поля, напряженность магнитного поля, поверхностный ток, энергию электрического и магнитного полей.

⁶ Пчельников Ю. Н., Свиридов В. Т. Электроника сверхвысоких частот. М. : Радио и связь, 1981. 96 с.



Р и с. 2. Результаты компьютерного моделирования электродинамических параметров коаксиального резонатора с кольцевым коническим объемом (мода 1) в системах проектирования CST Microwave Studio, Computer Aided Design (CAD) и Computer Aided Engineering (CAE): а) распределение ЭМП по координатам x, y, z ; б) напряженность электрического поля, В/м; с) напряженность магнитного поля, А/м; д) поверхностный ток, А/м; е) Е-энергия, Вт/м³; ф) Е-энергия в разрезе, Вт/м³; г) H-энергия, Вт/м³; г) H-энергия, Вт/м³; h) H-энергия в разрезе, Вт/м³

F i g. 2. Electrodynamic parameters of a coaxial resonator with an annular conic space (mode 1) in the system CST Microwave Studio, Computer Aided Design (CAD) and Computer Aided Engineering (CAE): а) EMF distribution by x, y, z coordinates; б) electric field strength, В/м; с) magnetic field strength, А/м; д) surface current, А/м; е) E-energy, W/m³; ф) E-energy in section, W/m³; г) H-energy, W/m³; г) H-energy, W/m³; h) H-energy in section, W/m³

Для обеспечения непрерывного режима работы установки конический корпус усечен и представлен как открытый резонатор. С изменением угла при вершине конуса сформировано электромагнитное поле, сконцентрированное в основном в центральной области коаксиального резонатора, что способствует повышению собственной добротности резонатора с коническим кольцевым пространством. В средней части такого резонатора существуют волны, постоянные распространения которых уменьшаются в случае удаления от центра резонатора (рис. 4). Напряженность электрического поля в резонаторе находится в пределах 5 кВ/см, что позволяет уменьшить общее микробное число в продукте до предельно допустимого уровня 500 тыс. КОЕ/г. Ю. В. Корчагин и соавторы [32] доказали, что увеличение напряженности электрического поля, возбужденного маломощным источником СВЧ-излучения, выше 1,2 кВ/см обеспечивает уничтожение микроорганизмов.

Анализ электродинамики процессов СВЧ-термообработки костного сырья и результаты компьютерного моделирования электромагнитных волн подтверждают достоверность результатов теоретических исследований. В перспективе планируется создать СВЧ-установку с коаксиальным резонатором с кольцевым коническим пространством и уточнить результаты моделирования.

Поиск эффективных режимов работы СВЧ-установки сводится к выявлению условий, обеспечивающих интенсивное обезжиривание сырья при дозе воздействия ЭМП СВЧ 77–78 Вт·ч/кг ($6,6 \text{ кВт} \cdot 0,109 \text{ ч} / 9,3 \text{ кг} = 77,35 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$).

Так, эффективный режим обезжиривания достигается при удельной мощности генератора 0,71 кВт/кг; продолжительности воздействия ЭМП СВЧ 6,55 мин (при загрузке резонатора 9,3 кг); производительности 85 кг/ч; энергетических затратах 0,141 кВт·ч/кг; температуре нагрева 90–100 °С.

Технические характеристики СВЧ-установки для обезжиривания костей убойных животных приведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Технические характеристики СВЧ-установки для обезжиривания костей убойных животных
Technical characteristics of a microwave unit for degreasing the bones of slaughtered animals

Наименование / Name	Параметры / Parameters
1	2
Количество СВЧ-генераторов, шт. / Number of microwave generators, pcs.	6,000
Производительность, кг/ч / Capacity, kg/h	85,000
Масса единовременной загрузки сырья, кг / Mass of one-time loading of raw materials, kg	9,300
Мощность шести магнетронов, кВт / Power of six magnetrons, kW	6,600
Мощность шести вентиляторов для охлаждения магнетронов, кВт (вентилятор осевой канальный CV-150, 30 Вт) / Power of six fans for cooling magnetrons, kW (axial channel fan CV-150, 30 W)	0,180
Мощность бичевого ротора, кВт / The power of the whip rotor, kW	4,000
Частота вращения бичевого ротора, об/мин / The frequency of rotation of the whip rotor, rpm	200,000
Мощность шредера, кВт / Shredder power, kW	1,220

Окончание табл. 1 / End of table 1

1	2
Потребляемая мощность СВЧ-установки, кВт / Power consumption of the microwave unit, kW	12,000
Удельные энергетические затраты, кВт·ч/кг / Specific energy costs, kW·h/kg	0,141
Планируемая балансовая стоимость, тыс. руб. / Planned book value, thousand rubles	200,000

Источник: составлено авторами.

Source: Complited by the authors.

За счет неферромагнитного шредера в загрузочной емкости и усечения конуса на уровне критического сечения (диаметр малого основания равен 9 см), когда ЭМП отражается внутрь резонатора (рис. 4), при непрерывном режиме работы установки ожидается обеспечение электромагнитной безопасности на предельно допустимом уровне (допустимая мощность потока излучений равна 10 мкВт/см²) [32].

Обсуждение и заключение. Разработанная технология термомеханического метода извлечения жира из измельченного костно-жирового сырья и конструктивное исполнение СВЧ-установки с коаксиальным резонатором с кольцевым коническим объемом и бичевым ротором могут быть использованы для вытопки жира из костей убойных животных в фермерских хозяйствах.

Сочетание воздействия ЭМП СВЧ и многократного удара предварительно измельченного сырья с помощью диэлектрического бичевого ротора об абразивную поверхность при передвижении через коаксиальный резонатор в турбулентном режиме ускоряет процесс обезжиривания сырья при непрерывном режиме работы установки с соблюдением электромагнитной безопасности.

Результаты вычисления и визуализации распределения электромагнитного поля в режиме переходного процесса в коаксиальном резонаторе с кольцевым коническим объемом позволили комплексно оценить основные параметры электродинамической системы (собственную добротность, напряженность электрического поля, поверхностный ток, E-энергию и др.).

Результаты исследования показывают, что СВЧ-установка с шестью магнетронами воздушного охлаждения мощностью по 1,1 кВт при измельчении костно-жирового сырья убойных животных может обеспечить термомеханическое воздействие на сырье производительностью 85 кг/ч в непрерывном режиме при высокой напряженности электрического поля 5 кВ/см.

Для обеспечения необходимой технологической эффективности процесса обезжиривания сырья следует поддерживать следующий режим работы установки: напряженность электрического поля равна 2–5 кВ/см; удельная мощность генератора равна 0,71 кВт/кг; продолжительность воздействия ЭМП СВЧ равна 6,55 мин (при загрузке резонатора 9,3 кг); производительность равна 85 кг/ч; энергетические затраты равны 0,141 кВт·ч/кг; температура нагрева равна 90–100 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Файвишевский М. Л. Совершенствование переработки некоторых видов побочного мясного сырья // Мясные технологии. 2022. № 5 (233). С. 44–47. EDN: UQVXFX
2. Файвишевский М. Л. О переработке и использовании кости убойных животных на пищевые цели // Мясные технологии. 2023. № 10 (250). С. 56–57. EDN: UZJKMS
3. Файвишевский М. Л. Новые решения по переработке и использованию некоторых видов специального побочного мясного сырья // Мясные технологии. 2021. № 11 (227). С. 40–43. EDN: TGHFEU
4. Файвишевский М. Л. Некоторые виды оборудования многопрофильного назначения // Мясные технологии. 2020. № 9 (213). С. 68–71. EDN: GWQKEB
5. Файвишевский М. Л. Некоторые предложения по совершенствованию переработки и использованию животного сырья // Мясные технологии. 2023. № 7 (247). С. 40–41. EDN: ZPZPGT
6. Файвишевский М. Л. К вопросу о бережливом производстве на мясокомбинатах // Мясные технологии. 2021. № 5 (221). С. 24–27. EDN: FSXEAP
7. Киселева И. С., Рудик Ф. Я., Романова О. В. Ресурсосберегающие технологии переработки мясной продукции // Аграрный научный журнал. 2023. № 5. С. 140–145. <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i5pp140-145>
8. Сверхвысокочастотная установка с коаксиально расположенными резонаторами для термообработки и стерилизации измельченного мясного сырья в непрерывном режиме : патент № 2716084 Российская Федерация / Осокин В. Л. [и др.]. № 2019129666 ; заявл. 19.09.2019 ; опубл. 05.03.2020, Бюл. № 7. 9 с.
9. Разработка и обоснование параметров установки с СВЧ-энергоподводом в биконической резонатор для термообработки мясного сырья / Г. В. Новикова [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 5 (103). С.154–160. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-103-5-154-160>
10. Анализ разработанных сверхвысокочастотных установок для термообработки сырья / Г. В. Новикова [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. Т. 11, № 4 (42). С. 89–93. URL: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/15648/view> (дата обращения: 01.08.2023).
11. Microwave Heating of Slaughterhouse Confiscations to Increase the Feed Value / O. V. Mikhailova [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Issue 857. Article no. 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/857/1/012002>
12. Survey on UHF Device Operating Modes for Thermal Treatment and Disinfection of Nonfood Animal-Origin Raw Materials / G. V. Zhdankin [et al.] // Russian Agricultural Sciences. 2020. Vol. 46, Issue 1. P. 94–99. <https://doi.org/10.3103/S1068367420010206>
13. Перспективы использования вторичных ресурсов мясоперерабатывающих отраслей на основе патентных исследований / В. А. Углов [и др.] // Инновации и продовольственная безопасность. 2020. № 3 (29). С. 39–46. <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2020-29-3-39-46>
14. Сверхвысокочастотная установка с коническим резонатором для обезвоживания и термообработки мясных отходов : патент № 2710154 Российская Федерация / Казаков А. В. [и др.]. № 2019118371 ; заявл. 13.06.2019 ; опубл. 24.12.2019, Бюл. № 36. 10 с.
15. Воронов Е. В. Исследование и обоснование параметров СВЧ-установки, реализующей ресурсосберегающую технологию термообработки мясных отходов // Вестник НГИЭИ. 2023. № 8 (147). С. 33–43. URL: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=2269 (дата обращения: 01.08.2023).
16. СВЧ-установка с биконическим резонатором и пакетами тарелок для термообработки мясокостных конфискатов : патент № 2803127 Российская Федерация / Новикова Г. В. [и др.]. № 2023115058 ; заявл. 08.06.2023 ; опубл. 06.09.2023, Бюл. № 25. 22 с.
17. Алексейчик Л. В., Курушин А. А. Моделирование возбуждения диэлектрического резонатора полем плоской электромагнитной волны // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 11. С. 1–16. EDN: XYFOXV

18. Бабак Л. И., Коколов А. А. Создание отечественной платформы САПР для проектирования СВЧ-устройств и полупроводниковых ИС // Наноиндустрия. 2020. Т. 13, № 54 (99). С. 377–378. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.377.378>
19. Особенности применения объемно-модульной технологии в проектировании СВЧ электронных устройств / Д. Г. Фомин [и др.] // Ural Radio Engineering Journal. 2021. Т. 5, № 2. С. 91–103. <https://doi.org/10.15826/urej.2021.5.2.001>
20. Татаркин Н. М., Зайцева Е. М., Шишаков К. В. Разработка волноводно-щелевых антенных решеток через взаимодополнение программ CST Microwave Studio и КОМПАС-3D // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 2. С. 69–80. <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2023-2-69-80>
21. Компьютерное моделирование наложенных электромагнитных волн от источников электромагнитного поля в широком диапазоне частот / Е. В. Титов [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 3 (209). С. 102–108. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-209-3-102-108>
22. Касимова А. У. Сравнительный анализ численных методов моделирования микрополосковой антенны // Проблемы автоматизации и управления. 2022. № 3 (45). С. 31–41. EDN: OCFQUY
23. Каткова Т. О., Седышев Э. Ю. Генератор СВЧ на кольцевом эллиптическом резонаторе в объемном интегральном исполнении // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2021. Т. 1. С. 430–433. EDN: SWJDTM
24. Исследование объемного полосково-щелевого перехода с П-образным щелевым резонатором / Д. Г. Фомин [и др.] // Ural Radio Engineering Journal. 2020. Т. 4, № 3. С. 277–292. <https://doi.org/10.15826/urej.2020.4.3.002>
25. Давидович М. В., Кобец А. К., Саяпин К. А. Возбуждение прямоугольного резонатора через окна связи в конвейерной установке СВЧ-нагрева // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 4. С. 88–99. <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.4.88-99>
26. Тухватуллин М. И. Обеспечение равномерной микроволновой обработки биологических субстратов в СВЧ электротехнологической установке // Российский электронный научный журнал. 2022. № 4 (46). С. 22–32. <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2022-46-4-22-32>
27. Тухватуллин М. И. Конструкции гибридной СВЧ электротехнологической установки для обработки материалов в сельском хозяйстве // Российский электронный научный журнал. 2023. № 3 (49). С. 20–33. <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2023-49-3-20-33>
28. Захаров В. В., Тригорлый С. В. Численные и экспериментальные исследования процессов СВЧ термообработки диэлектриков в СВЧ камерах бегущей волны // Вопросы электротехнологии. 2020. № 1 (26). С. 14–22. EDN: VKMMXC
29. Смирнов С. В., Морозов Г. А., Морозов О. Г. Разработка метода контроля параметров процесса микроволновой переработки отходов животноводства // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 11 (101). С. 67–73. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.101.11.010>
30. Вендин С. В. ЭМП СВЧ для обработки сырья в АПК // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. 2020. № 9. С. 38–41. EDN: FACCAV
31. Совместное использование ультразвуковой обработки и электрического поля СВЧ при дефростации мясного сырья / И. Ф. Горлов [и др.] // Аграрно-пищевые инновации. 2022. № 4 (20). С. 73–81. <https://doi.org/10.31208/2618-7353-2022-20-73-81>
32. Титов Е. В., Крюков А. В., Середкин Д. А. Сравнительный анализ подходов к нормированию электромагнитного поля в производственных условиях в соответствии с российскими и европейскими нормативными документами // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 10 (216). С. 81–89. URL: <http://vestnik.asau.ru/index.php/vestnik/article/view/1171> (дата обращения: 01.08.2023).

Об авторах:

Новикова Галина Владимировна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (606340, Российская Федерация, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9222-6450>, Researcher ID: ADR-0209-2022, NovikovaGalinaV@yandex.ru

Тихонов Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного аграрно-технологического университета (603107, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, д. 97), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3687-977X>, tichonov57@mail.ru

Просвирякова Марьяна Валентиновна, доктор технических наук, доцент, профессор Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация) (127550, Российская Федерация, г. Москва, Лиственничная аллея, д. 6, к. 24), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3258-260X>, Researcher ID: AAQ-1331-2021, prosviryakova.maryana@yandex.ru

Сторчевой Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И. Ф. Бородина Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127550, Российская Федерация, г. Москва, Лиственничная аллея, д. 6, к. 24), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, Researcher ID: ABB-9545-2021, vstorchevoy@mail.ru

Михайлова Ольга Валентиновна, доктор технических наук, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (606340, Российская Федерация, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9231-4733>, Researcher ID: GXV-1750-2022, ds17823@yandex.ru

Сторчевой Александр Владимирович, старший преподаватель кафедры социально-гуманитарных дисциплин Российского биотехнологического университета (125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3404-0361>, alecks.10@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Г. В. Новикова – научное руководство, сравнительный анализ конструкций, формулировка выводов.

А. А. Тихонов – расчет продолжительности термомеханической обработки сырья.

М. В. Просвирякова – анализ существующих аппаратов для термообработки жиросодержащего костного сырья.

В. Ф. Сторчевой – определение эффективной конструкции резонатора для обезжиривания костного сырья.

О. В. Михайлова – построение 3D-модели установок, моделирование трехмерных структур электромагнитного поля в объемном резонаторе.

А. В. Сторчевой – верстка и форматирование работы, сбор и обработка материалов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 11.09.2023; поступила после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 10.12.2023

REFERENCES

1. Fayvishevsky M.L. [Improvement of Processing of Some Types of By-Product Meat Raw Materials]. *Meat Technology*. 2022;(5):44–47. (In Russ.) EDN: UQVXFX
2. Fayvishevsky M.L. [On the Processing and use of Bones of Slaughtered Animals for Food Purposes]. *Meat Technology*. 2023;(10):56–57. (In Russ.) EDN: UZJKMS
3. Fayvishevsky M.L. [New Solutions for the Processing and use of Certain Types of Special By-Products of Meat Raw Materials]. *Meat Technology*. 2021;(11):40–43. (In Russ.) EDN: TGHFEU
4. Fayvishevsky M.L. [Some Types of Multi-Purpose Equipment]. *Meat Technology*. 2020;(9):68–71. (In Russ.) EDN: GWQKEB

5. Fayvishevsky M.L. [Some Suggestions for Improving the Processing and Use of Animal Raw Materials]. *Meat Technology*. 2023;(7):40–41. (In Russ.) EDN: ZPZPGT
6. Fayvishevsky M.L. [On the Issue of Lean Production at Meat Processing Plants]. *Meat Technology*. 2021;(5):24–27. (In Russ.) EDN: FSXEAP
7. Kiseleva I.S., Rudik F.Ya., Romanova O.V. [Development of White Bone Powder Production Technology]. *Agrarian Scientific Journal*. 2023;5:140–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i5pp140-145>
8. Osokin V.L., Novikova G.V., Mikhailova O.V., Belova M.V., Tikhonov A.A., Kazakov A.V. [Ultrahigh Frequency Installation with Coaxially Arranged Resonators for Heat Treatment and Sterilization of Ground Meat Raw Materials in Continuous Mode]. Patent 2,716,084 Russian Federation. 2020 May 03. 9 p. (In Russ.)
9. Novikova G.V., Voronov E.V., Prosviryakova M.V., Mikhailova O.V., Storchevoy V.F. Development and Substantiation of Parameters of an Installation with a Microwave Power Supply to a Biconic Resonator for Heat Treatment of Meat Raw Materials. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*. 2023;(5):154–160. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-103-5-154-160>
10. Novikova G.V., Zhdankin G.V., Mikhailova O.V., Belov A.A. Analysis of Microwave Installations for Heat Treatment of Raw Materials. *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*. 2016; 11;(4):89–93. (In Russ, abstract in Eng.) Available at: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/15648/view> (accessed 01.08.2023).
11. Mikhailova O.V., Gdankin G.V., Prosviryakova M.V., Novikova G.V., Storchevoy V.F. Microwave Heating of Slaughterhouse Confiscations to Increase the Feed Value. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;857:012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/857/1/012002>
12. Zhdankin, G.V. Storchevoy V.F., Novikova G.V., Umanskya P.M. Survey on UHF De-vice Operating Modes for Thermal Treatment and Disinfection of Nonfood Animal-Origin Raw Materials. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;46(1):94–99. <https://doi.org/10.3103/S1068367420010206>
13. Uglov V.A., Shelepov V.G., Borodai E.V., Slepchuk V.A. Prospects for Using Secondary Resources of Meat Processing Industries Based on Patent Research. *Innovations and Food Security*. 2020;(3):39–46. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2020-29-3-39-46>
14. Kazakov A.V., Novikova G.V., Gorbunov B.I., Tikhonov A.A. [Ultrahigh Frequency Installation with a Conical Resonator for Dehydration and Heat Treatment of Meat Waste]. Patent 2,710,154 Russian Federation. 2019 December 24. 10 p. (In Russ.)
15. Voronov E.V. Research and Justification of Parameters for a Microwave Setup Implementing a Resource-Saving Technology for Heat Treatment of Meat Waste. *Bulletin of NGIEI*. 2023;(8):33–43. (In Russ, abstract in Eng.) Available at: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=2269 (accessed 01.08.2023).
16. Novikova G.V., Voronov E.V., Mikhailova O.V., Prosviryakova M.V., Skvortsov Yu.A., Storchevoy V.F. [Microwave Installation with a Biconic Resonator and Packages of Plates for Heat Treatment of Meat and Bone Seizures]. Patent 2,803,127 Russian Federation. 2023 June 09. 22 p. (In Russ.)
17. Alekseychik L.V., Kurushin A.A. Modeling of excitation of a dielectric resonator by a plane electromagnetic wave field. *Journal of Radioelectronics*. 2020;11:1–16. (In Russ, abstract in Eng.) EDN: XYFOXB
18. Babak L.I., Kokolov A.A. [Creation of a Domestic CAD Platform for Designing Microwave Devices and Semiconductor ICS]. *Nanoindustry*. 2020;13:(54):377–378. (In Russ.) <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.377.378>
19. Fomin D.G., Dudarev N.V., Darovskikh S.N., Klygach D.S., Vakhitov M.G. Specific Features of Volume-Modular Technology Application in the Design of Microwave Electronic Devices. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):91–103. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15826/urej.2021.5.2.001>
20. Tatarkin N.M., Zaitseva E.M., Shishakov K.V. [Development of Waveguide-Slit Antenna Arrays Through Complementarity of CST Microwave Studio and Compass-3D Programs]. *Intelligent Systems in Production*. 2023;21(2):69–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2023-2-69-80>
21. Titov E.V., Soshnikov A.A., Vasiliev V.Yu., Solovskoy A.S. Computer Simulation of Superimposed Electromagnetic Waves from Electromagnetic Field Sources in a Wide Frequency Range. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2022;(3):102–108. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-209>
22. Kasimova A.U. [Comparative Analysis of Numerical Methods for Modeling a Microstrip Antenna]. *Problems of Automation and Control*. 2022;(3):31–41. (In Russ.) EDN: OCFQUY

23. Katkova T.O., Sedyshev E.Yu. [Microwave Generator on an Annular Elliptical Resonator in a Volumetric Integral Design]. *Microwave Electronics and Microelectronics*. 2021;1:430–433. (In Russ.) EDN: SWJDTM
24. Fomin D.G., Dudarev N.V., Darovskikh S.N., Baranov V.K. The Investigation of the Volumetric Strip-Slot Transition with U-Shaped Slot Resonator. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(3):277–292. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15826/urej.2020.4.3.002>
25. Davidovich M.V., Kobetz A.K., Sayapin K.A. Excitation of a Rectangular Resonator Through Communication Windows in the Conveyor Installation of Microwave Heating. *Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems*. 2022;25(4):88–99. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.4.88-99>
26. Tukhvatullin M.I. Provision of Uniform Microwave Processing of Biological Substrates in a Microwave Electrical Installation. *Russian Electronic scientific Journal*. 2022;(4):22–32. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2022-46-4-22-32>
27. Tukhvatullin M.I. [Designs of Hybrid Microwave Electrotechnological Equipment for Processing Materials in Agriculture]. *Russian Electronic scientific journal*. 2023;(3):20–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2023-49-3-20-33>
28. Zakharov V.V., Trigorly S.V. Numerical and Field Research of Microwave Thermal Processing of Dielectrics in Microwave Travelling Wave Chambers. *Questions of electrotechnology*. 2020;(1):14–22. (In Russ, abstract in Eng.) EDN: VKMMXC
29. Smirnov S.V., Morozov G.A., Morozov O.G. Development of a Method for Monitoring the Parameters of the Microwave Processing of Animal Waste. *International Research Journal*. 2020;(11):67–73. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.101.11.010>
30. Vendin S.V. [Microwave EMF for Processing Raw Materials in the Agro-Industrial Complex]. *Instrumentation and automation: maintenance and repair*. 2020;9:38–41. (In Russ.) EDN: FACCAV
31. Gorlov I.F., Mirosnik A.S., Danilov Yu.D., Bozhkova S.E. Combined use of Ultrasonic Processing and Microwave Electric Field During Meat Raw Materials Defrosting. *Agrarian and food innovations*. 2022;(4):73–81. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31208/2618-7353-2022-20-73-81>
32. Titov E.V., Kryukov A.V., Seredkin D.A. Comparative Analysis of Approaches to Norming of Electromagnetic Field Under Production Conditions in Accordance with the Russian and European Regulatory Documents. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2022;(10):81–89. (In Russ, abstract in Eng.) Available at: <http://vestnik.asau.ru/index.php/vestnik/article/view/1171> (accessed 01.08.2023).

About the authors:

Galina V. Novikova, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University (22a, Oktyabrskaya St., Knyaginino 606340, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9222-6450>, NovikovaGalinaV@yandex.ru

Alexander A. Tikhonov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy (97, Gagarin St., Nizhny Novgorod 603107, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3687-977X>, tichonov57@mail.ru

Mariana V. Prosviryakova, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Russian Timiryazev State Agrarian University (6, Larch Alley, Moscow 127550, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3258-260x>, Researcher ID: AAQ-1331-2021, prosviryakova.maryana@yandex.ru

Vladimir F. Storchevoy, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I.F. Borodin of the Russian Timiryazev State Agrarian University (6, Larch Alley, Moscow 127550, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, Researcher ID: ABB-9545-2021, vstorchevoy@mail.ru

Olga V. Mikhaylova, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department "Infocommunication Technologies and Communication Systems" of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University (22a, Oktyabrskaya St., Knyaginino 606340, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9231-4733>, Researcher ID: GXV-1750-2022, ds17823@yandex.ru



Alexander V. Storchevoy, Senior Lecturer, Department of Social and Humanitarian Disciplines, Russian Biotechnological University (11, Volokolamskoe Shosse, 125080 Moscow, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3404-0361>, alecks.10@mail.ru

Authors contribution:

G. V. Novikova – scientific guidance, comparative analysis of structures, formulation of conclusions.

A. A. Tikhonov – calculation of the duration of thermomechanical processing of raw materials.

M. V. Prosviryakova – analysis of existing devices for heat treatment of fat-containing bone raw materials.

V. F. Storchevoy – determination of the effective design of the resonator for degreasing bone raw materials.

O. V. Mikhaylova – construction of a 3D model of installations, modeling of three-dimensional structures of the electromagnetic field in a volumetric resonator.

A. V. Storchevoy – layout and formatting of work, collection and processing of materials.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 11.09.2023; revised 10.11.2023; accepted 10.12.2023