

УДК 621.

DOI: 10.48612/vch/3fpu-4g5t-4t1d

РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЧ УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ СУБПРОДУКТОВ**Д. В. Поручиков***Чувашский государственный аграрный университет
428003, г. Чебоксары, Российская Федерация*

Аннотация. Целью исследований является разработка и обоснование параметров сверхвысокочастотной установки с щелевым резонатором-барабаном для термообработки субпродуктов в процессе массирования для улучшения потребительских свойств, при сниженных эксплуатационных затратах. В разработанной установке реализованы две инновационные идеи. Первая – термообработка субпродуктов происходит при массировании и дополнительном нагреве рассола за счет дифракционного излучения в кольцевом пространстве между цилиндрическим экранирующим корпусом и резонатором, т.е. созданы условия для рекуперации электромагнитной мощности, излучаемой системой первичных источников. Вторая инновационная идея основана на том, что при генерации моды H_{011} в цилиндрическом резонаторе не требуется наличие контакта между боковой стенкой и основаниями. В стенках резонатора возбуждаются только токи, текущие по окружности цилиндра. Благодаря этому свойству между верхним основанием и цилиндрической частью щелевого резонатора-барабана может существовать зазор, что подавляет колебание E_{111} . Разработана и изготовлена СВЧ установка со щелевым резонатором-барабаном, и обоснованы режимы термообработки и массирования сырья, с учетом регрессионных моделей и результатов исследований физико-химических, микробиологических и органолептических показателей мясного продукта. Эффективные режимы работы установки: производительность 10 кг/ч; продолжительности обработки 1,0 ч, при концентрации соли 12,88%; удельные энергетические затраты 0,165 кВт·ч/кг; частота вращения резонатора-барабана 23 об/мин. Предложенная технология сочетания двух процессов позволяет ускорить термообработку субпродуктов в процессе массирования впитыванием посолочных веществ и получить продукт с улучшенными потребительскими показателями.

Ключевые слова: щелевой резонатор, экранирующий корпус, совмещение термообработки и массирования, субпродукты, посолочные вещества

Введение. Известно, что один из способов получения вареной продукции из мелкокускового мясного сырья с хорошими потребительскими свойствами – это использование эндогенного нагрева при массировании в рассоле. Процесс массирования мясного сырья в течение 3-4 ч после инъекции рассолом при производстве копченых изделий широко распространен, но для мелкокускового сырья такая технология исключается из-за трудности инъектирования рассолом [4].

Целью исследований является разработка и обоснование параметров сверхвысокочастотной установки с щелевым резонатором-барабаном для термообработки субпродуктов в процессе массирования для улучшения потребительских свойств, при сниженных эксплуатационных затратах.

Поставленная цель определила необходимость решения следующих задач:

1. Провести анализ современного состояния, перспектив и проблем переработки субпродуктов в фермерских хозяйствах, разработать принцип совмещения процессов термообработки и массирования мясного сырья для повышения эффективности функционирования сверхвысокочастотной установки и улучшения потребительских свойств продукта.

2. Составить модель процесса функционирования СВЧ установки с магнетронами воздушного охлаждения и щелевым резонатором-барабаном, имеющим обоснованные конструкционно-технологические параметры.

3. Исследовать электродинамические параметры (ЭД) установки с щелевым резонатором-барабаном с учетом интерференции и дифракции электромагнитных волн сантиметрового диапазона, в том числе в программе CST Microwave Studio для обоснования собственной добротности, напряженности электрического поля, мощности потока излучений. Вывести аналитические зависимости, позволяющие обосновать конструкционно-технологические параметры СВЧ установки с щелевым резонатором-барабаном.

4. Разработать и изготовить СВЧ установку с щелевым резонатором-барабаном и обосновать режимы работы с учетом регрессионных моделей и результатов исследований физико-химических, микробиологических и органолептических показателей мясного продукта. Апробировать установку в производственных условиях и оценить технико-экономическую эффективность внедрения установки в фермерское хозяйство.

Объекты и методы исследования. Объект исследований: технологические процессы в щелевом резонаторе установки, обеспечивающие ускорение термообработки субпродуктов в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) при их массировании в рассоле.

Предмет исследований: электродинамические параметры щелевого резонатора и закономерности термообработки сырья в процессе массирования и накопления посолочных веществ с выявлением эффективных режимов работы СВЧ установки.

Для экспериментальных исследований использованы современные методики, сертифицированные электроизмерительные приборы, стандартная методика оценки воспроизводимости результатов исследования в лабораторных и производственных условиях.

Теория построена на известных уравнениях распространения электромагнитных волн в цилиндрических резонаторах и дифференциальных методах решения задач.

Идея совмещения процессов термообработки и массирования в рассоле мелкокускового мясного сырья путем воздействия ЭМП СВЧ в щелевом резонаторе-барабане базируется на анализе практики и обобщения передового опыта российских и зарубежных предприятий, разрабатывающих СВЧ технику и мясомассажеры.

В работе использована методика вычисления напряженности электрического поля и собственной добротности резонаторов по программе CST Studio Suite 2019, методика активного планирования трехфакторного эксперимента типа 2^3 и статистическая обработка результатов исследования с применением прикладного программного обеспечения Microsoft Excel 10.0, Statistic 12, трехмерное моделирование конструкционного исполнения СВЧ установок в программе Компас-3DV20 [3].

Результаты исследований и их обсуждение. В разработанной радиогерметичной СВЧ установке со щелевым резонатором-барабаном в цилиндрическом экранирующем корпусе реализованы две инновационные идеи.

Первая идея – термообработка субпродуктов (птичьего сердца, печень КРС и свиней) происходит при массировании и дополнительном нагреве рассола за счет дифракционного излучения в кольцевом пространстве между цилиндрическим экранирующим корпусом и резонатором. Установка выполнена в виде двух соосно расположенных резонаторов: первый – внутренний щелевой цилиндрический резонатор-барабан, а второй – коаксиальный резонатор между экранирующим корпусом и резонатором-барабаном. 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. Таким образом, происходит повторное использование уходящей мощности через щелевой резонатор и сохранение в рассоле суммарного электромагнитного поля бегущей волны. В коаксиальном резонаторе направление волны ЭМП представляет собой волну, двигающуюся только в одном направлении. Именно такую возможность для электромагнитного поля необходимой структуры и представляет резонансная система, в которой электромагнитные волны проходят через сырье и рассол. Наличие кольцевого объема между щелевым резонатором-барабаном и экранирующим корпусом создает условия для рекуперации (повторного и многократного использования) электромагнитной мощности, излучаемой системой первичных источников.

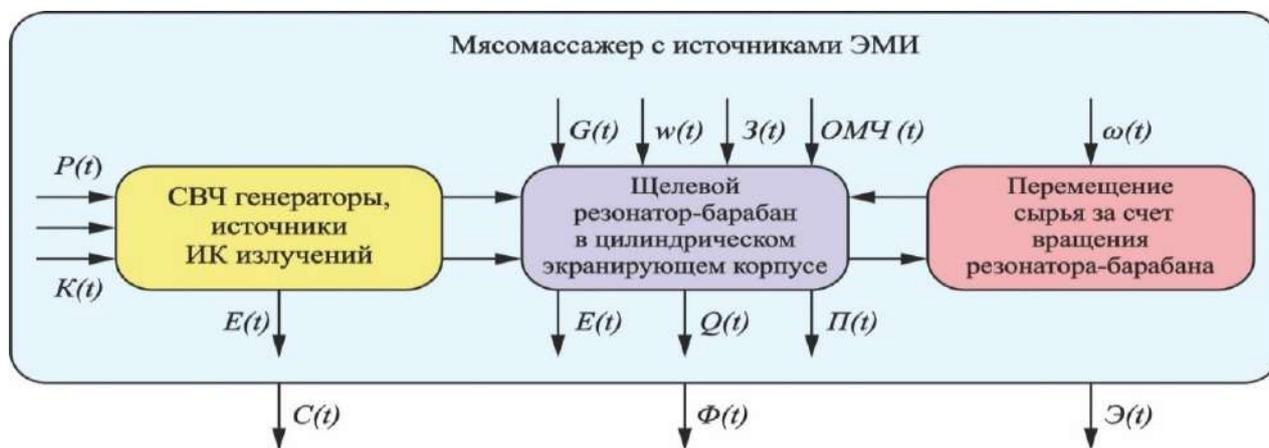


Рис.1. Структурная схема модели функционирования мясомассажера с источниками ЭМИ. Условные обозначения: $P(t)$ – мощность СВЧ генераторов и источников ИК излучений, $K(t)$ – количество генераторов, $E(t)$ – напряженность электрического поля, $G(t)$ – масса загрузки сырья, $W(t)$ – концентрация рассола, $Q(t)$ – собственная добротность резонатора, $ОМЧ(t)$ – общее микробное число в сырье, $Z(t)$ – разновидность мясного сырья, $\Phi(t)$ – физико-химический состав сырья, $C(t)$ – степень снижения бактериальной микрофлоры, $\Pi(t)$ – поток мощности излучений, $\mathcal{E}(t)$ – экономическая эффективность

Вторая инновационная идея основана на том, что при генерации моды H_{011} в цилиндрическом резонаторе не требуется наличие контакта между боковой стенкой и основаниями [2], [5], [6]. В стенках резонатора возбуждаются только токи, текущие по окружности цилиндра. Благодаря этому свойству между верхним основанием и цилиндрической частью щелевого резонатора-барабана может существовать зазор, что подавляет колебание E_{111} . Поэтому в таком конструкционном исполнении можно открыть крышку экранирующего корпуса, загрузить сырье в щелевой цилиндрический резонатор-барабан. Размеры щели намного меньше размеров субпродуктов и мощность потока дифракционных волн обеспечивает нагрев рассола до 40°C . Математическую модель функционирования системы можно представить как совокупность математических

соотношений между всеми нижеперечисленными параметрами. Общая структурная схема мясомассажера представлена на рис. 1.

Экспериментальная часть. С целью интенсификации фильтрационно-диффузионных процессов предлагается процесс массирования сырья осуществлять в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ). В установке циклического действия с цилиндрическим щелевым резонатором-барабаном в экранирующем корпусе (рис. 2) предусмотрено сочетание механического и электромагнитного воздействия на сырье без вакуума. На крышке корпуса, со стороны открытого торца резонатора установлен генераторный блок. Резонатор-барабан вращается со скоростью меньше критической, происходит массирование сырья. Компоненты сырья двигаются по сложным траекториям, что приводит к активному перемешиванию. Движущей силой процесса посола является разность концентрации соли в рассоле и в сырье, и градиент температуры за счет воздействия ЭМП СВЧ.



Рис. 2. Установка для термообработки и массирования субпродуктов (патент № 2650540)

В установке можно проводить разварку и стерилизацию продукта для продления срока хранения за счет посола сырья и термообработки.

Проведены исследования динамики эндогенного нагрева субпродуктов при накоплении посолочных веществ; распределения электромагнитного поля в щелевом резонаторе и в кольцевом объеме между ним и экранирующим корпусом, обеспечивающем рекуперации электромагнитной мощности для тепловой обработки рассола. Эти результаты позволили согласовать ключевые параметры установки с режимами работы, в том числе продолжительность термообработки в зависимости от дозы воздействия электромагнитного поля сверхвысокой частоты и концентрации рассола.

Исследования динамики эндогенного нагрева показывают, что за 25-30 мин из 5 кг птичьего сердца можно получить 5,9-6,2 кг вареного продукта, если удельная мощность генератора 0,16 Вт/г, а концентрация соли 12,68 %. Основными факторами, ускоряющими проникновение посолочных веществ в сырье, являются градиенты температуры и давления, возникающие при массировании. Рассол невысокой концентрации увеличивает влагосвязывающую способность мяса, с которой связаны консистенция, сочность и выход готовой продукции.

Выводы. Практическую значимость представляют:

1. Разработанные СВЧ установки для термообработки мелкокускового мясного сырья с разными конструктивными исполнениями резонаторов-барабанов, новизна технических решений которых защищена патентами РФ (№ 2537548, № 2650540) [1].

2. Разработанный и изготовленный опытный образец СВЧ установки с цилиндрическим щелевым резонатором-барабаном в экранирующем корпусе, для реализации термомеханического воздействия на мелкокусковое мясное сырье при равномерном распределении электрического поля и посолочного рассола в сырье.

3. Материалы экспериментальных исследований, позволяющие обосновать конструктивно-технологические параметры с режимами функционирования СВЧ установки с щелевым резонатором-барабаном, обеспечивающим ускорение термомеханического воздействия на мелкокусковое мясное сырье с достижением улучшения качества продукта при сниженных эксплуатационных затратах.

Заключение. 1. Предложена новая научная идея совмещения термообработки и массирования субпродуктов в рассоле для ускорения процесса и снижения энергетических затрат, реализованная в экранирующем цилиндре с щелевым резонатором-барабаном, не требующем наличия контакта между боковой стенкой и основаниями, где в кольцевом объеме возбуждается ЭМП СВЧ от потока дифракционных излучений через щелевой резонатор и рассол нагревается эндогенно.

2. Составлена модель процесса функционирования СВЧ установки с магнетронами воздушного охлаждения и со щелевым резонатором-барабаном, и обоснованными конструктивно-технологическими параметрами. Определены перспективы практического использования теоретических результатов исследований при обосновании эффективных параметров и режимов работы СВЧ установки с резонатором особой конфигурации, одновременно реализующей функцию мясомассажера, и представлены предложения по дальнейшему совершенствованию установки, для снижения эксплуатационных затрат и улучшения потребительских свойств продукта.

3. На основе анализа изменения физико-механических, диэлектрических характеристик субпродуктов и рассола в зависимости от температуры и концентрации соли и использования комплекса существующих методов исследования получены результаты динамики эндогенного нагрева сырья, оценена равномерность распределения электрического поля в цилиндрическом щелевом резонаторе.

Пользуясь теорией электромагнитного поля, исследованы электродинамические параметры системы со щелевым резонатором-барабаном с учетом интерференции и дифракции электромагнитных волн сантиметрового диапазона; на основе полученных аналитических зависимостей обоснованы конструктивно-технологические параметры СВЧ-установки с щелевым резонатором-барабаном.

С использованием программы CST Microwave Studio [7] получены результаты вычисления и визуализации распределения ЭМП в резонаторе, собственной добротности резонаторов (3712-6020). Напряженность электрического поля в цилиндрическом резонаторе из стержней с одним магнетроном составляет 0,6-1,0 кВ/см, коэффициент дифракции – 0,3-0,4.

4. Разработана и изготовлена СВЧ установка со щелевым резонатором-барабаном, и обоснованы режимы термообработки и массирования сырья, с учетом регрессионных моделей и результатов исследований физико-химических, микробиологических и органолептических показателей мясного продукта. Эффективные режимы следующие: производительность 10 кг/ч; удельная мощность 1,6 Вт/г; продолжительности обработки 1,0 ч, при концентрации соли 12,88%; удельные энергетические затраты 0,165 кВт·ч/кг; частота вращения резонатора-барабана 23 об/мин. Предложенная технология сочетания двух процессов позволяет ускорить термообработку субпродуктов в процессе массирования впитыванием посолочных веществ и получить продукт с улучшенными потребительскими показателями, о чем свидетельствуют положительные результаты микробиологических и органолептических показателей.

Разработанную установку по безопасной норме СВЧ излучения можно обслуживать на расстоянии 0,5 м в течение рабочего дня. Годовой экономический эффект составит 400 тыс. руб. за счет снижения эксплуатационных затрат при объеме выработанной продукции 16,8 тонны в год. Рентабельность повысится на 13%. Удельные энергетические затраты снижаются с 0,29 до 0,16-0,2 кВт·ч/кг.

Литература

1. Патент 2650540 РФ МПК А22С 17/00. СВЧ установка циклического действия для термообработки мясного сырья : № 2016150295; заявл. 20.12.2016; опубл. 16.04.2018. Бюл. № 11 / Г. В. Жданкин, А. Г. Самоделкин, Д. В. Поручиков, Г. В. Новикова, М. В. Белова. – 23 с.
2. Баскаков, С. И. Электродинамика и распространения волн / С. И. Баскаков. – Москва : Энергоиздат, 1992. – 208 с.
3. Жданкин, Г. В. Исследование электродинамических параметров СВЧ установок для термообработки влажного сырья / Г. В. Жданкин, М. В. Белова, В. Ф.Сторчевой // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – № 2(35), 2019. – С. 103-110.
4. Ивашов, В. И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. Ч.1. Оборудование для уоя и первичной обработки / В. И. Ивашов, Москва : Колос, 2001. – 552 с.
5. Пчельников, Ю. Н. Электроника сверхвысоких частот / Ю. Н. Пчельников, В.Т. Свиридов. – М.: Радио и связь, 1981. – 96 с.
6. Стрекалов А.В., Стрекалов Ю.А. Электромагнитные поля и волны – М.: РИОР: ИНФРА-М, 2014. – 373 с.
7. Шамин, Е. А. Просвирякова М.В. Исследование распределения электромагнитного поля в резонаторе СВЧ установки непрерывно поточного действия / Е. А. Шамин, Г. В. Новикова, О. В. Михайлова, М. В. Просвирякова // Вестник Чувашской сельскохозяйственной академии, 2020. – №4 (15). – С. 116-123.

Сведения об авторе

Поручиков Дмитрий Витальевич, соискатель кафедры механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства, Чувашский государственный аграрный университет, 428003, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, 29, e-mail: dv.poruchikov@yandex.ru, тел. 89875797646.

DEVELOPMENT AND SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF THE MICROWAVE INSTALLATION FOR HEAT TREATMENT OF BY-PRODUCTS

D. V. Poruchikov

*Chuvash State Agrarian University
428003, Cheboksary, Russian Federation*

Brief abstract. The aim of the research is to develop and justify the parameters of a microwave installation with a slotted resonator-drum for heat treatment of by-products in the process of massaging to improve consumer properties, at reduced operating costs. Two innovative ideas are implemented in the developed installation. First, heat treatment of by-products occurs during massaging and additional heating of the brine due to diffraction radiation in the annular space between the cylindrical shielding body and the resonator, i.e. conditions have been created for the recovery of electromagnetic power emitted by the system of primary sources. The second innovative idea is based on the fact that the generation of the H011 mode in a cylindrical resonator does not require contact between the side wall and the bases. In the walls of the resonator, only currents flowing along the circumference of the cylinder are excited. Due to this property, a gap can exist between the top base and the cylindrical part of the slot resonator drum, which suppresses the oscillation of E111. A microwave unit with a slotted resonator-drum was developed and manufactured, and the modes of heat treatment and massaging of raw materials were substantiated, taking into account regression models and the results of studies of the physicochemical, microbiological and organoleptic parameters of the meat product. Efficient operating modes of the installation: productivity 10 kg/h; duration of treatment 1.0 h, at a salt concentration of 12.88%; specific energy costs 0.165 kWh/kg; frequency of rotation of the resonator-drum 23 rpm. The proposed technology for combining the two processes makes it possible to accelerate the heat treatment of by-products in the process of massaging by the absorption of curing substances and obtain a product with improved consumer performance.

Key words: slotted resonator, shielding housing, combination of heat treatment and massaging, by-products, curing substances.

References

1. Patent 2650540 RF MPK A22C 17/00. SVCH ustanovka ciklicheskogo dejstviya dlya termoobrabotki myasnogo syr'ya : № 2016150295; zayavl. 20.12.2016; opubl. 16.04.2018. Byul. № 11 / G. V. Zhdankin, A. G. Samodel-kin, D. V. Poruchikov, G. V. Novikova, M. V. Belova. – 23 s.
2. Baskakov, S. I. Elektrodinamika i rasprostraneniya voln / S. I. Baskakov. – Moskva : Energoizdat, 1992. – 208 s.
3. Zhdankin, G. V. Issledovanie elektrodinamicheskikh parametrov SVCH ustanovok dlya termoobrabotki vlazhnogo syr'ya / G. V. Zhdankin, M. V. Belova, V. F. Storchevoj // Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. – № 2(35), 2019. – S. 103-110.
4. Ivashov, V. I. Tekhnologicheskoe oborudovanie predpriyatij myasnoj promyshlennosti. CH.1. Oborudovanie dlya uboia i pervichnoj obrabotki / V. I. Ivashov, Moskva : Kolos, 2001. – 552 s.
5. Pchel'nikov, YU. N. Elektronika sverhvyssokikh chastot / YU. N. Pchel'nikov, V.T. Sviridov. – M.: Radio i svyaz', 1981. – 96 s.
6. Strekalov A.V., Strekalov YU.A. Elektromagnitnye polya i volny – M.: RIOR: INFRA-M, 2014. – 373 s.
7. SHamin, E. A. Prosviryakova M.V. Issledovanie raspredeleniya elektromagnitnogo polya v rezonatore SVCH ustanovki nepreryvno potochnogo dejstviya / E. A. SHamin, G. V. Novikova, O. V. Mihajlova, M. V. Prosviryakova // Vestnik CHuvashskoj sel'skokozyajstvennoj akademii, 2020. – №4 (15). – S. 116-123.

Information about authors

Poruchikov Dmitry Vitalievich, applicant for the Department of Mechanization, Electrification and Automation of Agricultural Production, Chuvash State Agrarian University, 428003, Chuvash Republic, Cheboksary, st. K. Marx, 29, e-mail: dv.poruchikov@yandex.ru, tel. 89875797646.

УДК 620.193.3

DOI: 10.48612/vch/gt7f-8en1-phzx

КОРРОЗИЯ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ ХМЕЛЕВОДСТВА В АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ

А. Г. Смирнов, А. А. Гордеев, А. В. Семенов
*Чувашский государственный аграрный университет
428003, Чебоксары, Российская Федерация*

Аннотация. Машины и оборудование для возделывания хмеля используются кратковременно в течение года, большей частью они находятся на хранении. Поверхности деталей указанных машин с изношенными