

Обоснование параметров СВЧ установки для обеззараживания и отделения пуха от шкур кроликов

Евгений А. Шамин	¹	evg.shamin4@gmail.com
Галина В. Новикова	¹	NovikovaGalinaV@yandex.ru
Ольга В. Михайлова	¹	ds17823@yandex.ru
Марьяна В. Белова	¹	maryana_belova_803@mail.ru

¹ Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, ул. Октябрьская, 22, г. Княгинино, 606340, Россия

Реферат. Целью настоящей работы является обоснование параметров и режимов работы сверхвысокочастотной установки для отделения пуха со шкур кроликов в непрерывном режиме. В связи с поставленной целью решаются задачи: определить необходимую мощность электромагнитных излучений для снижения бактериальной обсемененности сырья; определить критическую напряженность электрического поля сверхвысокой частоты, обеспечивающую уничтожения микроорганизмов в сырье; согласовать величину напряженности электрического поля с собственной добротностью, объемом резонатора и производительностью установки; обосновать конфигурацию резонатора, обеспечивающую критическую напряженность электрического поля, высокую собственную добротность, радиогерметичность при непрерывном режиме работы установки; разработать СВЧ установку, реализующую микроволновую технологию отделения обеззараженного пуха со шкур кроликов. В работе применена теория электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ). Бактерицидный эффект воздействия ЭМП СВЧ исследовали согласно закону Ламберта–Бугера и по методике Соколова В.Ф. Обоснование критической напряженности электрического поля, обеспечивающей уничтожение микроорганизмов в сырье, проводили по методике Ю.В. Корчагина. Разработку биконического резонатора, повышающего радиационную добротность при нагреве шкуры в непрерывном режиме проводили по методике О.О. Дробынина. Обоснованы режимы работы СВЧ установки для обеззараживания и отделения пуха от шкур кроликов в непрерывном режиме при критической напряженности электрического поля и высокой собственной добротности биконического резонатора, обеспечивающего радиогерметичность. Приведены результаты вычисления распределения напряженности электромагнитного поля, плотности тока и добротности биконического резонатора, полученные по программе CST Microwave Studio в режиме переходного процесса. Развитие микроорганизмов прекращается только при обеспечении напряженности электрического поля в резонаторе выше 1,2 кВ/см. Усеченный биконический резонатор, объемом 350 л с собственной добротностью 7000, при мощности магнетронов 3200 Вт обеспечит напряженность электрического поля 1,2–1,5 кВ/см и снижение общего микробного числа в два раза при непрерывном режиме работы СВЧ установки. Разработанная СВЧ установка содержит горизонтально расположенный, симметричный усеченный биконический резонатор, внутри которого соосно установлена рабочая ветвь транспортера, выполненного из фторопластовой сеточной ленты. В области вершин конусов имеются щели, ширина которых больше ширины ленты, а высота щелей меньше, чем четверть длины волны. Магнетроны расположены в области оснований конусов, а на образующей одного конуса имеется пневмопровод, а другого – распылитель рассола.

Ключевые слова: СВЧ установка, биконический резонатор, критическая напряженность электрического поля, добротность, бактерицидный эффект, шкуры кроликов, рассол

Justification of parameters of microwave installation for decontamination and separation of fluff from the skins of rabbits

Evgenii A. Shamin	¹	evg.shamin4@gmail.com
Galina V. Novikova	¹	NovikovaGalinaV@yandex.ru
Olga V. Mikhailova	¹	ds17823@yandex.ru
Mariana V. Belova	¹	maryana_belova_803@mail.ru

¹ Nizhny Novgorod state engineering-economic University, Oktyabrskaya, 22, Knyaginino, 606340, Russia

Summary. The purpose of this work is to substantiate the parameters and modes of operation of the ultra-high-frequency plant for separating the down from the skins of rabbits in continuous mode. In connection with the goal, the following tasks are solved: to determine the required power of electromagnetic radiation to reduce the bacterial contamination of the raw material; to determine the critical intensity of the ultrahigh frequency electric field that ensures the destruction of microorganisms in the raw material; to agree on the magnitude of the electric field strength with its own quality, the volume of the resonator and the performance of the installation; to justify the configuration of the resonator, providing the critical electric field, high quality, radiopharmacist in the continuous mode of operation; to develop microwave installation, microwave technology implements the separation of disinfected feathers from skins of rabbits. In the work of the applied theory of the electromagnetic field of ultrahigh frequency (EFUF). The bactericidal effect of EFUF exposure was investigated according to the Lambert-booger law and the Sokolov V. F. method. The rationale for the critical electric field strength that ensures the destruction of microorganisms in raw materials, carried out by the method of Korchagin and the Development of a biconical resonator, enhancing radiation q-factor at heating the skins in continuous mode was carried out according to the method Drobinin O. Justified modes of operation of the microwave installation for decontamination and separation of fluff from the skins of rabbits in continuous mode at the critical electric field and high q-factor biconical resonator, providing radiopharmacist. The results of calculating the distribution of the electromagnetic field intensity, current density and q-factor of the biconical resonator obtained by the program CST Microwave Studio in the transient mode are presented. The development of microorganisms stops only when the electric field strength in the resonator is above 1.2 kV/cm. Truncated biconical resonator, with a volume of 350 l with its own q-factor of 7000, with the power of the magnetrons 3200 watts will provide the electric field strength of 1.2 m to 1.5 kV/cm and reduced the total microbial number in half for continuous operation of the microwave installation. The developed microwave

Для цитирования

Шамин Е.А., Новикова Г.В., Михайлова О.В., Белова М.В. Обоснование параметров СВЧ установки для обеззараживания и отделения пуха от шкур кроликов // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 1. С. 70–80. doi:10.20914/2310-1202-2018-1-70-80

For citation

Shamin E.A., Novikova G.V., Mikhailova O.V., Belova M.V. Justification of parameters of microwave installation for decontamination and separation of fluff from the skins of rabbits. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 1. pp. 70–80. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-1-70-80

plant contains a horizontally located, symmetrical truncated biconical resonator, inside which the working branch of the conveyor made of fluoropolymer mesh belt is coaxially installed. In the region of the cone vertices there are cracks whose width is greater than the width of the ribbon, and the height of the cracks is less than a quarter of the wavelength. Magnetrons are located in the base area of the cones, and the generator of one cone has a pneumatic line, and the other – a brine spray.

Keywords: microwave installation, biconical resonator, the critical electric field strength, q-factor, a bactericidal effect, the skins of rabbits, brine

Введение

Целевая программа «Развитие и увеличение производства продукции кролиководства в РФ на 2014–2020 годы» предусматривает объем финансирования по годам из средств федерального бюджета до 9 млрд. руб. (30%). В основном мясо кролика поставляют на рынок фермерские хозяйства, на их долю приходится 13–15 тыс. тонн в год. Промышленным способом в России производится не более 2,5–3 тыс. тонн в год [14, 16]. Сегодня у производителей возникают проблемы с реализацией кроличьего меха, так как достаточно высокие эксплуатационные затраты на выделку шкур, а прибыль от реализации пуха от одного кролика в год может составить 4–5 тыс. руб. В связи с этим разработка научно-обоснованной технологии и технических средств, обеспечивающих отделение волосяного покрова от шкуры кроликов в непрерывном режиме с сохранением качества пуха для фермерских хозяйств, актуальна.

Целью работы является обоснование параметров и режимов работы сверхвысокочастотной установки для отделения пуха со шкур кроликов в непрерывном режиме.

Задачи исследования:

1. Определить необходимую мощность электромагнитных излучений для снижения бактериальной обсемененности сырья.
2. Определить критическую напряженность электрического поля сверхвысокой частоты, обеспечивающую уничтожения микроорганизмов в сырье.
3. Согласовать величину напряженности электрического поля с собственной добротностью, объемом резонатора и производительностью установки.
4. Обосновать конфигурацию резонатора, обеспечивающую критическую напряженность электрического поля, высокую собственную добротность, радиогерметичность при непрерывном режиме работы установки.

5. Разработать СВЧ установку, реализующую микроволновую технологию отделения обеззараженного пуха со шкур кроликов.

Материалы и методы исследований

Основоположниками данного научного направления являются академики: И.Ф. Бородин, Д.С. Стребков, Л.Г. Прищеп и др. Продолжаются

исследования по разработке и совершенствованию сверхвысокочастотной технологии и технических средств, для применения в сельском хозяйстве профессорами А.Н. Васильевым, С.В. Вендиным, Н.В. Цугленок и др. В работе применена теория электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ). Бактерицидный эффект воздействия ЭМП СВЧ исследовали согласно закону Ламберта–Бугера и по методике В.Ф. Соколова. Обоснование критической напряженности электрического поля, обеспечивающей уничтожение микроорганизмов в сырье, проводили по методике Ю.В. Корчагина. Разработку биконического резонатора, повышающего радиационную добротность при нагреве шкуры в непрерывном режиме проводили по методике О.О. Дробынина.

Результаты исследования и обсуждения

Элементы теории по обеззараживанию сырья. Принцип обеззараживания сырья основан на его прозрачности для сантиметровых волн, и на способности уничтожить микроорганизмы в сырье. Действие электромагнитных излучений (ЭМИ) на бактерии носит биохимический характер, а бактерицидный эффект воздействия связан с изменениями, происходящими в самих микроорганизмах. Известно, что под воздействием ЭМП СВЧ вегетативные виды бактерий уничтожаются. Согласно закону Ламберта–Бугера, при прохождении потока волн через сырье происходит его изменение, по эмпирически установленной зависимости [12]:

$$B = B_0 \cdot e^{-P \cdot t / k}, \quad (1)$$

где B_0 , $B_{\text{доп}}$ – общее микробное число в сырье до и после воздействия ЭМП СВЧ, КОЕ/мл; P – интенсивность потока мощности излучений, Вт/см²; t – продолжительность воздействия ЭМП СВЧ; c ; k – коэффициент сопротивления бактерий (палочек коли), находящихся в сырье, мкВт×с/см².

Бактерицидный эффект, характеризуемый отношением B/B_0 зависит от количества затрачиваемой энергии $P \cdot t$, т. е. от дозы воздействия ЭМП СВЧ. При этом следует учитывать значение коэффициента поглощения, которое зависит от длины волны и диэлектрических свойств сырья. Коэффициент поглощения электромагнитных излучений кожей составляет [3, 17]:

$$\alpha = \frac{\pi \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot tg\delta}{\lambda} = \frac{3,14 \cdot \sqrt{28...33} \cdot 0,428}{12,24} = (0,58...0,63) \frac{1}{\text{см}}, \quad (2)$$

где λ – длина волны, равная 12,24 см; ε – диэлектрическая проницаемость кожи (28–33, при температуре 0–60 °С); $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь сырья (0,428). В связи с тем, что микроорганизмы на 80% состоят из воды, коэффициент поглощения которой составляет $a = (0,1-0,2) \text{ см}^{-1}$.

Равномерный нагрев сырья происходит, если его толщина не превышает удвоенного значения глубины (γ) проникновения ЭМП СВЧ, т. е. 3,34 см:

$$\gamma = \frac{9,55 \cdot 10^9}{tg\delta \sqrt{\varepsilon}} = \frac{9,55 \cdot 10^9}{0,428 \cdot 2450 \cdot 10^6 \sqrt{28...33}} = 1,72 \text{ см}. \quad (3)$$

Определяем необходимую мощность электромагнитных излучений для снижения бактериальной обсемененности сырья с 1 млн. КОЕ/г до ПДУ (500 тыс. КОЕ/г), содержащего бактерии коли ($k = 2400 - 2500 \text{ мкВт} \times \text{с}/\text{см}^2$) при производительности установки $Q = 10 \text{ кг/ч}$ ($9,25 \text{ см}^3/\text{с}$, 30–35 шкур/ч) и КПД = 0,75, по формуле В.Ф. Соколова [12]:

$$P = - \frac{Q \alpha k \ln \left(\frac{E_{\text{дон}}}{B_0} \right)}{\eta} = - \frac{9,25 \cdot 0,15 \cdot 2400 \ln \left(\frac{500 \cdot 10^3}{1000 \cdot 10^3} \right)}{0,75} = 3077 \text{ Вт}. \quad (4)$$

Необходимое количество СВЧ генераторов, мощностью 800 Вт для снижения степени обсемененности сырья в два раза, составит: $N = 3077/800 = 4$ шт. Т.е. для снижения общего микробного числа в два раза потребуется мощность СВЧ генератора в пределах 3,1 кВт.

Далее, проанализируем при какой напряженности электрического поля в резонаторе, прекращается размножение микроорганизмов.

Теоретическое обоснование напряженности электрического поля, обеспечивающей обеззараживание шкуры, проводили по методике Ю.В. Корчагина [9]. Известно, что энергия ЭМП СВЧ очень сильно поглощается водой, являющейся одним из основных компонентов любого микроорганизма (бактерии на 80% состоят из воды, содержание воды в спорах бактерий составляет 5–15%). При этом нагрев осуществляется за счет тепловой энергии, выделяющейся в объеме самого микроорганизма,

обладающего высоким тепловым сопротивлением, и поэтому оказываются беззащитными перед внутренним тепловыделением. Защитные оболочки микроорганизмов препятствуют отводу тепла из внутреннего объема, тем не менее для их уничтожения требуется достаточно высокая напряженность электрического поля. Это можно обеспечить при использовании либо мощных генераторов (более 4–5 кВт), либо нескольких генераторов малой мощности с воздушным охлаждением, излучатели которых направлены в один резонатор нетрадиционной конфигурации. Можно также уменьшить объем резонатора до 0,5 л, но это снижает практическое применение в фермерских хозяйствах. В объемных резонаторах (17–28 л), традиционных микроволновых печей, возбуждается электрическое поле напряженностью не более 0,2 кВ/см, что намного ниже критической напряженности для микроорганизмов. Поэтому разрабатываем микроволновую технологию обеззараживания сырья с использованием маломощных генераторов (700–800 Вт) и объемных резонаторов нетрадиционной конфигурации, обеспечивающих критическую напряженность электрического поля, например, квазистационарные, тороидальные, биконические резонаторы и др. [2, 8]. При разработке СВЧ установок используем маломощные магнетроны, рабочая частота которых отличается не более, чем на 20% от собственной резонансной частоты объемного резонатора.

Проведем оценку напряженности электрического поля СВЧ диапазона, достаточной для снижения развития микроорганизмов, путем непосредственного диэлектрического нагрева содержащейся в них воды [3, 9, 10]. Определяем мощность нагрева микроорганизма при воздействии ЭМП СВЧ. Оценим поглощающую способность *кожи и воды* при разных напряженностях электрического поля:

$$P = (E^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \omega \cdot tg\delta), \text{ Вт/см}^3, \quad (5)$$

где E – напряженность электрического поля в сырье, В/см; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума ($8,85 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}$); ε – относительная диэлектрическая проницаемость кожи равна 28 (при температуре 20 °С, влажности 46–47%, частоте 2450 МГц); $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь кожи – 0,428, k – фактор потерь – 12; $\omega = 2 \pi f$, 1/с; f – частота ЭМП, Гц (2450 МГц) [11].

Кожа:

$$P = (500^2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 28 \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,428) = 399,6 \text{ Вт/см}^3.$$

$$P = (1000^2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 28 \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,428) = 16315 \text{ Вт/см}^3.$$

Диэлектрические параметры **воды** при частоте 2450 МГц и при изменении температуре от 15 до 45 °С составляют:

$$\varepsilon = 78,8-70,7, \text{ (среднее } 74,75);$$

$$\operatorname{tg} \delta = 0,2-0,11 \text{ (среднее } 0,153);$$

$$k = 16,15-7,49 \text{ (среднее } 11,82) [3, 11].$$

Вода:

$$P = (500^2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 74,75 \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,153) = 381,37 \text{ Вт/см}^3.$$

$$P = (1000^2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 74,75 \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,153) = 15574 \text{ Вт/см}^3.$$

Результаты расчета сведены в таблицу 1, а на рисунке 1 приведены графики, характеризующие зависимость генерируемой мощности в коже и в воде от напряженности электрического поля при частоте 2450 МГц.

Известно, что размеры микроорганизма равны $(2-3) \times (0,3-0,8)$ мкм, т. е. средний радиус равен $(0,5-0,7) \times 10^{-6}$ м. [9]. Зная, что потери мощности пропорциональны *площади* поверхности микроорганизма, а поглощаемая мощность диэлектрических потерь пропорциональна его *объему*, поэтому предварительно вычислим объем и площадь поверхности микроорганизма.



Рисунок 1. Зависимость генерируемой удельной мощности в коже и в воде от напряженности электрического поля при частоте 2450 МГц

Figure 1. Dependence of the generated specific power in the skin and water on the electric field strength at a frequency of 2450 MHz

Если радиус микроорганизма принять равным $0,5 \cdot 10^{-6}$ м, тогда объем и площадь составляют:

$$\begin{aligned} V &= 4 \cdot \pi \cdot r^3 / 3 = \\ &= [4 \cdot \pi \cdot (0,5 \cdot 10^{-6})^3] / 3 = 0,523 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3; \quad (6) \\ S &= 4 \cdot \pi \cdot r^2 = 4 \cdot 3,14 \cdot (0,5 \cdot 10^{-6})^2 = 3,14 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Проведем сравнительный анализ значений потерь мощности за счет теплопередачи и мощности диэлектрических потерь микроорганизмов, при воздействии ЭМП СВЧ. *Определяем мощность тепловых потерь с поверхности микроорганизма.* Она зависит от свойств окружающей среды, от теплопроводности материала, разности температур тела и окружающей среды, площади поверхности микроорганизма.

$$\begin{aligned} q_{\text{тепл}} &= \lambda \cdot S \cdot \operatorname{grad} T = \\ &= 0,023 \cdot 3,14 \cdot 10^{-12} \cdot 0,07 / 0,5 \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}, \quad (7) \end{aligned}$$

где λ – коэффициент теплопроводности волосяного покрова, Вт/м·К (воздуха 0,023 Вт/м·К; S – площадь поверхности микроорганизма, м²; $\operatorname{grad} T$ – градиент температуры (разница температур между микроорганизмом и окружающей средой, отнесенный к радиусу микроорганизма, $0,07/r$), К.

Потери на тепловое излучение при температуре поверхности микроорганизма:

$$\begin{aligned} q_{\text{изл}} &= \sigma S T^4 = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 10^{-12} \cdot 323^4 = 1,04 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}, \end{aligned}$$

где σ – излучательная способность абсолютно черного тела ($5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·°K⁴); T – абсолютная температура поверхности кожи, $50 + 273 = 323$ К.

Расчеты показывают, что потерями на тепловое излучение можно пренебречь. Результаты расчета мощности диэлектрических потерь при разных напряженностях электрического поля и радиусе микроорганизма $0,5 \cdot 10^{-6}$ м, сведены в таблице 1. Сравнительные графики, описывающие зависимость мощности диэлектрических потерь и мощности тепловых потерь от напряженности

электрического поля при радиусе микроорганизмов $0,5$ мкм, приведены на рис. 2.

Зависимость мощности диэлектрических потерь от напряженности электрического поля при радиусе микроорганизма $0,5$ мкм можно выразить эмпирической формулой $P = 0,327 \cdot E^{2,86}$, где P – мощности диэлектрических потерь, 10^{-8} Вт; E – напряженность электрического поля, кВ/см.

Таблица 1.

Мощность диэлектрических потерь при разных напряженностях электрического поля и радиусе микроорганизма $0,5 \cdot 10^{-6}$ м (объем $0,523 \cdot 10^{-12}$ см³, влажность 80%)

Table 1.

Capacity of dielectric loss at different intensities of the electric field and the radius of the microorganism is $0,5 \cdot 10^{-6}$ meters (volume $0,523$ accordingly $\times 10^{-12}$ cm³, humidity 80%)

E, В/см E, V/cm	P, Вт/см ³ (кожа) P, W/cm ³ (skin)	P, Вт/см ³ (вода) P, W/cm ³ (water)	Мощность диэлектрических потерь в воде, Вт Power of dielectric losses in water, W
500	400	381	$0,02 \cdot 10^{-8}$
1000	16315	15574	$0,88 \cdot 10^{-8}$
2000	65274	62285	$3,26 \cdot 10^{-8}$
3000	146864	140157	$7,33 \cdot 10^{-8}$
5000	146864	389322	$20,36 \cdot 10^{-8}$
Мощность тепловых потерь Power of heat losses $q_{\text{тепл.}} = 0,45 \cdot 3,14 \cdot 10^{-12} \cdot 0,0722 = 1 \cdot 10^{-8}$ Вт W			

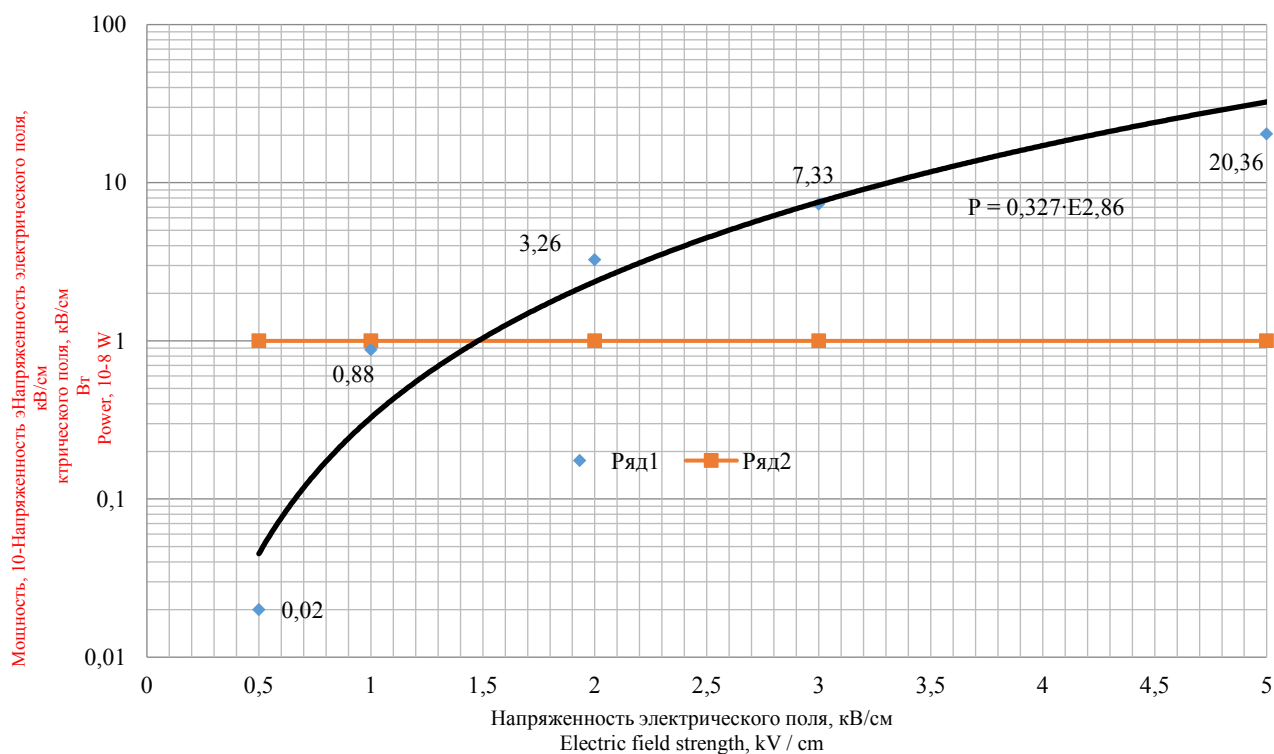


Рисунок 2. Графики, описывающие зависимость мощности диэлектрических потерь (ряд 1) и мощности тепловых потерь (ряд 2) от напряженности электрического поля при радиусе микроорганизма $0,5$ мкм

Figure 2. Graphs describing the dependence of the power of dielectric loss (number 1) and power heat losses (number 2) from the electric field if the radius of the microorganism is $0,5$ microns

Из анализа графиков вытекает, что критическая напряженность электрического поля составляет 1,5 кВ/см. Тогда при напряженности электрического поля, выше 1,2 кВ/см, следует ожидать прекращение размножения микроорганизмов в шкуре кролика. Напряженность 1,5 кВ/см на много меньше пробивной напряженности электрического поля в диапазоне СВЧ излучений, равной 30 кВ/см [1]. Итак, значение критической напряженности электрического поля, выше которой происходит уничтожение микроорганизмов в сырье можно определить по формуле: [9] :

$$E_{кр} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot s \cdot grad T}{\varepsilon_0 \cdot tg \delta \cdot \varepsilon \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_{микроор.}}}, \text{ В/м.} \quad (9)$$

Далее проводим согласование объема резонатора с критической напряженностью электрического поля, собственной добротностью и с мощностью СВЧ генератора. В цилиндрических резонаторах, возбуждаемых на моде колебаний ТМ₀₁₀, напряженность электрического поля определяется по формулам [1, 10]:

$$E_{в сырье} = \sqrt{\frac{Q \cdot P}{0,27 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot 2 \pi \cdot f \cdot V_{сырья}}}, \frac{\text{В}}{\text{м}}; \quad (10)$$

$$E_{в резон.} = \sqrt{\frac{Q \cdot P}{0,27 \cdot \varepsilon_0 \cdot 2 \pi \cdot f \cdot V_{резон.}}}, \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

где $V_{рез.}$ – объем резонатора, м³; $V_{сырья.}$ – объем сырья, м³; f – частота электромагнитного поля, Гц; Q – собственная добротность резонатора; P – мощность генератора, Вт.

Если принять собственную добротность резонатора, равной 7000, то можно определить какой может быть объем резонатора и объем сырья, чтобы обеспечить напряженность электрического поля, равной (1,2–1,5) кВ/см, при мощности генератора 3200 Вт (четыре генератора, мощностью по 800 Вт).

$$V_{резон.} = \frac{7000 \cdot 3200}{0,27 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 2450 \cdot 10^6 [(1,2 \dots 1,5) \cdot 10^5]^2} = (271 \dots 423) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \approx 350 \text{ л.}$$

Если собственную добротность резонатора увеличить до 9000 за счет использования лучшей отражающей поверхности и особой конфигурации, и направить три излучателя в резонатор, то необходимую напряженность электрического поля можно обеспечить также в объеме 350 л.

$$V_{резон.} = \frac{Q \cdot P}{0,27 \cdot \varepsilon_0 \cdot 2 \pi \cdot f \cdot E^2} = \frac{9000 \cdot 2400}{0,27 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 [(1,2 \dots 1,5) \cdot 10^5]^2} = (266,5 \dots 416,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \approx 350 \text{ л.}$$

$$V_{сырья} = \frac{Q \cdot P}{0,27 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot 2 \pi \cdot f \cdot E^2} = \frac{9000 \cdot 2400}{0,27 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 28 \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 [(1,2 \dots 1,5) \cdot 10^5]^2} = (9,5 \dots 14,8) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Если мощность излучателя всего 2400 Вт, тогда существенно снизить бактериальную обсемененность не удастся по теории В.Ф. Соколова (см. формулу 4). Именно поэтому, полученные теоретические результаты можно реализовать в биконическом резонаторе с собственной добротностью 7000 и объемом (350 л), обеспечивая напряженность электрического поля до 1,2–1,5 кВ/см при мощности четырех СВЧ генераторов 3200 Вт.

Известно, что открытый биконический резонатор обеспечивает непрерывный режим работы, повышая радиационную добротность [5, 6]. Характерной особенностью такого резонатора является наличие в резонансном объеме областей с резко выраженным экспоненциальным законом изменения электромагнитного поля. Это позволяет удалить часть поверхности без существенных потерь добротности для некоторых типов колебаний и тем самым реализовать открытую резонансную систему. К тому же биконические резонаторы по сравнению с цилиндрическим резонатором исключают вырождение паразитных типов колебаний, что позволяет достичь высоких значений добротности. Соответствующим выбором угла при вершине конуса можно сформировать электромагнитное поле, сконцентрированное в основном в центральной области резонатора. В средней части таких резонаторов существуют волны, постоянное распространение которых уменьшается в случае удаления от центра резонатора. Вблизи тех сечений, для которых выполняются критические условия, образуются поверхности, где наблюдается практически полное отражение волн. Поскольку эти поверхности находятся внутри резонатора, излучение из открытых концов значительно уменьшается. Излучатели СВЧ энергии следует располагать в области максимального диаметра резонатора, т. е. оснований конусов [5, 6]. Разработанная СВЧ установка содержит горизонтально расположенный, симметричный биконический резонатор (рисунок 3).

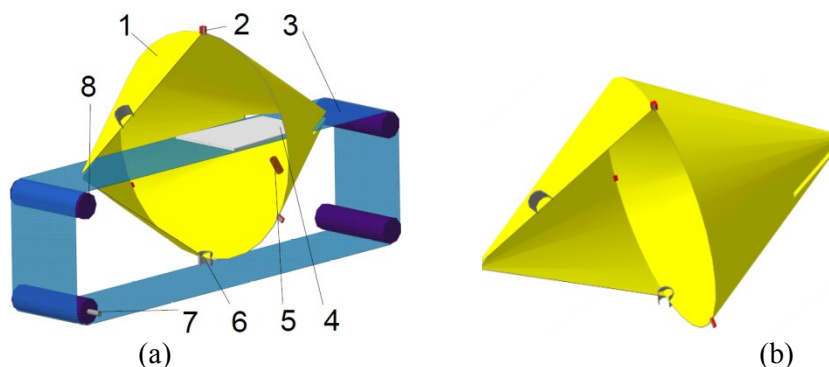


Рисунок 3. Установка с биконическим резонатором для отделения волосяного покрова от шкур кроликов в непрерывном режиме при распылении рассола: а) общий вид; б) биконический резонатор; 1 – симметричный биконический резонатор; 2 – магнетроны; 3 – транспортер из диэлектрического материала в виде сеточной ленты; 4 – шкура кролика; 5 – распылитель рассола; 6 – патрубок для слива рассола; 7 – вал электродвигателя; 8 – опорные ролики

Figure 3. Installation with biconical resonator to separate the hair from the skins of rabbits in continuous mode when spraying brine: a) General view; b) biconical resonator; 1-symmetrical biconical resonator; 2-magnetrons; 3-conveyor of dielectric material in the form of mesh tape; 4-shku-RA rabbit; 5 – spray brine; 6 – pipe for brine drain; 7-shaft electric motor La; 8-support rollers

Внутри него соосно установлена рабочая ветвь транспортера 3, выполненного из фторопластовой сеточной ленты. Холостая ветвь транспортера проложена за пределом биконического резонатора 1, имеющего в области вершин щели, ширина которых больше ширины ленты, а высота щелей меньше, чем четверть длины волны. Магнетроны 2 СВЧ генераторов расположены в области оснований конусов со сдвигом по периметру, а на образующей одного конуса над рабочей ветвью транспортера имеется пневмопровод 9.

На образующей другого конуса биконического резонатора под рабочей ветвью транспортера установлен распылитель рассола 5. Патрубок для слива рассола 6 расположен в области максимального диаметра оснований биконического резонатора, под верхней ветвью транспортной ленты. Внутри биконического резонатора перемещается с помощью транспортера шкура, мездровая сторона которой вымочена рассолом определенной концентрации. При включении СВЧ генераторов возбуждается в симметричном биконическом резонаторе ЭМП СВЧ. Распаренная шкура в ЭМП СВЧ создает такие условия, что происходит смягчение кожи, расширение пор, быстрое разрушение волосяных луковиц и высвобождение волос [14, 15]. Пневмонасос обеспечивает транспортировку отделенного пуха в циклон. В процессе распыления рассола через сеточную ленту, остатки рассола стекают через сливной патрубок 6 в специальную емкость.

Проанализируем резонансные свойства микроволновых резонаторов с коническими элементами. Конструкция резонаторов должна обеспечить: единственный рабочий тип колебаний

в выбранном частотном диапазоне; минимальное уменьшение добротности резонатора при возрастании коэффициента заполнения резонатора; постоянство коэффициента передачи резонатора [5, 6].

Известно, что наиболее распространенными объемными резонаторами являются круглые цилиндрические резонаторы с рабочим типом колебаний H_{01} [4, 7, 13]. Путем подбора соотношения геометрических размеров элементов резонатора можно обеспечить выполнение основных требований, предъявляемых к резонаторам. Однако даже при эффективных параметрах цилиндрического резонатора, вырождение типов колебаний H_{01} и E_{111} происходит. Для подавления паразитного типа колебаний E_{111} используют различные технические решения, усложняющие конструкции резонатора. В работах О.О. Дробахина показано, что в объемных резонаторах, содержащих участки с конической образующей, вырождение этих типов колебаний можно устранить [5, 6]. Поэтому проводим анализ резонансных свойств биконического резонатора, состоящего из двух конических элементов с общим основанием. Обозначим диаметр основания D , углы конусов при вершине Θ , общую длину L , диаметры критических сечений d .

Теоретические расчеты. Принятую величину собственной добротности 7000, необходимо рассчитать через конструкционные параметры усеченного биконического резонатора, т. е. через его геометрический объем и площадь поверхности. Схема усеченного биконического резонатора для отделения волосяного покрова от шкур кроликов с указанием размеров, обеспечивающих реализацию рассчитанных технологических параметров, приведена на рисунке 4.

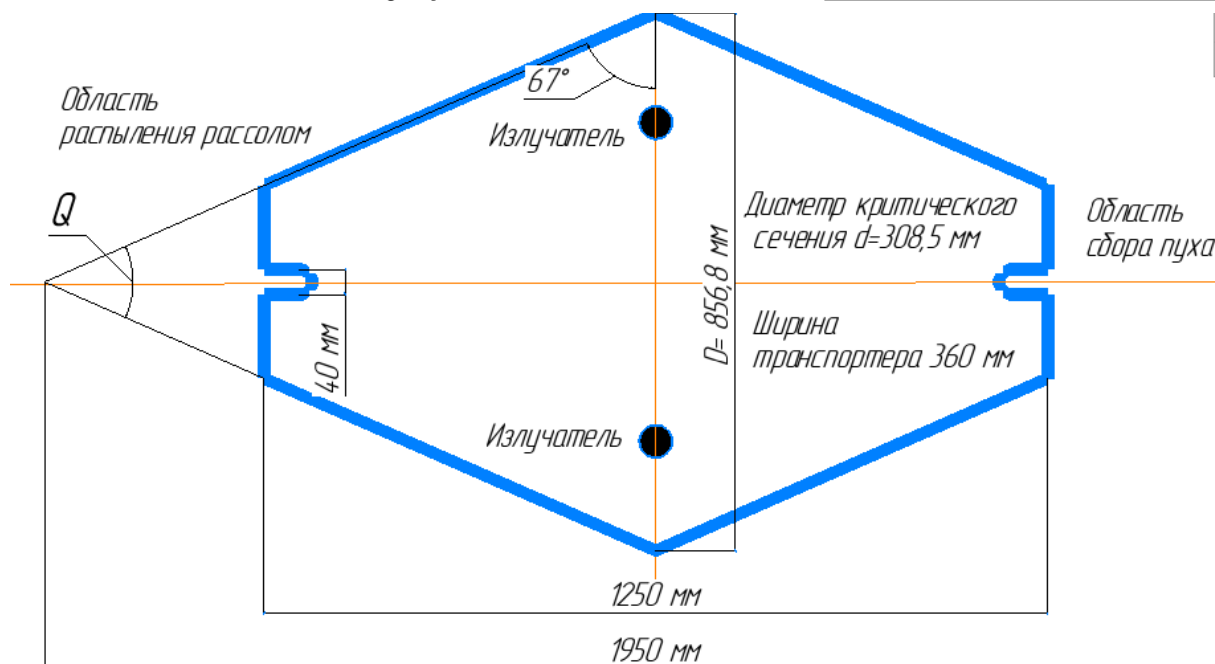


Рисунок 4. Схема биконического резонатора для отделения волосяного покрова от шкур кроликов

Figure 4. The scheme of the biconical resonator for separating the hair from the skins of rabbits

По предварительным расчетам, принимаем диаметр основания биконического резонатора семикратным длине волны, т. е. 85,68 см; высоту конуса 100 см, а длину центральной оси – 200 см. Если принять ширину сеточного транспортера 36 см, и учесть высоту щели для прохождения транспортера с шкурой, равной 10 см, то длина биконического резонатора составит 125 см. Причем диаметр критического сечения равен $0,72 \times 85,68 = 30,85$ см. Тогда будет образован усеченный конус, где на малом основании имеется вырез, размером 10x36 см. Следовательно, для прохождения сеточного транспортера, шириной 36 см, необходимо образующую усеченного конуса вырезать на глубину 5,15 см ($36 - 30,85 = 5,15$ см). Угол наклона образующей усеченного конуса 67 градусов.

Известно, что запас энергии в резонаторе пропорционален его объему, а энергия потерь пропорциональна объему, в котором они происходят (произведение площади поверхности резонатора на толщину поверхностного слоя). Следовательно, для любого вида колебания в объемном резонаторе, его добротность можно приблизительно вычислить. Это удвоенное отношение объема, в котором запасается энергия электромагнитного поля, к объему, в котором она расходуется, т. е. к объему, занимаемому поверхностным слоем во всех стенках резонатора [10]:

$$Q = 2 \cdot \frac{V}{S \cdot \Delta} \cdot K, \quad (13)$$

где V – объем биконического резонатора, м^3 ; S – площадь внутренней поверхности, ограничивающей объем резонатора, м^2 ; K – геометрический множитель, учитывающий снижение добротности резонатора, из-за щели; Δ – толщина поверхностного слоя, м.

Толщина поверхностного слоя при изготовлении биконического резонатора из алюминия определяется по формуле [10]:

$$\Delta = \frac{66 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{меди}}}{\sigma}}}{\sqrt{f}} = \frac{66 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{57,14}{35,72}}}{\sqrt{2450 \cdot 10^6}} = 1,68 \cdot 10^{-5} \text{ м}. \quad (14)$$

где σ – удельная проводимость алюминия ($35,72 \text{ м/Ом} \cdot \text{мм}^2$); $\sigma_{\text{меди}}$ – удельная проводимость меди ($57,14 \text{ м/Ом} \cdot \text{мм}^2$); f – частота электромагнитного поля, Гц.

Вычислим объем, площадь поверхности и собственную добротность биконического резонатора:

$$V = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h = \frac{2}{3} \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{85}{2}\right)^2 \cdot \frac{195}{2} = 368655,6 \text{ см}^3 = 368,6 \text{ л}. \quad (15)$$

Образующая конуса:

$$l = \sqrt{\left(\frac{195}{2}\right)^2 + \left(\frac{85}{2}\right)^2} = 106,36 \text{ см.}$$

Боковая площадь поверхности биконического резонатора:

$$S = 2\pi r l = 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{85}{2} \cdot 106,36 = 28387,5 \text{ см}^2. \quad (16)$$

Собственная добротность биконического резонатора:

$$Q = 2 \cdot \frac{V}{S \cdot \Delta} \cdot K = 2 \cdot \frac{0,3686}{2,84 \cdot 1,68 \cdot 10^{-5}} \cdot 0,7 = 10816.$$

Вычислим объем и площадь поверхности усеченного биконического резонатора (выполненного в виде двух усеченных конусов):

$$V_{\text{усеч. бикон.}} = \frac{2}{3} \pi h (R^2 + r^2 + Rr), \quad (18)$$

$$S_{\text{усеч. бикон.}} = 2\pi (R + r)l + \pi R^2 + \pi r^2,$$

где V – объем, S – площадь поверхности, h – высота конуса, l – длина образующей, R – радиус большого основания, r – радиус малого основания.

Объем усеченного биконического резонатора:

$$V_{\text{усеч. бикон.}} = \frac{2}{3} \pi h (R^2 + r^2 + Rr) = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 125}{3} \cdot \left(\left(\frac{85,68}{2}\right)^2 + \left(\frac{30,85}{2}\right)^2 + \left(\frac{85,68}{2}\right) \cdot \left(\frac{30,85}{2}\right) \right) =$$

$$= 357690 \text{ см}^3 \approx 360 \text{ л.}$$

Образующая отсекаемого конуса

$$l_1 = \frac{30,85}{2 \cdot \cos 67} = 39,45 \text{ см.}$$

Площадь поверхности усеченного биконического резонатора:

$$S_{\text{усеч. бикон.}} = 2\pi (R + r)l + \pi R^2 + \pi r^2 =$$

$$= 6,28 \left(\frac{85,68}{2} + \frac{30,85}{2} \right) \cdot (106,36 - 39,45) +$$

$$+ 3,14 \left(\frac{85,68}{2} \right)^2 + 3,14 \left(\frac{30,85}{2} \right)^2 = 30992 \text{ см}^2. \quad (20)$$

Ожидаемая собственная добротность усеченного биконического резонатора:

$$Q = 2 \cdot \frac{V}{S \Delta} K = 2 \cdot \frac{0,3577}{3,1 \cdot 1,68 \cdot 10^{-5}} \cdot 0,7 = 9647. \quad (21)$$

Исследования показывают, что уменьшение высоты резонатора не влияет на его резонансную частоту, но сильно уменьшает его собственную добротность. Собственная добротность усеченного биконического резонатора (9647) всего на 10% меньше, чем добротность биконического резонатора (10816), т. е. существенное изменение добротности не происходит. Реальное значение собственной добротности усеченного биконического резонатора будет ниже расчетного на 10–20% из-за шероховатости поверхности резонатора и щели, т. е. в пределах 7000–8000.

Итак, усеченный биконический резонатор, объемом 350 л с собственной добротностью 7000, при мощности магнетронов 3200 Вт обеспечит напряженность электрического поля 1,2–1,5 кВ/см и снижение общего микробного числа в два раза. Основные технические характеристики разрабатываемой установки, следующие: потребляемая мощность СВЧ генераторов 4,8 кВт; ожидаемая производительность установки 35–45 шт./ч; удельные энергетические затраты 0,25–0,39 кВт·ч/кг.

Если диаметр открытого торца d биконического резонатора равен половине диаметра основания D , то радиогерметичность сильно нарушается и его применять нельзя. Известно, что за пределами критических сечений выбранный тип волны не распространяется [5]. Если приравнять постоянной распространения волны к нулю, то можно вычислить координаты критических сечений, для выбранного типа колебаний при передвижении транспортера вдоль центральной оси.

Пользуясь программой CST Microwave Studio, вычисляем распределение напряженности электромагнитного поля в усеченном биконическом резонаторе с четырьмя источниками и его добротность. Анализ показывает, что собственная добротность усеченного биконического резонатора, равная 7000 достигается при выбранных конструктивных размерах и при этом напряженность электрического поля достигает до 1,5 кВ/см.

Изменение геометрических размеров биконического резонатора и транспортера приводит к смещению резонансных параметров, а изменение продольного положения транспортера существенно не меняет резонансные параметры. Повышение угла конического участка приводит к возрастанию добротности; длину резонатора можно регулировать при постоянных диаметрах оснований конусов. Перемещение транспортера в биконическом резонаторе минимально деформирует структуру электрических полей.

Заключение

1. Размножение микроорганизмов прекращается только при обеспечении напряженности электрического поля в резонаторе выше 1,2 кВ/см.

2. Усеченный биконический резонатор, объемом 350 л, с собственной добротностью 7000, при мощности генераторов 3200 Вт обеспечит напряженность электрического поля 1,2–1,5 кВ/см и снижение общего микробного числа в два раза при непрерывном режиме работы СВЧ установки с энергетическими затратами до 0,39 кВт·ч/кг.

3. Разработанная СВЧ установка, производительностью до 45 шт./ч содержит горизонтально расположенный, симметричный усеченный биконический резонатор, внутри которого соосно установлена рабочая ветвь транспортера, выполненного из фторопластовой сеточной ленты. В области вершин конусов имеются щели, ширина которых больше ширины ленты, а высота щелей меньше, чем четверть длины волны. Магнетроны СВЧ генераторов расположены в области оснований конусов со сдвигом по периметру, а на образующей одного конуса,

над рабочей ветвью транспортера, имеется пневмопровод. На образующей другого конуса под рабочей ветвью транспортера установлен распылитель рассола.

Возможные направления исследований

На основе стратегической программы исследований «СВЧ технологии», утвержденной 17.12.2012 г. Департаментом радиоэлектронной промышленности РФ, активно ведутся работы по созданию СВЧ установок. Тем не менее, анализ новейших разработок ведущих мировых производителей позволяет выявить основные тенденции развития рынка СВЧ установок. Это устройства на основе алмазных структур, обладающих уникальными теплопроводными свойствами и радиогерметичностью.

Поэтому наша научная школа стремится создать широкую гамму объемных резонаторов, обеспечивающих радиогерметичность СВЧ установки при непрерывном технологическом процессе и снизить габаритные размеры, расширить диапазон рабочих частот, повысить стабильность режимных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1 Мак-Доналд А. СВЧ-пробой в газах. М.: Мир, 1969. 167 с.

2 Белова М.В. Разработка сверхвысоко-частотных установок для термообработки сельскохозяйственного сырья. М.: ВИЭСХ, 2016. 40 с.

3 Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М.: Агропромиздат, 1985. 336 с.

4 Григорьев А.Д. Электродинамика и микроволновая техника. СПб.: Лань, 2007. 704 с.

5 Дробахин О.О., Плаксин С.В., Рябчий В.Д., Салтыков Д.Ю. Техника и полупроводниковая электроника СВЧ. Севастополь: Вебер, 2013. 322 с.

6 Дробахин О.О. Резонансные свойства аксиально-симметричных микроволновых резонаторов с коническими элементами // Радиофизика радиоастрономия. 2009. Т. 14. С. 433–441.

7 Коломейцев В.А., Кузьмин Ю.А., Никуйко Д.Н., Захаров А.А. Электродинамические и тепловые свойства микроволновых печей при различных способах и системах возбуждения электромагнитного поля в рабочей камере // Вопросы электротехнологии. 2014. № 2(3). С. 28–34.

8 Новикова Г.В., Жданкин Г.В., Михайлова О.В., Белов А.А. Анализ разработанных сверхвысоко-частотных установок для термообработки сырья // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. № 4 (42). С. 89–93.

9 Патент № 2161505. Способ стерилизации материалов при помощи СВЧ излучения с высокой напряженностью поля и устройство для реализации способа. URL: <http://ru-patent.info/21/60-64/2161505.html>.

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

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

12 Рубцов П.А. Применение электрической энергии в сельском хозяйстве. М.: Колос, 1964. 502 с.

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

14 Шамин Е.А., Новикова Г.В., Зиганшин Б.Г., Белов Е.Л. Технологии переработки мехового сырья кроликов // Вестник Казанский ГАУ. 2017. № 3(45). С. 61–67.

15 Чурсин В.Н., Дормидонтова О.В. Влияние низкотемпературной обработки сырья на структуру дермы // Кожевенно-обувная промышленность, 2004. № 2. С. 40–41.

16 Перспективы кролиководства URL: agbz.ru/articles/perspektivy-krolikovodstva.

17 Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Борщ А.А. Моделирование процессов обезвоживания пищевого сырья в электромагнитном поле // Вестник ВГУИТ. 2013. № 3. С. 62–65.

REFERENCES

1 Mac-Donald A. Microwave breakdown in gases. Moscow: Mir, 1969. 167 p.

2 Belova M.V. Razraborka sverkhvysokochstotnykh ustanovok [Development of ultrahigh-frequency plants for heat treatment of agricultural raw materials] Moscow, VIESKh, 2016. 40 p. (in Russian).

3 Ginzburg, A.S. Raschet i proektirovanie [Calculation and design of drying installations of the food industry] Moscow, Agropromizdat, 1985. 336 p. (in Russian).

4 Grigoriev A.D. Elektrodinamika i mikrovolovnaya [Electrodynamics and microwave technology] Saint-Petersburg, Lan', 2007. 704 p. (in Russian).

5 Drobakhin O.O., Plaksin S.V., Ryabchiy D.V., Saltykov D.Yu. Tekhnika i poluprovodnikovaya [Electronics and semiconductor microwave electronics: a tutorial] Sevastopol, Weber, 2013. 322 p. (in Russian).

6 Drobakhin O.O. Resonant properties of axially symmetrical microwave resonators with conical elements. *Radiofizika radioastrofiziya* [Radiophysics radio astronomy] 2009, no. 14, pp. 433–441. (in Russian).

7 Kolomeyts V.A. Electrodynamics and thermal properties of microwave ovens in different ways and systems of excitation of the electromagnetic field in the working chamber. *Voprosy elektrotekhnologii* [Questions of Electrotechnology] 2014, no. 2(3), pp. 28–34. (in Russian).

8 Novikova G.V., Zhdankin G.V., Mikhailova O.V., Belov A.A. Analysis of developed ultrahigh-frequency plants for heat treatment of raw materials. *Vestnik KazGAU* [Proceedings of Kazan state agrarian University] 2016, no. 4 (42), pp. 89–93. (in Russian).

9 Sposob sterilizatsii pri pomoshchi SVCh izlucheniya [Patent number 2161505. Method of sterilizing materials by means of microwave radiation with a high field strength and device for implementing the method] Available at: <http://ru-patent.info/21/60-64/2161505.html>. (in Russian).

10 Pchel'nikov Yu.N. Elektronika sverkhvysokikh chastot [Electronics of ultrahigh frequencies] Moscow: Radio and communication, 1981. 96 p. (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Евгений А. Шамин к.э.н., доцент, и.о. директора филиала «Институт пищевых технологий и дизайна», Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, ул. Октябрьская, 22, г. Княгинино, 606340, Россия, evg.shamin4@gmail.com

Галина В. Новикова д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, ул. Октябрьская, 22, г. Княгинино, 606340, Россия, NovikovaGalinaV@yandex.ru

Ольга В. Михайлова д.т.н., профессор, кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, ул. Октябрьская, 22, г. Княгинино, 606340, Россия, ds17823@yandex.ru

Марьяна В. Белова д.т.н., научный сотрудник, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, ул. Октябрьская, 22, г. Княгинино, 606340, Россия, maryana_belova_803@mail.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Евгений А. Шамин предложил методику проведения экспериментов и организовал проведения предварительных исследований на базе кролиководческого хозяйства

Галина В. Новикова провела обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провела эксперимент, выполнила расчёты

Ольга В. Михайлова консультация в ходе исследования

Марьяна В. Белова написала рукопись, корректировала её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 22.01.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 19.02.2018

11 Rogov I.A. Elektrofizicheskie, opticheskie i akusticheskie [Electrophysical, optical and acoustic characteristics of food products] Moscow, Light and food industry, 1981. 288 p. (In Russian).

12 Rubtsov P.A. Primenenie elektricheskoi energii [Use of electrical energy in agriculture] Moscow, Kolos, 1964. 502 p. (In Russian).

13 Strekalov A.V., Strekalov Yu. A. Elektromagnitnye polya i volny [Electromagnetic fields and waves: textbook] Moscow, RIOR: INFRA-M, 2014. 375 p. (In Russian).

14 Shamin, E.A. Technologies of processing of fur raw materials of rabbits. *Vestnik KazGAU* [Proceedings of Kazan state agrarian university] 2017, no. 3(45), pp. 61–67. (in Russian).

15 Chursin, V.N. The influence of low-temperature processing of raw materials on the structure of the derma. *Kozhevenno-obuvnaya promyshlennost'* [Leather and footwear industry] 2004, no. 2, pp. 40–41. (in Russian).

16 Perspektivnye krolikovodstva [Prospective of rabbit breeding] Available at: [agbz.ru articles / perspektivy-krolikovodstva](http://agbz.ru/articles/perspektivy-krolikovodstva). (in Russian)

17 Burdo O.G., Terziev S.G., Yarovoy I.I., Borsch A.A. Modeling of food raw material dehydration processes in the electromagnetic field. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies]. 2013. no. 3. pp. 62–65. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Evgenii A. Shamin Cand. Sci. (Econ.), associate professor, acting Director of branch "Institute of food technologies and design", Nizhny Novgorod state engineering-economic University, Oktyabrskaya, 22, Knyaginino, 606340, Russia, evg.shamin4@gmail.com

Galina V. Novikova Dr. Sci. (Engin.), professor, lead researcher, Nizhny Novgorod state engineering-economic University, Oktyabrskaya, 22, Knyaginino, 606340, Russia, NovikovaGalinaV@yandex.ru

Olga V. Mikhailova Dr. Sci. (Engin.), professor, infocommunication technologies and communication systems department, Nizhny Novgorod state engineering-economic University, Oktyabrskaya, 22, Knyaginino, 606340, Russia, ds17823@yandex.ru

Mariana V. Belova Dr. Sci. (Engin.), researcher, Nizhny Novgorod state engineering-economic University, Oktyabrskaya, 22, Knyaginino, 606340, Russia, maryana_belova_803@mail.ru

CONTRIBUTION

Evgenii A. Shamin proposed a method for carrying out experiments and organized the preliminary research based on rabbit farms

Galina V. Novikova review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Olga V. Mikhailova consultation during the study

Mariana V. Belova wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 1.22.2018

ACCEPTED 2.19.2018