

УДК 621.385.6, 637.1.03

**А.В. Шевелев, О.В. Михайлова,
Г.В. Новикова, М.В. Просвирякова**
A.V. Shevelev, O.V. Mikhaylova,
G.V. Novikova, M.V. Prosviryakova

ОБОСНОВАНИЕ СОБСТВЕННОЙ ДОБРОТНОСТИ РЕЗОНАТОРОВ СВЧ-УСТАНОВОК ДЛЯ ВЫТОПКИ ПАСЕЧНОГО ВОСКА

THE SUBSTANTIATION OF THE INTRINSIC Q-FACTOR OF THE RESONATORS OF UHF INSTALLATIONS FOR BEE WAX MELTING

Ключевые слова: воск, вытопка, мед, потери мощности, сферический резонатор, собственная добротность, электромагнитное поле.

Обоснование собственной добротности резонаторов СВЧ-установок для отделения меда и вытопки пасечного воска. Приведены исследования собственной добротности сферического резонатора в зависимости от высоты щели между полусферами, проведенные расчетным путем и в программе CST MICROWAVE STUDIO. Разработаны три двухмодульные СВЧ-установки с разными конструкционными исполнениями резонаторов, таких как: сферический, тороидальный и цилиндрический. В первом модуле каждой СВЧ-установки за счет диэлектрического нагрева происходит вытопка меда, а во втором – вытопка воска из пасечного воскового сырья. Обоснованы режимы работы модулей с учетом температуры плавления воска и меда, их вязкости, сохранения органолептических показателей. Сравнительный анализ значений собственной добротности резонаторов разных конструкций при равных объемах (0,12 м³) показывает, что самой максимальной добротностью (11842) обладает сферическое исполнение, на втором месте – тороидальное (7116), а добротность цилиндрического резонатора достигает 5147. С увеличением щели между полусферами до 2 см собственная добротность сферического резонатора снижается на 28%. В результате теоретических исследований подобраны полусферы соответствующих размеров для изготовления экспериментального образца 1 модуля СВЧ-установки, состоящей из сферического и тороидального резонаторов. Анализ полученных результатов показывает, что вытопку пасечного воска с производительностью 40-45 кг/ч в непрерывном режиме может обеспечить СВЧ-установка с 3-4 магнетронами и резонаторами разных конфигураций. При

этом напряженность электрического поля внутри сферического резонатора может достигать до 1,2 кВ/см, если использовать 3-4 магнетрона.

Keywords: wax, melting, honey, power loss, spherical resonator, intrinsic q-factor, electromagnetic field.

This paper deals with the substantiation of the intrinsic quality of resonators of microwave installations for heating bee wax and honey separation. The paper presents the studies of the q-factor of a spherical resonator depending on the height of the gap between the hemispheres carried out by calculation and in the CST MICROWAVE STUDIO application software. There are three options for installations consisting of two modules. The use of modules allows separating two fractions (wax and honey) different in viscosity and structure. The justification of resonator designs is made taking into account the requirements of the melting temperature of wax and honey, their viscosity, and the preservation of organoleptic indices. Three configurations of resonators are proposed: spherical, toroidal and cylindrical. The comparison of the intrinsic Q-value of resonators of different designs with equal volumes (0.12 m³) shows that the highest Q-value (11842) has a spherical design, the second - toroidal design (7116), and the Q-value of a cylindrical resonator reaches 5147. With increasing gap between the hemispheres to 2 cm, the intrinsic Q-factor decreases by 28%. As a result of theoretical research, hemispheres and torus of appropriate sizes were selected for the production of an experimental model of 1 module of a microwave installation. The analysis of the obtained results shows that a microwave installation with 3-4 magnetrons and resonators of different configurations may ensure continuous heating of bee wax in a installation with a capacity of 40-45 kg h. At the same time, the electric field strength may reach up to 1.2 kV cm if 34 emitters are used.

Шевелев Александр Владимирович, аспирант, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. E-mail: shevelev522@mail.ru.

Михайлова Ольга Валентиновна, д.т.н., доцент, проф. каф. «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. E-mail: ds17823@yandex.ru.

Новикова Галина Владимировна, д.т.н., проф., гл. н.с., Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. E-mail: NovikovaGalinaV@yandex.ru.

Просвирякова Марьяна Валентиновна, д.т.н., проф. каф. «Электрификация и автоматизация», Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. E-mail: maryana_belova_803@mail.ru.

Shevelev Aleksandr Vladimirovich, post-graduate student, Nizhny Novgorod State Agricultural Academy. E-mail: shevelev522@mail.ru.

Mikhaylova Olga Valentinovna, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Nizhny Novgorod State Engineering-Economic University. E-mail: ds17823@yandex.ru.

Novikova Galina Vladimirovna, Dr. Tech. Sci., Prof., Chief Staff Scientist, Nizhny Novgorod State Engineering-Economic University. E-mail: NovikovaGalinaV@yandex.ru.

Prosviryakova Maryana Valentinovna, Dr. Tech. Sci., Prof., Nizhny Novgorod State Engineering-Economic University. E-mail: maryana_belova_803@mail.ru.

Введение

Производство продукции пчеловодства в нашей стране является одним из актуальных направлений развития агропромышленного комплекса. В связи с тем, что до 80% производимого воска возвращается в отрасль пчеловодства, возникла необходимость наращивания объемов его производства. Для этого нами были разработаны и исследованы три варианта двухмодульных СВЧ-установок с разными конструктивными исполнениями резонаторов для отделения меда и вытопки пасечного воска.

Целью работы является исследование и обоснование собственной добротности резонаторов с щелью или перфорацией, предназначенной для обеспечения непрерывного режима работы двухмодульных СВЧ-установок для отделения меда и вытопки пасечного воска.

Методы исследования

Для исследования добротности объемных резонаторов разной конфигурации были созданы их 3D-модели в программе Компас-3D с целью проверки полученных расчетным путем результатов в программе CST MICROWAVE STUDIO [1].

Результаты исследования

Разработаны 3 варианта исполнения СВЧ-установок для отделения меда и вытопки пасечного воска с различными конструктивными исполнениями объемных резонаторов, параметры которых подобраны с учетом длины волны (12,24 см). Для каждой конфигурации резонатора необходимо произвести расчет их собственной добротности, от которой зависит КПД СВЧ-установок [2, 3].

В *первой* СВЧ-установке модули содержат цилиндрический и сферический резонаторы, транспортировка сырья из первого модуля во второй происходит посредством вращающейся конической диэлектрической тарелки. Во *второй* СВЧ-установке сферический резонатор установлен внутри тороидального резонатора, транспортировка сырья между модулями происходит за счет вращающегося диэлектрического диска. В *третьей* СВЧ-установке два цилиндрических резонатора соединены последовательно, перемещение сырья обеспечивается шнеком.

Для отделения меда от воскового сырья необходимо увеличить его текучесть за счет диэлектрического нагрева до 40-45°C, что реализуется при помощи конструктивных особенностей СВЧ-установок [4-7]. При достижении медом температуры выше 45°C теряются его полезные свойства, происходит разрушение ферментов, меняются также его свойства и цвет.

Предлагаемые объемные резонаторы можно оценить через электродинамические показатели системы «генератор-резонатор», такие как собственная добротность резонатора. Собственную добротность объемного резонатора определяют как отношение энергии электромагнитного поля, запасенной в резонаторе, к энергии, теряемой за период собственных колебаний. Приблизительно собственную добротность объемного резонатора можно вычислить *через его объем и площадь поверхности* с учетом толщины поверхностного слоя, зависящего от проводимости ферромагнитного материала, из которого изготовлен резонатор. Например, для сферического резонатора можно определить по формуле:

$$Q \approx \frac{2 \cdot V}{\Delta \cdot S} = \frac{2 \cdot R}{3 \cdot \Delta}, \quad (1)$$

где V – объем резонатора, м^3 ;

Δ – толщина поверхностного слоя из алюминия, $1,72 \cdot 10^{-5}$ м;

S – площадь поверхности, ограничивающей объем резонатора, м^2 ;

R – радиус сферического резонатора, м.

Преобразовав формулу (1), собственная добротность **сферического резонатора**:

$$Q = 0,387 \cdot 10^5 \cdot R. \quad (2)$$

$$Q^{E_{010}} = \frac{\omega_p \cdot \mu_a}{2 \cdot R_s} \cdot \frac{a \cdot l}{(a+l)}, \quad Q^{E_{011}} = \frac{\omega_p \cdot \mu_a}{2 \cdot R_s} \cdot \frac{a \cdot l}{(2a+l)}, \quad (3)$$

где a – радиус цилиндра, м;

l – длина цилиндра, м;

R_s – омическое сопротивление в стенах цилиндрического резонатора, Ом;

S – площадь поверхности цилиндрического резонатора, м^2 .

Омическое сопротивление резонатора определяем по формуле [3]:

$$R_s = 32,0 \cdot \pi^4 \cdot \frac{S^2}{\lambda^4} = 32,0 \cdot \pi^4 \cdot \frac{[2 \cdot \pi \cdot a(a+l)]^2}{\lambda^4} = \frac{128,0 \cdot \pi^6}{\lambda^4} \cdot [a(a+l)]^2. \quad (4)$$

$$S = 2 \cdot \pi \cdot a(a+l).$$

Если принять объем цилиндрического резонатора равный $0,12 \text{ м}^3$, то можно определить его конструкционные размеры, согласованные с длиной волны.

$V = \pi \cdot a^2 \cdot l = 3,14 \cdot a^2 \cdot l = 0,12 \text{ м}^3$. Это возможно при $a = 0,2448$ м, $l = 0,64$ м. Омическое сопротивление определяем при этих конструкционных размерах:

$$R_s = 0,1386 \cdot [2 \cdot \pi \cdot a(a+l)]^2 = 0,1386 \cdot [6,28 \cdot 0,2448 \cdot (0,2448 + 0,64)]^2 = 0,2564 \text{ Ом}.$$

Тогда собственная добротность для типов колебаний составит:

$$Q^{E_{010}} = \frac{\omega_p \cdot \mu_a}{2 \cdot R_s} \cdot \frac{a \cdot l}{(a+l)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 0,2564} \cdot \frac{0,2448 \cdot 0,64}{(0,2448 + 0,64)} = 6672.$$

$$Q^{E_{011}} = \frac{\omega_p \cdot \mu_a}{2 \cdot R_s} \cdot \frac{a \cdot l}{(2a+l)} = \frac{15386 \cdot 10^6 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 0,2564} \cdot \frac{0,2448 \cdot 0,64}{(2 \cdot 0,2448 + 0,64)} = 5226.$$

Для сравнения определяем собственную добротность цилиндрического резонатора через величину поверхностного слоя Δ [3]:

$$Q^{E_{011}} = \frac{l \cdot a}{2 \cdot \Delta \cdot (l+a)}, \quad (5)$$

где a – радиус цилиндра, м;

l – высота цилиндра, м.

Если принять $a = 12,24$ см, $l = 24,48$ см, то собственная добротность составляет $2372,1$. При $a = 0,2448$ м, $l = 0,64$ м, собственная добротность цилиндрического резонатора равна $Q = 5147,4$:

С учетом рекомендации, что линейные размеры объемного резонатора СВЧ-установок должны превышать в 5-6 раз длину волны генератора, принимаем радиус сферического резонатора $30,6$ см ($2,5$ длины волны). Тогда объем сферического резонатора составит $0,120 \text{ м}^3$, а его добротность равна $Q = 0,387 \cdot 10^5 \cdot (0,306) = 11842$.

Собственная добротность **цилиндрического резонатора** для колебаний типа E_{010} и E_{011} [3]:

$$Q^{E_{011}} = \frac{l \cdot a}{2 \cdot \Delta \cdot (l + a)} = \frac{0,2448 \cdot 0,1224}{2 \cdot 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot (0,2448 + 0,1224)} = 2372,1.$$

$$Q^{E_{011}} = \frac{l \cdot a}{2 \cdot \Delta \cdot (l + a)} = \frac{0,64 \cdot 0,2448}{2 \cdot 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot (0,64 + 0,2448)} = 5147,4.$$

Значения собственной добротности цилиндрического резонатора, подсчитанные по формулам (3) и (5), для колебаний типа E_{011} примерно совпадают (5226; 5147,4).

Собственная добротность **тороидального резонатора** [3]:

$$Q \approx \frac{2 \cdot V}{\Delta \cdot S} = \frac{2 \cdot 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot r^2}{\Delta \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot r} = \frac{r}{\Delta}. \quad (6)$$

где V – объем, m^3 ;

S – площадь поверхности, m^2 ;

r – радиус окружности тора, м;

R – расстояние от ее центра до оси окружности, м.

Собственная добротность тороидального резонатора зависит только от радиуса окружности (r) и от толщины поверхностного слоя.

Проведем расчет собственной добротности тороидального резонатора, когда радиус окружности равен половине длины волны: $Q = 0,1224/1,72 \cdot 10^{-5} = 7116,2$. При объеме тороидального резонатора $0,12 m^3$ и при его внутреннем диаметре $0,612$ радиус окружности тора должен быть $0,12$ м (принимать $0,1224$ м):

$$V = 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot r^2 = 2 \cdot 3,14^2 \cdot 0,306 \cdot r^2 = 0,12 m^3.$$

$$2 \cdot 3,14^2 \cdot 0,3672 \cdot r^2 = 0,12 m^3, r = \sqrt{\frac{0,12}{7,24}} = 0,129 m.$$

Таблица

Сводная таблица значений собственной добротности разработанных резонаторов

Конфигурация резонаторов	Объем резонатора, m^3	Основные размеры	Собственная добротность
Сферический	0,12	радиус сферы 0,306 м	11842
Тороидальный	0,12	радиус окружности тора 0,1224 м, $R = 0,3672$ м	7116
Цилиндрический	0,12	радиус 0,2448 м, высота 0,64 м	5147



Рис. 1. Сферический резонатор со щелью

Сравнительный анализ значений собственной добротности резонаторов разных конструкций при равных объемах ($0,12 m^3$) показывает, что самой максимальной добротностью (11842) обладает сферическое исполнение, на втором месте – тороидальное (7116), а добротность цилиндрического резонатора достигает 5147. Несмотря на относительно небольшую добротность в варианте три, все предлагаемые резонаторы могут обеспечить: непрерывность технологического процесса отделения меда и вытопки воска из воскового сырья; электромагнитную безопасность (без усложнения предлагае-

мых конструкций); перемешивание и перемещение вязкого сырья во второй резонатор. Проектирование двухмодульной СВЧ-установки с комбинацией резонаторов указанных конструкций позволит реализовать инновационную идею отделения меда от воскового сырья и вытопку воска [4, 5].

Перемещение сырья из первого модуля во второй модуль возможно при применении сферического резонатора, конструкционно состоящего из двух полусфер, не соприкасающихся друг с другом. Щель между полусферами позволяет считать такую конструкцию открытым резонатором, что ведет к снижению собственной добротности. Именно поэтому необходимо оптимально подобрать высоту щели, согласовывая с размерами нагретых частиц воска и его вязкостью.

Определим снижение собственной добротности открытого сферического резонатора в зависимости от высоты щели (рис. 1). Для открытого резонатора относительные потери определяются потерями в резонаторе и дифракционными потерями:

$$\alpha = \frac{2\pi \cdot l}{\lambda_p} \cdot \frac{1}{1 - k^2 + \alpha_{диф}}, \quad (7)$$

где k – коэффициент отражения от сферического резонатора;

$\alpha_{диф}$ – относительная потеря мощности излучений вследствие дифракции за один проход вдоль резонатора;

λ_p – резонансная длина волны, см;

l – расстояние между полусферами (высота щели 1 см), см.

Дифракционные потери ($\alpha_{диф}$) характеризуются волновым параметром (N), например, при радиусе сферы $r = 30,6$ см и расстоянии между сферами 1 см:

$$N = \frac{r^2}{l \cdot \lambda_p} = \frac{30,6^2}{1 \cdot 12,24} = 76,5. \quad (8)$$

Результаты и их обсуждение

При высоте щели, равной 0,5 см, волновой параметр равен $N = 153$, а при 1,5 см – 51. Пользуясь известной методикой, вычисляли относительные потери мощности в зависимости от расстояния между полусферами. Графики изменения волнового параметра и относительных потерь мощности в зависимости от размера щели приведены на рисунке 2.

График снижения собственной добротности сферического резонатора в зависимости от расстояния между полусферами приведен на рисунке 3.

С увеличением расстояния между полусферами с 0,5 до 2 см собственная добротность уменьшается на 28%, т. е. снижается с 11842 до 8526.

Вычисленные значения собственной добротности резонаторов сравнивали с значениями, полученными по программе CST Microwave Studio [1]. Полученные данные с достаточной достоверной вероятностью (95%) совпадают.

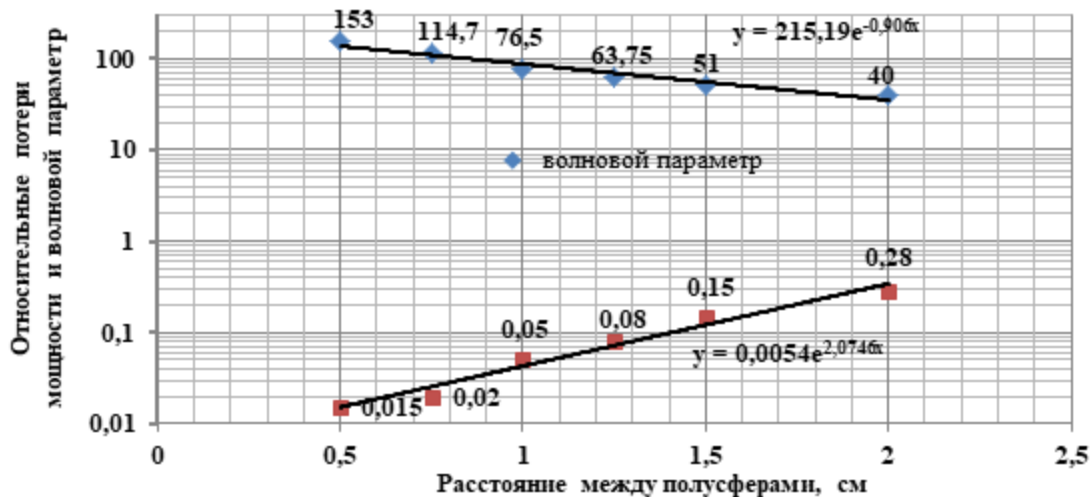


Рис. 2. Изменение волнового параметра и относительных потерь мощности в зависимости от расстояния между сферами

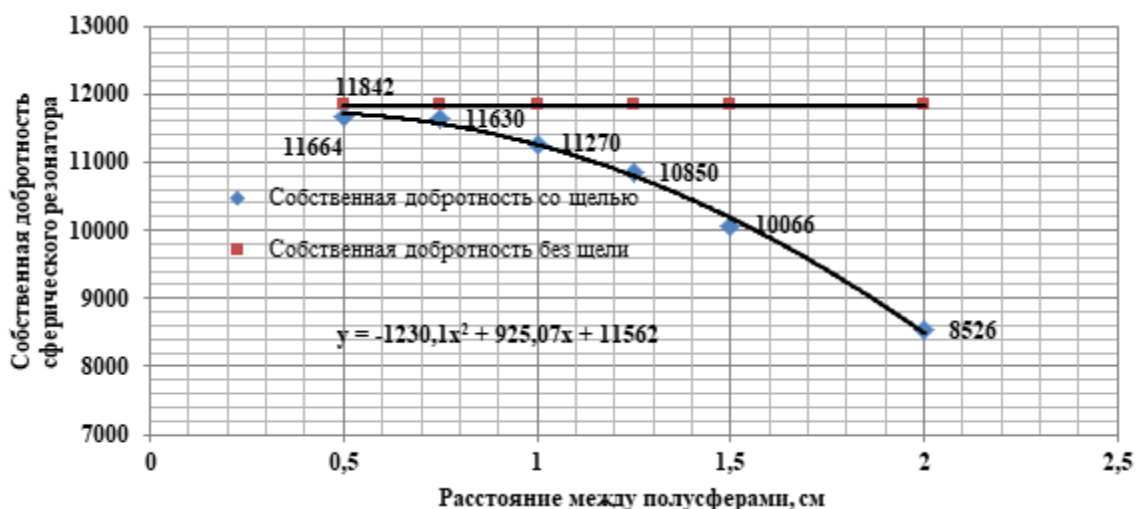


Рис. 3. Снижение собственной добротности сферического резонатора в зависимости от расстояния между полусферами

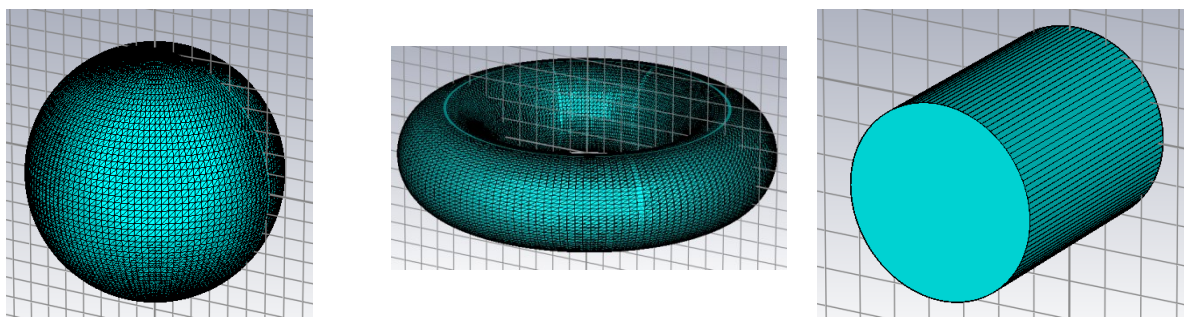


Рис. 4. Результаты моделирования резонаторов в CST Microwave Studio

Выводы

Сравнительный анализ значений собственной добротности резонаторов разных конструкций при равных объемах (0,12 м³) показывает, что самой максимальной добротностью (11842) обладает сферическое исполнение, на втором месте – тороидальное (7116), а добротность цилиндрического резонатора достигает 5147. С увеличением щели между полусферами до 2 см собственная добротность сферического резонатора снижается на 28%. В результате теоретических исследований подобраны полусферы соответствующих размеров для изготовления экспериментального образца 1 модуля СВЧ-установки.

Анализ полученных результатов показывает, что вытопку пасечного воска с производительностью 40-45 кг/ч в непрерывном режиме может обеспечить СВЧ-установка с 3-4 магнетронами и резонаторами разных конфигураций. При этом напряженность электрического поля внутри сферического резонатора может достигать 1,2 кВ/см, если использовать 3 и более излучате-

лей, в тороидальном (кольцевом) резонаторе – 0,6-0,8 кВ/см, а в цилиндрическом резонаторе – до 0,4 кВ/см.

Библиографический список

1. CST MICROWAVE STUDIO – система моделирования СВЧ трехмерных структур: [сайт] / Материалы сайта «Eurointech». – URL: http://www.eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-MICROWAVE-STUDIO.phtml. – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
2. Стрекалов, А. В. Электромагнитные поля и волны / А. В. Стрекалов, Ю. А. Стрекалов. – Москва: РИОР: ИНФРА-М, 2014. – 169 с. – Текст: непосредственный.
3. Сборник задач по курсу «Электродинамика и распространение радиоволн»: учебное пособие / С. И. Баскаков, В. Г. Карташев, Г. Д. Лобов [и др.]; под редакцией С. И. Баскакова. – Москва: Высшая школа, 1981. – 208 с. – Текст: непосредственный.
4. Шевелев, А. В. СВЧ-установка для вытопки пчелиного воска / А. В. Шевелев, Г. В. Нови-

кова, О. В. Михайлова, М. В. Белова. – Текст: непосредственный // Вестник НГИЭИ. – 2020. – № 5 (108). – С. 16-28.

5. Шевелев, А. В. Электротехнология разделения забруса на фракции / А. В. Шевелев, О. В. Михайлова. – Текст: электронный // Меридиан: научный электронный журнал. – 2020. – № 12 (46). – URL: <http://meridian-journal.ru/site/article?id=4171>.

6. Жданкин, Г. В. Разработка технологии и СВЧ-установки с коническими резонаторами для термообработки непищевых отходов животного происхождения / Г. В. Жданкин, Г. В. Новикова, М. В. Белова, В. В. Гоева. – Текст: непосредственный // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 10 (89). – С. 55-64.

7. Шамин, Е. А. Обоснование параметров СВЧ-установки для отделения пуха от шкур кроликов в непрерывном режиме / Е. А. Шамин, Г. В. Новикова, М. В. Белова, О. В. Михайлова. – Текст: непосредственный // Вестник ВГУИТ. – 2019. – № 1. – С. 59-65.

References

1. CST MICROWAVE STUDIO – sistema modelirovaniya SVCh trekhmernykh struktur / Materialy sayta «Eurointech» [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: http://www.eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-MICROWAVE-STUDIO.phtml (dostup svobodnyy).

2. Strekalov A.V., Strekalov Yu.A. Elektromagnitnye polya i volny. – Moskva: RIOR: INFRA-M, 2014. – 169 s.

3. Sbornik zadach po kursu «Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln»: uchebn. posobie / S.I. Baskakov, V.G. Kartashev, G.D. Lobov i dr.; pod red. S.I. Baskakova. – Moskva: Vyssh. shkola, 1981. – 208 s.

4. Shevelev A.V., Novikova G.V., Mikhaylova O.V., Belova M.V. SVCh-ustanovka dlya vytopki pchelinogo voska // Vestnik NGIEI. – 2020. – No. 5 (108). – S. 16-28.

5. Shevelev A.V., Mikhaylova O.V. Elektrotekhnologiya razdeleniya zabrusa na fraktsii // Nauchnyy elektronnyy zhurnal «Meridian». – 2020. – No. 12 (46). Rezhim dostupa: <http://meridian-journal.ru/site/article?id=4171>.

6. Zhdankin G.V., Novikova G.V., Belova M.V., Goeva V.V. Razrabotka tekhnologii i SVCh-ustanovki s konicheskimi rezonatorami dlya termoobrabotki nepishchevykh otkhodov zhivotnogo proiskhozhdeniya // Vestnik NGIEI. – 2018. – No. 10 (89). – S. 55-64.

7. Shamin E.A., Novikova G.V., Belova M.V., Mikhaylova O.V. Obosnovanie parametrov SVCh-ustanovki dlya otdeleniya pukha ot shkurok krolikov v nepreryvnom rezhime // Vestnik VGUIT. – 2019. – No. 1. – S. 59-65.



УДК 631.31

Н.С. Крюковская
N.S. Kryukovskaya

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕНИЯ СТРЕЛЬЧАТЫХ ЛАП НАПЛАВКОЙ ОТДЕЛЬНЫХ ВАЛИКОВ

DETERMINATION OF OPERATING PARAMETERS FOR V-SHAPED SWEEPS REINFORCEMENT BY SINGLE BEADS BUILDING-UP

Ключевые слова: *наплавочное армирование, упрочняющие валики, режимы наплавки, упрочнение стрелчатых лап, износостойкость, температурные поля при наплавке, установка для наплавки типа 4D, геометрические параметры наплавки.*

С целью упрочнения стрелчатых лап культиватора и увеличения их износостойкости в 2-3 раза на рабочую поверхность лап наплавляются отдельные валики из износостойкого материала. Наплавляемые валики имеют определенные ширину и высоту и наносятся на

поверхность стрелчатой лапы в форме дуг с определенным радиусом и шагом. Наплавка стрелчатых лап выполняется в автоматическом режиме на установке с числовым программным управлением типа 4D (с 4 степенями свободы), разработанной в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Исследование упрочнения данным методом проводится на примере стрелчатой лапы КПС-4-330. Для наплавки упрочняющих валиков выбрана порошковая проволока марки ОК Tubrodur 58 O/G M с учетом требований к твердости и износостойкости валиков и совместимости материала проволоки с материалом