

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВУХРЕЗОНАТОРНОЙ СВЧ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДЕФРОСТАЦИИ И ПОДОГРЕВА КОРОВЬЕГО МОЛОЗИВА**Г.В. Новикова, Б.Г. Зиганшин, О.В. Михайлова, И.Г. Ершова,
М.В. Просвирякова, П.В. Зайцев, Н.К. Кириллов**

Реферат. С использованием поэтапной систематизации методов оптимизации электродинамических и конструкционно-технологических параметров разработана методика создания СВЧ установок непрерывно-поточного действия для дефростации и подогрева коровьего молозива, позволяющих сохранить кормовую ценность сырья. Конструкционное исполнение резонатора радиогерметичной СВЧ установки непрерывно-поточного действия позволяет реализовать инновационную идею разделения процессов дефростации и подогрева молозива в соответствии с характером изменения диэлектрических характеристик сырья в диапазоне отрицательной и положительной температур. Разработанная двухрезонаторная установка позволит ускорить процесс дефростации и подогрева коровьего молозива; обеспечит непрерывно-поточный режим, соблюдение электромагнитной безопасности, а также вариативность производительности установки благодаря использованию нескольких магнетронов с воздушным охлаждением. Ее общая мощность составляет 4,5 кВт, при производительности 35...40 кг/ч, удельные энергетические затраты не превышают 0,12...0,13 кВт·ч/кг. Базовый размораживатель молозива, мощностью 6 кВт работает при энергетических затратах 0,3 кВт·ч/кг, продолжительность процесса составляет 1,5...2 ч. При использовании предложенной модели СВЧ установки, продолжительность процесса сокращается в 4 раза, одновременно сохраняется кормовая ценность молозива, в том числе концентрация иммуноглобулинов остается на уровне 48...50 г/л. В усеченном коническом резонаторе формируются условия для возникновения резонансных колебаний в результате переотражения электромагнитных волн высших порядков от критических сечений и обеспечивается ограничение излучения электромагнитных волн без дополнительного экранирующего корпуса. Эффективность квазистационарного тороидального резонатора, оцененная по величине напряженности электрического поля, мощности генератора и собственной добротности составляет 0,93.

Ключевые слова: тороидальный и конический резонаторы, молозиво, двухрезонаторная установка, напряженность электрического поля.

Введение. На фермах крупного рогатого скота (КРС) для выпойки новорожденных телят используют молозиво с температурой 35...37 °С. В течение первых суток одному теленку необходимо 4...7 л молозива, а его излишки разливают в пластиковую тару и хранят в замороженном виде. Применяемые способы замораживания молозива не оказывают существенного влияния на количество иммуноглобулинов – как основного компонента, формирующего его кормовую ценность. Молозиво может без значительных потерь храниться до 6 месяцев при температуре минус (15...20) °С. Перед кормлением молодняка животных его подвергают частичной дефростации (до 0 °С) и подогреву до 37...40 °С в размораживателях – пароводяным способом. Для сохранения кормовой ценности молозиво необходимо размораживать равномерно в предельно щадящем режиме. Однако в этом случае негативное влияние на его кормовую ценность оказывает длительность процесса (1,5...2 ч) [1]. В связи с изложенным актуальна разработка технологии и установки, позволяющей ускорить процессы дефростации и подогрева молозива. Для этого, на наш взгляд, можно заменить традиционный способ размораживания на микроволновую технологию.

Известна СВЧ установка [2] с квазистационарным тороидальным резонатором, образованным между коаксиально расположенными неферромагнитными цилиндрами разной высоты и верхней кольцевой неферромагнитной поверхностью. К недостаткам такой установки

можно отнести необходимость освобождения сырья от тары, что приводит к увеличению продолжительности технологического процесса; размеры замороженных брикетов молозива могут превышать глубину проникновения электромагнитной волны, что снижает равномерность нагрева сырья.

Существует СВЧ размораживатель коровьего молозива непрерывно-поточного действия с биконическим резонатором [3]. Его недостатками можно считать отсутствие возможности самостоятельного управления дозой воздействия ЭМП СВЧ в каждом отсеке, что делает невозможным сокращение продолжительности процесса; увеличение стоимости установки из-за использования экранирующего корпуса.

Еще одна СВЧ установка для размораживания и подогрева коровьего молозива в непрерывном режиме [4], позволяет регулировать дозу воздействия для каждого отсека, но ее конструкция очень сложная в изготовлении и управлении.

Цель исследований – обоснование параметров двухрезонаторной СВЧ установки непрерывно-поточного действия, позволяющей разделить и ускорить процессы дефростации и подогрева коровьего молозива с сохранением кормовой ценности и соблюдением электромагнитной безопасности без экранирующего корпуса.

В работе решали следующие задачи: определить напряженность электрического поля в открытом коническом и квазистационарном

тороидальном резонаторе; установить коэффициент отражения на границе раздела между двумя однородными средами (замороженное и жидкое коровье молоко); определить эффективность тороидального резонатора.

Условия, материалы и методы. В качестве исследуемого сырья использовали коровье молоко первых двух удоев от клинически здоровых животных с кислотностью 40...60 °Т, плотностью 1,051...1,060 г/см³, массовой долей жира 6,4 % и концентрацией иммуноглобулинов 50 г/л. Замораживали его до -10 °С в специальных полиэтиленовых пакетах в виде брикетов 2х4х2 см. Плотность молока определяли ареометром АМТ 1015-1040, кислотность контролировали титриметрическим методом по ГОСТ Р 54669-2011. Дефростацию молока проводили до 0...1 °С, подогрев – до 35...37 °С. Температуру сырья в процессе воздействия ЭМП СВЧ контролировали пирометром Testo 925, распределение теплового потока по поверхности сырья – тепловизором FLIRi335. Контроль дозы воздействия электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) на сырье проводили на основании измерений напряженности электрического поля в частотном диапазоне 2450 МГц (12,24 см) – измерителем электромагнитных излучений – ПЗ-31.

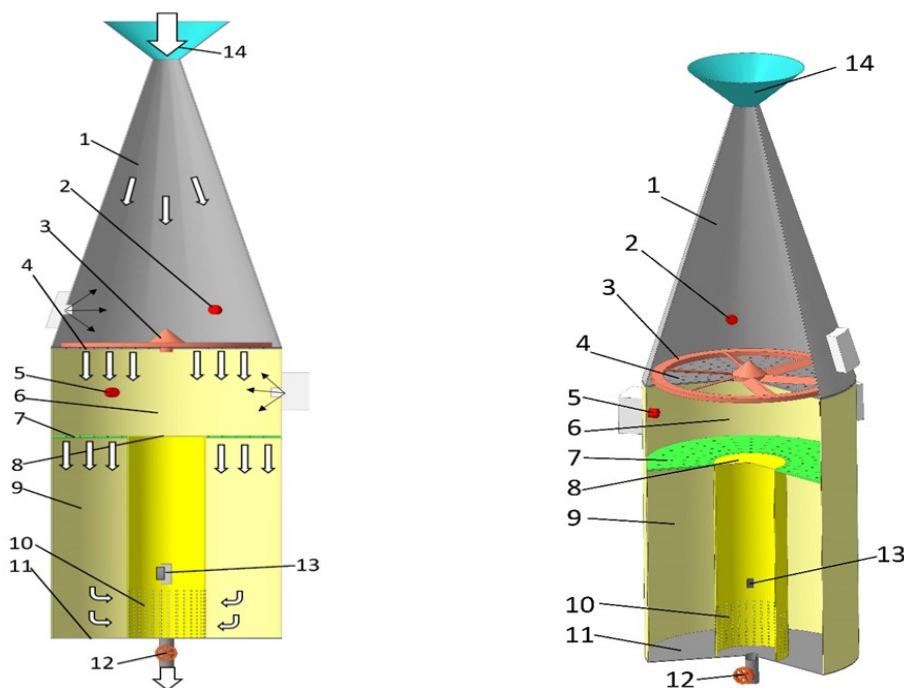
В базовом варианте для дефростации и подогрева коровьего молока использовали установку «Эконом БМА-50», работающую в периодическом режиме по принципу водяной

бани посредством нагрева воды с помощью трубчатого электронагревателя, потребляемой мощностью 6...12 кВт.

При исследовании процессов отражения и преломления волны использовали методику А. Н. Диденко [5]; интенсивности и мощности излучения через перфорацию – С. А. Афанасьева [6].

Для реализации технологических операций дефростации и подогрева молока разработана двухрезонаторная сверхвысокочастотная установка [7]. Разделение процесса на технологические операции дефростации и подогрева связано с противоположным характером изменения фактора диэлектрических потерь молока в зависимости от температуры [8, 9].

СВЧ установка выполнена в виде двух объединенных резонаторов – конического 1 и тороидального (6, 7) с общим перфорированным ферромагнитным основанием 4 (рис. 1). Вершина конического резонатора усечена на уровне критического сечения для загрузки замороженных брикетов молока. На поверхности каждого резонатора расположены по три магнетрона со сдвигом на 120° по периметру. Три излучателя от магнетронов 2 направлены в конический резонатор над перфорированным ферромагнитным основанием, и три излучателя от магнетронов 5 расположены под основанием. Тороидальный резонатор представлен конденсаторной частью 6, отделенной перфорированным диэлектрическим кольцевым основанием 7 от кольцевой



а) схематическое изображение; б) пространственное изображение; 1 – конический резонатор; 2 – магнетроны на коническом резонаторе; 3 – диэлектрический перемешивающий механизм; 4 – перфорированное основание конического резонатора; 5 – магнетроны на поверхности конденсаторной части; 6 – конденсаторная часть тороидального резонатора; 7 – диэлектрическое перфорированное основание; 8 – ферромагнитное основание внутреннего цилиндра; 9 – кольцевая часть тороидального резонатора; 10 – перфорированная нижняя часть боковой стенки внутреннего цилиндра; 11 – ферромагнитное основание общее для цилиндров; 12 – шаровой кран; 13 – датчик температуры; 14 – приемная емкость

Рисунок 1 – СВЧ установка для дефростации и подогрева коровьего молока

части 9. Средний периметр кольцевой части резонатора кратен половине длины волны. Кольцевая часть резонатора представлена в виде соосно расположенных неферромагнитных цилиндров с общим неферромагнитным нижним основанием 11. На нижнем основании внутреннего неферромагнитного цилиндра установлен шаровой кран 12, верхнее его основание 8 выполнено из неферромагнитного материала, а нижняя часть боковой поверхности 10 перфорирована. Внутри этого цилиндра установлен датчик температуры 13. Над перфорированным основанием 4 конического резонатора расположен перемешивающий диэлектрический механизм 3 с электроприводом. Над усеченной вершиной конического резонатора установлен приемный резервуар 15 с заслонкой.

Брикеты замороженного коровьего молока размерами не более 2x4x2 см (то есть не более двух глубин проникновения волны, что обеспечивает равномерный нагрев) загружаются в приемный резервуар 14, с предварительно закрытой заслонкой и шаровым краном. Включается электропривод диэлектрического перемешивающего механизма 3. Открывается заслонка, включаются генераторы 2 возбуждающие ЭМП СВЧ для дефростации сырья. Образовавшаяся жидкая субстанция при перемешивании механизмом 3 стекает сквозь перфорированное неферромагнитное основание. Далее включаются генераторы 5, излучатели которых направлены в конденсаторную часть тороидального резонатора, где создается высокая напряженность электрического поля.

Молозиво подогревается, находясь на перфорированном диэлектрическом основании, диаметр отверстий которого меньше, чем у неферромагнитного основания конического резонатора. Это связано с высокой жирностью молока, текучесть которого с увеличением температуры возрастает. Подогретое молоко стекает в кольцевое пространство 9 (7, 11), откуда через перфорацию нижней части боковой поверхности попадает во внутренний цилиндр. Произведенный продукт можно слить, открыв шаровой кран. Во внутреннем цилиндре 8, 11, где ЭМП СВЧ отсутствует, установлен датчик температуры 13, позволяющий управлять процессом слива продукта с помощью шарового крана. Электромагнитная безопасность обслуживающего персонала соблюдается благодаря отсечению вершины конического резонатора на уровне критического сечения. С учетом такой конструкции отпадает надобность в дополнительном экранировании корпуса.

Анализ и обсуждение результатов исследований. По данным И.А. Рогова [10], изменения фактора диэлектрических потерь (k) коровьего молока от температуры (T) описываются эмпирическими выражениями в промежутках температур: от -10 до 0 °С – $k = 24,75 \cdot e^{0,19 \cdot T}$; от 0 до $+40$ °С – $k = 27,308 \cdot e^{-0,021 \cdot T}$.

То есть фактор диэлектрических потерь сырья при отрицательной температуре растет, а при положительной – падает.

Удельная мощность (P_{yo}), генерируемая в единице объема замороженного молока, в процессе дефростации с -10 до 0 °С при напряженности электрического поля $1,2$ кВ/см увеличивается с 7832 до 52867 Вт/м³.

$$P_{yo} = 5,55 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot k \cdot E^2 =$$

$$= 5,55 \cdot 10^{-11} \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot (4 \dots 27) \cdot (1,2 \cdot 10^5)^2 = \quad (1)$$

$$= 7832 \dots 52867 \text{ Вт} / \text{м}^3,$$

где f – частота, Гц;
 k – фактор диэлектрических потерь коровьего молока;
 E – напряженность электрического поля, В/м.

Скорость нагрева ($\Delta T / \Delta \tau$) молока в процессе размораживания увеличивается с $0,0014$ до $0,0094$ °С/с:

$$\frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \frac{P_{yo} \cdot \eta}{\rho \cdot C} = \frac{(7832 \dots 52867) \cdot 0,7}{1017 \cdot 3860} = \quad (2)$$

$$= 0,0014 \dots 0,0094 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{с}.$$

где ρ – плотность сырья, кг/м³;
 C – теплоемкость сырья, Дж/кг °С;
 η – термический КПД;
 $\Delta \tau$ – продолжительность воздействия ЭМП СВЧ, с.

Тогда продолжительность дефростации молока составит:

$$\Delta \tau = \Delta T / (0,0094) = 10 / 0,0094 = 17,7 \text{ мин.} \quad (3)$$

Для подогрева молока с 0 до 40 °С, с учетом уменьшения скорости нагрева, следует обеспечить в резонаторе напряженность ЭП $3,8$ кВ/см, то есть другую дозу воздействия ЭМП СВЧ. Это возможно в конденсаторной части квазистационарного тороидального резонатора. При этом продолжительность подогрева составит $7 \dots 8$ мин, а общая длительность технологического процесса в двух резонаторах $25 \dots 26$ мин. Общая мощность СВЧ установки при производительности $35 \dots 40$ кг/ч равна $4,5$ кВт, а удельные энергетические затраты $0,12 \dots 0,13$ кВт·ч/кг. Базовый размораживатель молока «Эконом БМА-50» при потребляемой мощности 6 кВт, работает с энергетическими затратами $0,3$ кВт·ч/кг. Результаты теоретических исследований свидетельствуют, что продолжительность процесса дефростации и подогрева молока в проектном варианте сокращается в 4 раза, что дает возможность выдвигать предположение о сохранении его кормовой ценности.

Особое место среди применяемых типов резонаторов занимают открытые резонаторы – биконические и конические. Размеры и рабочую частоту для этих резонаторов подбирают таким образом, чтобы на конической части возникали условия отсечки для одного или нескольких высших типов колебаний. Это

обеспечивает условия для возникновения резонансных колебаний вследствие переотражений электромагнитных волн высших порядков от критических сечений [11]. Путем отсечения вершины конического резонатора были созданы отверстия для внесения замороженных блоков коровьего молока без ущерба для качества резонансной системы. При коническом профиле резонатора вырождение между колебаниями H_{01p} (симметричная мода магнитного поля, с нулевым числом полных изменений поля по окружности и одним изменением поля по диаметру) и E_{11p} (основная несимметричная мода электрического поля, с одним числом полных изменений поля по окружности и одним изменением поля по диаметру) не происходит. Алексенко Я. В. показал, что спектр мод даже при большом угле раствора конуса слабо отличается от собственных мод цилиндрического резонатора [12]. Поэтому напряженность электрического поля (В/м) в открытом коническом резонаторе можно описать формулой:

$$E_r = \frac{C \cdot (J_{m+1/2}) \cdot \left(\frac{\omega \cdot r}{c}\right) \cdot P_v^m (\cos \theta) \cdot e^{im\varphi}}{r^{3/2}}, \quad (4)$$

где $m = 1, 2, 3 \dots$ целое число радиальных изменений поля по диаметру;
 ω – частота ЭМП, Гц;
 θ – угол раствор конуса, град;
 C – константа, определяемая частным решением функции Бесселя;
 J – функция Бесселя;
 c – скорость электромагнитной волны в вакууме ($3 \cdot 10^8$), м/с;
 r – радиус основания конического резонатора, м;
 P_v – мощность, генерируемая в единице объема сырья, Вт/м³;
 φ – начальная фаза, град.

Собственные частоты конического резонатора мало отличаются от собственных мод

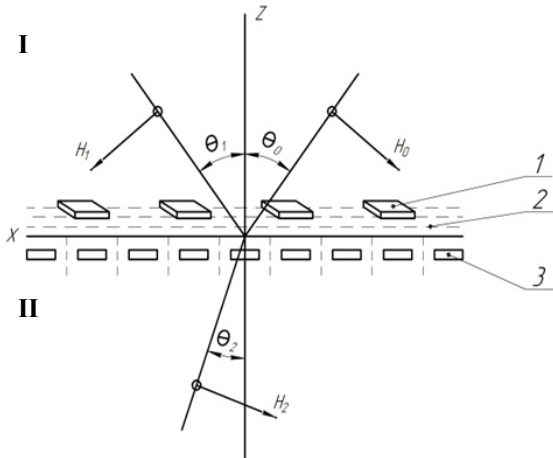


Рис. 2 – Падение плоской волны на поверхность раздела двух сред
 1 – замороженные брикеты молока; 2 – жидкое молоко; 3 – перфорированное основание конического резонатора

цилиндрического резонатора с радиусом, равным радиусу основания конуса [5].

Изучение процессов отражения и преломления волны СВЧ диапазона на плоской границе раздела между двумя однородными средами (замороженное и жидкое коровье молоко) на перфорированном неферромагнитном основании конического резонатора [5] позволило установить, что падение волны (рис. 2) происходит из прозрачной среды I (замороженного сырья). Обозначим величины, относящиеся к падающей волне и отраженной, индексами 0 и 1, а величины, относящиеся к преломленной волне – индексом 2. Направление нормали к плоскости раздела сред I и II совпадает с осью z , ориентированной внутрь среды II (жидкое молоко), а ось x совпадает с границей раздела сред. Направление распространения всех волн лежит в плоскости xz , что эквивалентно равенству составляющих волнового вектора для трех волн:

$$k_{0x} = k_{1x} = k_{2x}, \text{ где } k_0 = k_0 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon \cdot \mu}, \quad (5)$$

где ε, μ – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

С использованием принципа Френеля рассмотрим два варианта распространения волн. Первый, когда электрическое поле \vec{E} перпендикулярно плоскости падения xz ; второй, когда \vec{E} лежит в этой плоскости:

$$E_1 = \frac{\cos \theta_o \sqrt{\varepsilon_1 - \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \cdot \sin^2 \theta_o}}{\cos \theta_o \sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \cdot \sin^2 \theta_o} \cdot E_o, \quad (6)$$

$$E_2 = \frac{2 \cdot \cos \theta_o \sqrt{\varepsilon_1}}{\cos \theta_o \sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \cdot \sin^2 \theta_o} \cdot E_o.$$

Если обе среды совершенные диэлектрики, то:

$$E_1 = \frac{\sin(\theta_2 - \theta_o)}{\sin(\theta_2 + \theta_o)} \cdot E_o, \quad (7)$$

$$E_2 = \frac{2 \cdot \cos \theta_o \cdot \sin \theta_2}{\sin(\theta_2 + \theta_o)} \cdot E_o.$$

При нормальном падении плоской волны на границу раздела сред ($\theta_o = 0$) оба случая поляризации эквивалентны, тогда коэффициент отражения R , позволяющий оценить отношение потока отраженной энергии к падающему потоку энергии можно рассчитать по выражению:

$$R = \left| \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1}}{1 + \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1}} \right|^2. \quad (8)$$

Формула (8) справедлива для поглощающей среды II. Если подвергается воздействию ЭМП СВЧ жидкая фракция молока с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_2 = 53 \dots 44$ и частотой 2450 МГц, то

$$\sqrt{\varepsilon_2} = \sqrt{53 \dots 44} = 7,28 \dots 6,63.$$

С учетом того, что диэлектрическая проницаемость замороженных блоков молока (ε_1)

$$R = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1}}{1 + \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1}} = \frac{1 - \sqrt{(53...44) / (7...53)}}{1 + \sqrt{(53...44) / (7...53)}} = 0,467...0,0466. \quad (9)$$

Следовательно, при мощности генератора 2400 Вт в жидкой фракции молозива при 0°C поглощается мощность $(1...0,467) \cdot 2400 = 1279$ Вт.

Интенсивность и мощность излучения через перфорации основания конического резонатора исследовали на примере элементарного щелевого излучателя. Переменные электрические заряды в этом случае наводятся в результате протекания поверхностных токов по стенке перфорированного основания.

Пространство между соосно расположенными цилиндрами (размерами a и b), образующими кольцевую часть тороидального резонатора), заполнено жидким коровьим молозивом с диэлектрической проницаемостью ε . Распределение электрического поля \vec{E} в поперечном сечении линии должно повторять структуру электростатического поля в цилиндрическом конденсаторе [13]. Поэтому электрическое поле \vec{E} имеет только радиальную составляющую E_r и не зависит от полярной координаты φ . Тогда на неферромагнитных поверхностях резонатора $E_\tau = 0$, а электрическое поле бегущей ТЕМ (Transverse Electromagnetic) волны (поперечная волна, у которой оба вектора E и H перпендикулярны оси Oz), не имеет продольных составляющих: $Ez = 0, Hz = 0$.

Радиальная составляющая ТЕМ волны описывается уравнением:

$$E_r = \frac{U}{\ln(b/a)} \cdot \frac{e^{i(\omega t - k_z r)}}{r}, \quad (10)$$

где k_z – продольное волновое число.

Мощность переносимая ТЕМ волной вдоль коаксиальной части резонатора равна:

$$P = \frac{\pi \cdot U^2}{z_0 \cdot \ln(b/a)}, \quad (11)$$

где z_0 – импеданс среды, заполняющий резонатор (отношение амплитуд электрического и магнитного полей волны).

При уменьшении кольцевого пространства (стремлении отношения b/a к единице) потери растут. С другой стороны, если $b/a > 3,6$, то потери возрастают из-за увеличения плотности тока во внутреннем цилиндре с малым радиусом.

Рассмотрим электрофизические аспекты нагрева сырья в ЭМП СВЧ. Размещение сырья с достаточно большим тангенсом угла диэлектрических потерь в объемный резонатор позволяет использовать практически всю СВЧ энергию генератора для его нагрева. При сравнительно низких температурах нагрева КПД передачи мощности генератора сырью можно определить по следующей формуле:

$$\eta = \frac{P_{\text{сырья}}}{P_{\text{генер}}} = \frac{P_{\text{сырья}}}{P_{\text{сырья}} + P_{\text{стенки}}}.$$

Пусть слой замороженного сырья расположен на перфорированном основании конического резонатора, радиусом R с колебаниями H_{01p} так, что его поверхность касательна электрическому полю $E_\varphi(r, z)$, а центр симметрии имеет координату $z = \lambda / 4 \cdot q$, где $q=1,3,5,\dots,n$.

При определенных конструктивных размерах резонатора КПД можно определить из следующего выражения [5]:

$$\eta = \left\{ 1 + \frac{[1 + (2 \cdot \pi / \mu_{01})^2 \cdot (R/h)^3 \cdot (1/2 \cdot p)] \cdot (R_s / Z_0) \cdot (V_{\text{рез}} / V_{\text{сырья}})}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \text{tg} \delta \cdot (2 \cdot \pi / \mu_{01})^2 \cdot (R/\lambda)^3} \right\}^{-1}, \quad (13)$$

где μ_{01} – корень функции Бесселя J_1 ($\mu_{01}=2,4050$) [9];

h – высота усеченного конуса, м;

$$V_{\text{рез}} = \frac{\pi \cdot h}{3} (R^2 + R \cdot r + r^2) - \text{объем усеченного конического резонатора, м}^3;$$

$V_{\text{сырья}} = \pi \cdot R^2 \cdot d$ – объем сырья в резонаторе, м³;

R_s – поверхностное сопротивление резонатора ($R_s = 0,028$ Ом·мм²/м);

Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства ($Z_0 = 377$ Ом).

Эффективность резонатора можно примерно оценить по величине напряженности ЭП ($E_\varphi(r, z)$) мощности генератора ($P_{\text{генер}}$) и собственной добротности (Q):

$$\frac{E_\varphi(r, z)}{\sqrt{P_{\text{генер}} \cdot Q}}. \quad (14)$$

КПД резонатора зависит от коэффициента заполнения сырьем и ориентации граничных плоскостей сырья относительно вектора электрического поля. Для практических расчетов КПД цилиндрической части тороидального резонатора можно использовать формулу:

$$\eta = [1 + \frac{l \cdot \lambda}{2 \cdot \alpha \cdot \lambda_{\text{кр}}}]^{-1}.$$

где l, a – размеры цилиндрической части тороидального резонатора, м.

В нашем случае:

$$\eta = [1 + \frac{0,1836 \cdot 0,1224}{2 \cdot 0,306 \cdot 0,52}]^{-1} = 0,93.$$

Выводы. Разработанная двухрезонаторная СВЧ установка наиболее полно реализует основные критерии технологического процесса: непрерывно-поточный режим при соблюдении электромагнитной безопасности без дополнительного экранирующего корпуса; ускорение процессов дефростации и подогрева коровьего молозива; вариативность производительности установки за счет использования нескольких магнетронов с воздушным охлаждением. Общая мощность СВЧ установки составляет 4,5 кВт при производительности 35...40 кг/ч, удельных энергетических затратах 0,12...0,13 кВт·ч/кг. При этом продолжи-

тельности процесса сокращается в 4 раза.

Усеченный конический резонатор, позволяет сохранить условия для возникновения резонансных колебаний вследствие переотражений электромагнитных волн высших порядков от критических сечений и обеспечивает ограничение излучения электромагнитных

волн без дополнительного экранирующего корпуса.

Эффективность квазистационарного тороидального резонатора, оцененная по величине напряженности ЭП, мощности генератора и собственной добротности составляет 0,93.

Литература

1. Молозиво: его состав, свойства, качество, способы и нормы скармливания // Животноводство КРС, социальный сайт о коровах. URL: zivotnovodstvo.ru/molozivo-ego-sostav-svoystva...i... (дата обращения 27.01.2021).
2. Поручиков Д. В., Новикова Г. В., Васильев А. Н. и др. Микроволновая установка для размораживания коровьего молозива // Патент РФ № 2694944, 18.07.2019.
3. Тараканов Д. А., Новикова Г. В., Белова М. В. И др. СВЧ установка с биконическим резонатором для размораживания коровьего молозива в непрерывном режиме // Патент РФ № 2721484 РФ, 19.05.2020.
4. Тихонов А. А., Казаков А. В., Новикова Г. В. И др. СВЧ установка с нетрадиционными резонаторами для размораживания и разогрева коровьего молозива в непрерывном режиме // Патент № 2732722 РФ, 22.09.2020.
5. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика. М.: Наука, 2003. 446 с.
6. Афанасьев С. А., Санников Д. Г. Введение в электродинамику СВЧ. Ульяновск: Ульяновский ГУ. 2012. 60 с.
7. Новикова Г. В., Михайлова О. В., Зайцев С. П. Разработка микроволновой технологии и установки для размораживания и разогрева коровьего молозива // Вестник Чувашской сельскохозяйственной академии. 2020. № 3 (14). С. 90–94.
8. Белова М. В., Тараканов Д. В., Тихонов А. А. Разработка и обоснование параметров СВЧ установки для размораживания и разогрева коровьего молозива // Вестник НГИЭИ. 2020. № 2(105). С. 45–55.
9. Электромагнитные поля и микроволновые технологии / М. В. Просвирякова, О. В. Михайлова, Е. А. Шамин и др. Княгинино: ГБОУ ВО НГИЭУ, 2020. 160 с.
10. Рогов И. А. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 288 с.
11. Датчики на основе биконических СВЧ-резонаторов для контроля параметров диэлектриков / О. О. Дробахин, П. И. Заболотный, Н. Б. Гореев и др. // 19-я Крымская конференция. Микроволновые и телекоммуникационные технологии (CriMiCo). Севастополь: Крым. 2009. № 1418. С. 775-776.
12. Алексеев Я. В., Монахов А. М., Рожанский И. В. Методы шепчущей галереи конического резонатора // Журнал технической физики. 2009. Т. 79. № 11. С. 72–76.
13. Баскаков С. И. Электродинамика и распространения волн. М.: Наука, 1992. 207 с.

Сведения об авторах:

Новикова Галина Владимировна – доктор технических наук, профессор, e-mail: NovikovaGalinaV@yandex.ru
Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, г. Княгинино, Россия
Зиганшин Булат Гусманович – доктор технических наук, профессор РАН, профессор кафедры машины и оборудования в агробизнесе, e-mail: zigan.66@mail.ru
Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Россия
Михайлова Ольга Валентиновна – доктор технических наук, профессор кафедры «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», e-mail: ds17823@yandex.ru
Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, г. Княгинино, Россия
Ершова Ирина Георгиевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: eig85@yandex.ru
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия.
Просвирякова Марьяна Валентиновна – доктор технических наук, профессор кафедры «Электрификация и автоматизация», e-mail: prosviryakova.maryana@yandex.ru
Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, г. Княгинино, Россия
Зайцев Петр Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Механизация, электрификация и автоматизация», e-mail: zaucsvpet@mail.ru
Кириллов Николай Кириллович – доктор ветеринарных наук, профессор
Чувашский государственный аграрный университет, г. Чебоксары, Россия

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF PARAMETERS OF DUAL-RESONATOR MICROWAVE INSTALLATION FOR DEFROSTING AND HEATING COW COLOSTRUM

G.V. Novikova, B.G. Ziganshin, O.V. Mikhailova, I.G. Yershova,
M.V. Prosviryakova, P.V.Zaitsev, N.K. Kirillov

Abstract. A method for creating continuous-flow microwave installations for defrosting and heating cow's milk is developed on the basis of a step-by-step systematization of methods for optimizing the electrodynamic and structural-technological parameters of the installation, which allow preserving the feed value of raw materials. Construction of the resonator radiodermatitis microwave installation continuous-flow action allows you to implement the innovative idea of separation processes defrosting and heating colostrum in accordance with the nature of the change of dielectric properties of materials in the range of negative and positive temperatures to speed up the process, allowing you to keep feeding value of colostrum. The developed two-resonator installation most fully implements the main criteria of the technological process: acceleration of the processes of defrosting and heating of cow colostrum; continuous-flow mode in the presence of electromagnetic safety; variability of the plant performance due to the use of several air-cooled magnetrons. The total power of the microwave installation is 4.5 kW with a capacity of 35...40 kg/h, specific energy costs of 0.12...0.13 kWh/kg. The duration of the process is reduced

by 4 times, and, consequently, the cortical value of colostrum is preserved. The basic colostrum defroster, with a capacity of 6 kW, operates at an energy cost of 0.3 kWh / kg, the process duration reaches 1.5...2 hours. The improved conical resonator allows to preserve the conditions for the occurrence of resonant oscillations due to the re-reflections of higher-order electromagnetic waves from critical sections and provides for the limitation of electromagnetic wave radiation without an additional shielding housing. The efficiency of a quasi-stationary toroidal resonator, estimated by the magnitude of the electric field strength (EF), the generator power and the intrinsic Q -factor is 0.93.

Key words: toroidal and conical resonators, colostrum, two-resonator installation, electric field strength.

References

1. Colostrum: its composition, properties, quality, methods and norms of feeding. [Internet]. Cattle breeding, a social site about cows. [cited 2021 Jan. 01]. Available from: URL: [zivotnovodstvo.ru/molozivo-ego-sostav-svoystva...i....](http://zivotnovodstvo.ru/molozivo-ego-sostav-svoystva...)
2. Poruchikov DV, Novikova GV, Vasil'ev AN. Mikrovolnovaya ustanovka dlya razmorazhivaniya korov'ego moloziva. [Microwave installation for defrosting cow colostrum]. Patent RF № 2694944, 18.07.2019.
3. Tarakanov DA, Novikova GV, Belova MV. SVCh ustanovka s bikonicheskim rezonatorom dlya razmorazhivaniya korov'ego moloziva v nepreryvnom rezhime. [Microwave installation with a biconical resonator for defrosting cow colostrum in a continuous mode]. Patent RF № 2721484 RF, 19.05.2020.
4. Tikhonov AA, Kazakov AV, Novikova GV. SVCh ustanovka s netraditsionnymi rezonatorami dlya razmorazhivaniya i razogreva korov'ego moloziva v nepreryvnom rezhime. [Microwave installation with unconventional resonators for defrosting and heating cow colostrum in continuous mode]. Patent № 2732722 RF, 22.09.2020.
5. Didenko AN. SVCh-energetika: teoriya i praktika. [Microwave energy: theory and practice]. Moscow: Nauka. 2003; 446 p.
6. Afanas'ev SA, Sannikov DG. Vvedenie v elektrodinamiku SVCh. [Introduction to microwave electrodynamics]. Ulyanovsk: Ulyanovskii GU. 2012; 60 p.
7. Novikova GV, Mikhailova OV, Zaitsev SP. [Development of microwave technology and installation for defrosting and warming up cow colostrum]. Vestnik Chuvashskoi sel'skokhozyaistvennoi akademii. 2020; 3 (14): 90-94 p.
8. Belova MV, Tarakanov DV, Tikhonov AA. [Development and justification of the parameters of a microwave installation for defrosting and warming up cow colostrum]. Vestnik NGIEI. 2020; 2 (105): 45-55 p.
9. Prosviryakova MV, Mikhailova OV, Shamin EA. Elektromagnitnye polya i mikrovolnovye tekhnologii. [Electromagnetic fields and microwave technologies]. Knyaginino: GBOU VO NGIEU. 2020: 160 p.
10. Rogov IA. Elektrofizicheskie, opticheskie i akusticheskie kharakteristiki pishchevykh produktov. [Electrophysical, optical and acoustic characteristics of food products]. Moscow: Legkaya i pishchevaya promyshlennost'. 1981: 288 p.
11. Drobakhin OO, Zabolotnyi PI, Goreev NB. [Sensors based on biconical microwave resonators for monitoring the parameters of dielectrics. 19th Crimean conference. Microwave and telecommunication technologies (CriMiCo)]. Sevastopol': Krym. 2009; 1418: 775-776 p.
12. Alekseenko YaV, Monakhov AM, Rozhanskii IV. [Methods of the whispering gallery of a conical resonator]. Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2009; 79 (11): 72-76 p.
13. Baskakov SI. Elektrodinamika i rasprostraneniya voln. [Electrodynamics and wave propagation]. Moscow: Nauka. 1992; 207 p.

Authors:

Novikova Galina Vladimirovna – Doctor of Technical sciences, Professor, chief researcher, e-mail: NovikovaGalinaV@yandex.ru
 Nizhny Novgorod state University of engineering and Economics, Knyaginino, Russia
 Ziganshin Bulat Gusmanovich – Doktor of technical sciences, professor of RAS, professor the chair «Machinery and equipment in agribusiness», e-mail: zigan.66@mail.ru
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia
 Mikhailova Olga Valentinovna – Doctor of Technical sciences, associate professor, Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems, e-mail: ds17823@yandex.ru
 Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino Russia
 Irina Georgievna Ershova – Ph.D. of Technical sciences, senior researcher
 Federal research Agroengineering center VIM, Moscow, e-mail: eig85@yandex.ru
 Mariana Valentinovna Prosviryakova – Doctor of Technical sciences, Professor of Electrification and automation Department
 Nizhny Novgorod state University of engineering and Economics, Knyaginino (Russia), e-mail: prosviryakova.maryana@yandex.ru
 Zaitsev Peter Vladimirovich – Doctor of Technical sciences, Professor, Mechanization, electrification and automation Department, e-mail: zaycevp@yandex.ru
 Kirillov Nikolai Kirillovich – Doctor of Veterinary sciences, Professor
 Chuvash state agrarian University, Cheboksary Russia