

DOI

УДК 621.365

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЖИРА ИЗ ЖИРОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ НАГРЕВОМ****М.В. Просвирякова, А.А. Тихонов, Б.Г. Зиганшин, О.В. Михайлова, Г.В. Новикова**

**Реферат.** В статье обоснованы эффективные режимы термообработки жиродержащего сырья в радиогерметичной сверхвысокочастотной установке с металлодиэлектрическим резонатором. Сырье для исследования - внутренний жир КРС, овец, кур; их диэлектрические характеристики систематизированы по данным И.А. Рогова.

Целью настоящей работы является разработка СВЧ установки непрерывно-поточного действия с магнетронами воздушного охлаждения и резонатором в виде усеченного конуса с экспоненциальной образующей, способствующей повышению термического КПД и сохранению высокой напряженности электрического поля и радиогерметичности без экранирующего корпуса при вытопке обеззараженного жира из жиродержащего сырья. Проанализированы электрофизические параметры жиродержащего сырья, в том числе изменение диэлектрических параметров от частоты электромагнитного поля (ЭМП), жирности, плотности. Согласована напряженность электрического поля со скоростью нагрева, удельной мощностью генератора. Разработана СВЧ установка непрерывно-поточного действия с резонатором в виде усеченного конуса с экспоненциальной образующей из неферромагнитного материала и керамическим вогнутым зеркальным основанием, внутри которого расположен диэлектрический шнек с уменьшающимся шагом и диаметром витка. На большое основание резонатора соосно установлено вогнутое керамическое зеркало. Вдоль резонатора вписан диэлектрический винтовой шнек. На резонаторе установлены два шлюзовых затвора, имеющие неферромагнитные согнутые лопасти. Вытопленный жир стекает через перфорацию на поверхности резонатора. Магнетроны с волноводами установлены со сдвигом на 120 градусов по периметру основания резонатора. Проанализированы общие свойства резонатора с диэлектрическими включениями (керамическое зеркало, фторопластовый шнек). В таком металлодиэлектрическом резонаторе может сочетаться отражение поля от неферромагнитных стенок резонатора и критических сечений с полным внутренним отражением в диэлектрике.

Экспоненциальная образующая резонатора и керамическое зеркало способствуют повышению концентрации напряженности электрического поля в нем до 2 кВ/см при размещении трех магнетронов со сдвигом на 120 градусов по периметру большого основания. При удельной мощности генератора 2 Вт/г производительность СВЧ установки для термообработки жиродержащего сырья составляет 18-20 кг/ч.; при частоте вращения электропривода шнека 1 об/мин, за 120 с 0,5-0,6 кг сырья вытапливается. Удельные энергетические затраты по сравнению с прототипом (0,2-0,25 кВт·ч/кг) снижаются до 0,14-0,15 кВт·ч/кг.

**Ключевые слова:** вытопка жира, резонатор с экспоненциальной образующей, электрофизические характеристики, динамика нагрева, мощность диэлектрических потерь.

**Введение.** На агропредприятиях в цехах по переработке продукции животноводства осуществляют убой животных и птиц, а из продуктов убоя производят продукты питания, в том числе из жиродержащего сырья (мышечного, внутреннего жира КРС, овец, свиней, кур и т.п.) вытапливают жир.

Термообработку жиродержащего сырья применяют для вытопки жира. Для извлечения жира из жиродержащего сырья используют конвективный и кондуктивный методы подвода теплоты. Конвективный нагрев происходит при контакте сырья с острым паром, при кондуктивном – теплота подводится через стенку от глухого пара. Чтобы извлечь жир из жиродержащей ткани, необходимо разрушить белковую структуру, содержащую жир, перевести его из внутриклеточной фазы во внеклеточную, свободную фазу и затем удалить во внешнюю среду [1, 2, 3]. Применяют: автоклавы, вакуумные котлы (периодического действия); шнековые, барабанные, роторные аппараты (непрерывного действия). Имеются комбинированные аппараты, совмещающие термообработку и измельчение сырья.

В аппаратах периодического действия процесс термообработки сырья составляет 4-4,5 часа, следовательно, ухудшается качество жира и шквары. При обработке жиродержащего сырья превышение температуры 120-130°C нежелательно, так как ухудшается качество конечной продукции. Наиболее эффективный способ интенсификации теплообмена – это использование энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) для воздействия на измельченное сырье. Известно, что при измельчении увеличивается поверхность теплообмена. Допустимые размеры измельченных частиц определяются технологическими требованиями к процессу (2,5-3 см), и согласовываются с глубиной проникновения волны. Измельчение сырья необходимо провести до задачи в рабочую камеру.

Существуют СВЧ установки для вытопки жира, разного конструкционного исполнения с цилиндрическими, сферическими и другими резонаторами периодического и непрерывного режима работы. Все они содержат экранирующий корпус, тем не менее мощность потока излучений достигает до 250-300 мкВт/см<sup>2</sup>, а

предельно допустимый уровень (ПДУ) всего 10 мкВт/см<sup>2</sup> [4,5,6].

Аналогом является СВЧ установка с квазистационарным тороидальным резонатором для вытопки обеззараженного жира из измельченного жиросодержащего сырья в непрерывном режиме [7]. Недостатками являются: сложность дозирования подачи сырья и выгрузки шквары; отсутствие возможности регулировки скорости нагрева сырья при отделении жира от шквары.

Прототипом является СВЧ установка с передвижными полусферическими резонаторами, расположенными на венце внутри цилиндрического экранирующего корпуса [8]. Недостатками являются: достаточно высокие энергетические затраты – 0,2-0,25 кВт·ч/кг; наличие экранирующего корпуса, влияющего на увеличение балансовой стоимости установки, а следовательно, эксплуатационные затраты; низкий термический КПД установки; напряженность электрического поля в сферическом резонаторе можно регулировать только изменением мощности генератора [9].

Поэтому разработка радиогерметичной СВЧ установки непрерывно-поточного действия для термообработки и обеззараживания жиросодержащего сырья при низких эксплуатационных затратах и высоком термическом коэффициенте полезного действия с регулируемой напряженностью электрического поля в процессе вытопки жира остается актуальной.

Целью работы является разработка СВЧ установки непрерывно-поточного действия с магнетронами воздушного охлаждения и резонатором в виде усеченного конуса с экспоненциальной образующей, способствующей повышению термического КПД и сохранению высокой напряженности электрического поля и радиогерметичности без экранирующего корпуса при вытопке обеззараженного жира из жиросодержащего сырья.

Объемные неферромагнитные резонаторы

с фокусирующими металлическими зеркалами нашли применение в технике измерения диэлектрических параметров материалов, поверхностного сопротивления проводников и других электрических величин [10,11,12].

**Условия, материалы и методы.** В исследованиях использованы методы электродинамики сверхвысокой частоты, приближенные методы определения собственной добротности металлодиэлектрического резонатора.

Экспериментальные методы исследования основаны на измерениях характеристик резонатора с использованием прибора ПЗ-33М. Перспективным диэлектриком для металлодиэлектрического высокодобротного резонатора сантиметрового диапазона являются монокристаллический кварц, сапфир и керамика, так как их резонансная частота менее зависима от температуры.

**Анализ и обсуждение результатов.** В резонаторе одновременно обрабатывается разное жиросодержащее сырье, при существенном отличии его диэлектрических характеристик, теплоемкости, глубины проникновения электромагнитного поля в сырье и в скорости нагрева. Поэтому необходимо учитывать фактор потерь и глубину проникновения волны в отдельные компоненты сырья, а также их зависимость от температуры, ведь с изменением температуры изменяется и глубина проникновения, а также удельная мощность источников тепла. По данным И.А Рогова [13] проанализированы диэлектрические параметры жировой ткани крупного рогатого скота, овец и кур в зависимости от частоты электромагнитного поля, при температуре 20 оС (рис. 1). Сравнение диэлектрических параметров соответствующих видов животных показывает, что изменения связаны с влажностью их жировой ткани и их плотностью. Влажность ткани: КРС 14,2 %, овец – 11,6 %, кур – 8,6 %; плотность сырья КРС 900 кг/м<sup>3</sup>; овец – 890 кг/м<sup>3</sup>; кур – 870 кг/м<sup>3</sup> [14, 15, 16].

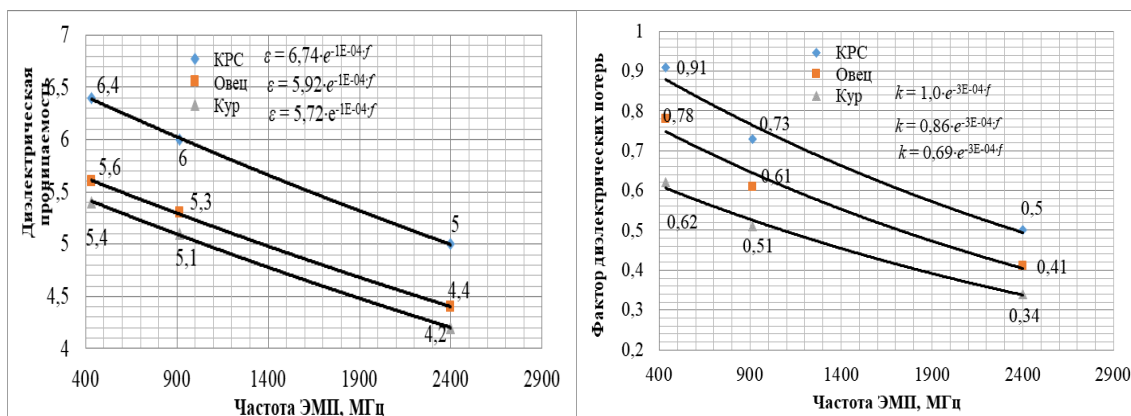


Рис. 1 – Диэлектрические характеристики жировой ткани КРС, овец, кур в зависимости от частоты ЭМП: а) диэлектрическая проницаемость; б) фактор диэлектрических потерь

Эмпирические выражения, описывающие изменения диэлектрической проницаемости (ε), фактора диэлектрических потерь (k) жировой ткани разных видов животных от

частоты ЭМП (f, МГц):

$$\begin{aligned} \epsilon &= 6,74 \cdot e^{-1E-04 \cdot f} \text{ (КРС)} \\ \epsilon &= 5,92 \cdot e^{-1E-04 \cdot f} \text{ (овец)} \\ \epsilon &= 5,72 \cdot e^{-1E-04 \cdot f} \text{ (кур)} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} k &= 1,0 \cdot e^{-3E-04 \cdot f} \text{ (КРС)} \\ k &= 0,86 \cdot e^{-3E-04 \cdot f} \text{ (овец)} \\ k &= 0,69 \cdot e^{-3E-04 \cdot f} \text{ (кур)} \end{aligned} \quad (2)$$

Графики, характеризующие изменение характеристик жировой ткани КРС в зависимости от жирности приведены на рис. 2.

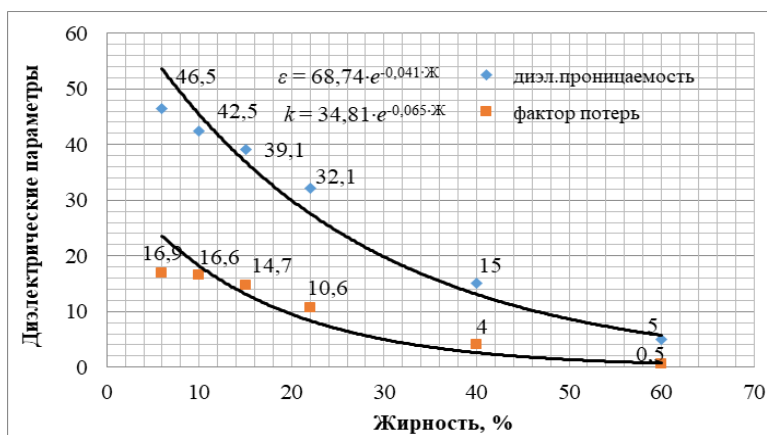


Рис. 2 – Диэлектрические характеристики жировой ткани КРС в зависимости от жирности при температуре 20 °С

Изменение диэлектрических характеристик сырья при различной его жирности объясняется снижением влажности, изменением плотности сырья. Диэлектрическая проницаемость и фактор диэлектрических потерь с увеличением жирности сырья изменяются

по экспоненциальной зависимости (3) [17, 18]. Эмпирическое выражение, описывающее изменения диэлектрической проницаемости (ε) и фактора диэлектрических потерь (k) от жирности (Ж):

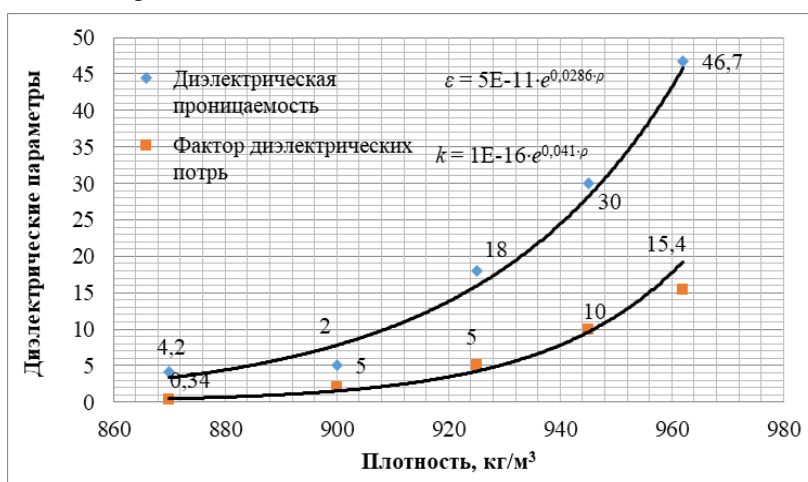
$$\varepsilon = 68,74 \cdot e^{-0,041 \cdot Ж}, k = 34,81 \cdot e^{-0,065 \cdot Ж}. \quad (3)$$


Рис. 3 – Диэлектрические характеристики жировой ткани КРС в зависимости от жирности при температуре 20 °С

Эмпирическое выражение, описывающее изменения диэлектрической проницаемости (ε) и фактора диэлектрических потерь (k) от плотности сырья (ρ, кг/м³):

$$\varepsilon = 5E-11 \cdot e^{0,0286 \cdot \rho}, k = 1E-16 \cdot e^{0,041 \cdot \rho} \quad (4)$$

Для достижения равномерного нагрева жиросодержащего сырья необходимо согласовать шаг винта шнека с глубиной проникновения волны в сырье. Глубину проникновения волны в сырье определяем по формуле [19]:

$$\Delta = 2 \cdot c / \omega \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta}, \quad (5)$$

где c – скорость распространения света в вакууме; ω = 2π · f – частота ЭМП.

В процессе воздействия ЭМП СВЧ вытопленный жир отделяется от сырья и при этом

жирность сырьевой ткани уменьшается, следовательно, диэлектрические параметры увеличиваются (рис. 2) в соответствии с выражениями (3). Изменение тангенса угла диэлектрических потерь описывается выражением:

$$\operatorname{tg} \delta = 34,81 \cdot e^{-0,065 \cdot Ж} / 68,74 \cdot e^{-0,041 \cdot Ж} = 0,51 \cdot e^{-0,024 \cdot Ж} \quad (6)$$

Глубина проникновения ЭМП в сырье:

$$\Delta = 2 \cdot 3 \cdot 10^8 / 2 \cdot \pi \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{68,74 \cdot e^{-0,041 \cdot Ж} \cdot 0,51 \cdot e^{-0,024 \cdot Ж}} = \frac{6 \cdot 10^8}{15386 \cdot 10^6 \cdot 4,23 \cdot \sqrt{e^{-0,041 \cdot Ж} \cdot e^{-0,024 \cdot Ж}}} = 0,922 \cdot e^{-0,0445 \cdot Ж}, \text{ м} \quad (7)$$

$$\Delta = 0,922 \cdot e^{-0,0445 \cdot Ж}, \text{ м}. \quad (8)$$

При начальной жирности сырья 60 % глубина проникновения ЭМП составляет 6,3 см:

$$\Delta = 0,922 \cdot e^{-0,0445 \cdot 60} = 0,063 \text{ м} = 6,3 \text{ см.} \quad (9)$$

Эти значения достаточной достоверной вероятностью совпадают со значениями Рогова И.А [6].

В процессе вытопки жира изменяется глубина проникновения волны в сырье, следовательно, при транспортировке сырья через резонатор диэлектрическим винтовым шнеком, шаг винта должен быть не более 6,3 см для достижения его равномерного нагрева. При теоретическом определении производительности шнека (8), в формуле следует предусмотреть начальный шаг винта равный глубине проникновения, далее его уменьшить в соответствии с изменением жирности по экспоненциальной зависимости (рис. 3).

Тогда производительность шнека [20]:

$$Q = 0,785 \cdot (D^2 - d^2) \cdot \Delta \cdot \rho \cdot \psi \cdot n \cdot 60, \text{ кг/ч,} \quad (10)$$

где  $D$  – наружный диаметр витка, м;  $d$  – диаметр вала, м;  $\Delta$  – глубина проникновения волны (учитывающий шаг между витками), м;  $\rho$  – объемная масса жиросодержащего сырья, кг/м<sup>3</sup>;  $\psi$  – коэффициент заполнения шнека (0,4),  $n$  – частота вращения вала, мин<sup>-1</sup>.

Если длина резонатора в виде усеченного конуса 61,2 см, диаметр первого витка 20 см, а последнего витка 5 см (среднее значение диаметра витка 12,5 см), диаметр фторопластового вала 3 см, то при начальной плотности жиросодержащего сырья, равной 870 кг/м<sup>3</sup>, можно приблизительно вычислить производительность шнека:

$$Q = 0,785 \cdot (0,125^2 - 0,03^2) \cdot 0,063 \cdot 870 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 60 = 19 \text{ кг/ч.}$$

В среднем производительность шнека составляет 19-20 кг/ч, при частоте вращения электродвигателя 1 об/мин.

Линейная скорость передвижения сырья 0,625 см/с, продолжительность нахождения сырья в резонаторе 100 – 120 с, тогда в резонаторе будет 0,5-0,6 кг жиросодержащего сырья.

Вытопку жира проводят при температуре 110-120 оС, а значит, в резонаторе необходимо обеспечить удельную мощность генератора 4 Вт/г. Это возможно при работе трех генераторов по 800 Вт. (2400 Вт/600 г = 4 Вт/г).

Проведены экспериментальные исследования динамики эндогенного нагрева жиросодержащего сырья, с помощью тепловизора «FLIRi3», при мощности генератора 4 Вт/г (рис. 4).



Рис. 4 – Динамика нагрева жиросодержащего сырья при удельной мощности генератора 5 Вт/г

Исследования показывают, что жиросодержащее сырье в процессе воздействия ЭМП СВЧ в течение 2 мин при удельной мощности 4 Вт/г растопится, при этом средняя температура сырья составит 100-120 оС. Уравнения, описывающие эти зависимости:  $T = 11,02 \cdot \tau^{0,463}$  (куриный жир),  $T = 16,11 \cdot \tau^{0,421}$  (свиной жир).

Для определения количества теплоты, выделяемой в единице объема сырья, необходимо рассчитать удельные диэлектрические потери, они зависят от параметров электрического поля, а именно от частоты ( $f = 2450 \cdot 10^6$  Гц) и напряженности ( $E$ , В/см), а также от фактора диэлектрических потерь сырья ( $k$ ) (формула 11). Удельную мощность можно определить также через необходимую скорость нагрева сырья ( $\Delta T / \Delta \tau$ ), зная

термический КПД ( $\eta = 0,76$ ), его теплофизические параметры (формула 12) [21]

$$P_{\text{yo}} = 8,85 \cdot 10^{-14} (\Phi / \text{см}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^6 \cdot k \cdot E^2 \cdot 10^{-4} (B / \text{см})^2 = 1362,2 \cdot 10^{-10} \cdot k \cdot E^2, (Bm / \text{см}^3); \quad (11)$$

$$P_{\text{yo}} = \frac{1}{\eta} \cdot \rho \cdot C \cdot \frac{\Delta T}{\Delta \tau} = 1,32 \cdot \rho \cdot C \cdot \frac{\Delta T}{\Delta \tau}, Bm / \text{см}^3. \quad (12)$$

Из уравнений 11 и 12 получим выражение, позволяющее согласовать скорость нагрева сырья с напряженностью электрического поля:

$$1362,2 \cdot 10^{-10} \cdot k \cdot E^2 = 1,32 \cdot \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \cdot \rho \cdot C. \quad (13)$$

При напряженности ЭП равной 2000 В/см и содержании жира 60% ( $k = 4$ ), скорость

нагрева составит  $0,72^\circ\text{C}/\text{с}$ :

$$1362,2 \cdot 10^{-10} \cdot 4 \cdot E^2 = 1,32 \cdot \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \cdot 0,87 \cdot 2,6; \quad (14)$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \frac{0,545 \cdot 10^{-6}}{2,99} \cdot E^2; \quad \frac{\Delta T}{\Delta \tau} = 0,18 \cdot 10^{-6} \cdot 2000^2 = 0,72^\circ\text{C}/\text{с}. \quad (15)$$

Если начальная температура сырья  $20^\circ\text{C}$ , приращение температуры на  $90^\circ\text{C}$  достигается за 120 с, т.е. жиродержащее сырье растопится при температуре  $115^\circ\text{C}$ . Удельная мощность генератора составит:

$$P_{\text{ю}} = 1362,2 \cdot 10^{-10} \cdot k \cdot E^2 = 1362,2 \cdot 10^{-10} \cdot 4 \cdot 2000^2 = 2,17(\text{Вт}/\text{см}^3). \quad (16)$$

В случае обеспечения напряженности электрического поля в резонаторе 2 кВ/см, при удельной мощности генератора 2,17 Вт/г, производительность установки составит 18 кг/ч.

Известно, что удельные энергетические затраты не зависят от способа подвода энергии. Продолжительность достижения необходимых температур в массе сырья определяется характеристиками процесса: видом подвода энергии, интенсивностью переноса теплоты и массы, соотношением объема, площади поверхности и определяющего размера сырья и его физических свойств. Удельные энергетические затраты (Вт·с/кг), необходимые для переработки жиродержащего сырья складываются из затрат на нагрев, плавление жира, денатурацию белка, испарение влаги и окончательный нагрев [22]:

$$\Delta = c_n \cdot (T_{\text{пл}} - T_n) + b_{\text{ж}} \cdot r_{\text{ж}} + c_k \cdot (T_k - T_{\text{пл}}) + a \cdot (T_k - T_n) + b_g \cdot r_g, \quad (17)$$

где  $c_n, c_k$  – теплоемкость сырья до и после плавления жира, Дж/кг·°C;  $T_n, T_{\text{пл}}, T_k$  – температура сырья начальная, плавления жира, конечная, °C;  $b_{\text{ж}}$  – массовая доля жира в сырье, кг/кг;  $r_{\text{ж}}$  – скрытая теплота плавления жира, Дж/кг;  $a$  – энергия, идущая на денатурацию белка при изменении его температуры на  $1^\circ\text{C}$ , Дж/кг·°C;  $b_g$  – массовая доля испарившейся воды, кг/кг;  $r_g$  – скрытая теплота испарения воды, Дж/кг;  $a = (840-1260)$  Дж/кг·°C для мясных белков; теплоемкость жира до плавления  $c_n = 1300-3000$  Дж/кг·°C; теплоемкость жира после плавления  $c_k = 2600$  Дж/кг·°C; скрытая теплота плавления жира;  $r_{\text{ж}} = 121000-151000$  Дж/кг; скрытая теплота испарения воды  $r_g = (2480-2,27 \cdot T_v) \cdot 103$  Дж/кг;  $T_v$  – температура испарения воды, °C.

Для интенсификации процесса теплообмена можно измельчить жиродержащее сырье при постоянной его массе. При диэлектрическом нагреве эффективнее использовать измельченное сырье, согласовывая размер частицы с глубиной проникновения сантиметровых волн.

С учетом полученных теоретических расчетов разработана СВЧ установка непрерывно-поточного действия с металлодиэлектрическим резонатором оригинальной конструкции,

обеспечивающей высокую напряженность электрического поля и радиогерметичность без экранирующего корпуса. СВЧ установка для термообработки жиродержащего сырья (рис. 5) выполнена в виде горизонтально расположенного усеченного конуса с экспоненциальной образующей из неферромагнитного материала (алюминия, меди и т.п.). Усеченный конус выполняет функцию объемного резонатора 2. На его большое основание 11 установлено вогнутое керамическое зеркало 10, диаметром равным диаметру основания. Внутри резонатора 2 размещен диэлектрический шнек 3 на диэлектрическом валу, соединенный с электроприводом 12. Шаг витка шнека уменьшается в сторону малого основания резонатора. Диаметр витка шнека уменьшается также как экспоненциальная образующая усеченного конуса 2. Сверху на боковой поверхности резонатора, около основания имеется окно с заслонкой 13. Над этим окном установлен верхний шлюзовой затвор 1 с электроприводом 14. К шлюзовому затвору 1 пристыкована загрузочная емкость 15. Отсеки шлюзовых затворов 1, 4 образованы между неферромагнитными согнутыми лопастями. Снизу на боковой поверхности резонатора, около малого основания резонатора имеется окно 5, к которому пристыкован нижний шлюзовой затвор 4 с электроприводом 6, а у большого основания резонатора часть боковой поверхности перфорирована 8, под перфорацией установлена приемная емкость 9. Магнетроны воздушного охлаждения с волноводами 7 установлены со сдвигом на  $120$  градусов по периметру боковой поверхности резонатора так, что излучатели направлены через волноводы в резонатор 2. Диаметр большого основания резонаторов и его длины кратны половине длины волны (длина волны  $12,24$  см, частота электромагнитного поля  $2450$  МГц). Технологический процесс происходит следующим образом. Загрузить измельченное жиродержащее сырье в емкость 15 над шлюзовым затвором 1. Включить электропривод 5 шлюзового затвора 4, включить электропривод 12 винтового шнека 3, открыть заслонку 13, включить электропривод 14 шлюзового затвора 1. После того как измельченное жиродержащее сырье через шлюзовой затвор 1 начнет дозированно поступать в резонатор 2 и перемещаться диэлектрическим шнеком 3, включить СВЧ генераторы 7. Шлюзовые затворы 1, 4 обеспечивают дозированную подачу сырья в резонатор 2 и выгрузку шквары из резонатора, соответственно. В ЭМПСВЧ жиродержащее сырье является гетерогенной средой, а следовательно, при частоте  $2450$  МГц характерна дипольная поляризация. Энергия, затрачиваемая на поляризацию сырья, генерируется в виде тепла. Нагрев жиродержащего сырья происходит достаточно интенсивно. Поэтому в сырье, нагретом выше  $90^\circ\text{C}$ , возникает градиент давления, этому способствует диффузия скольжения.

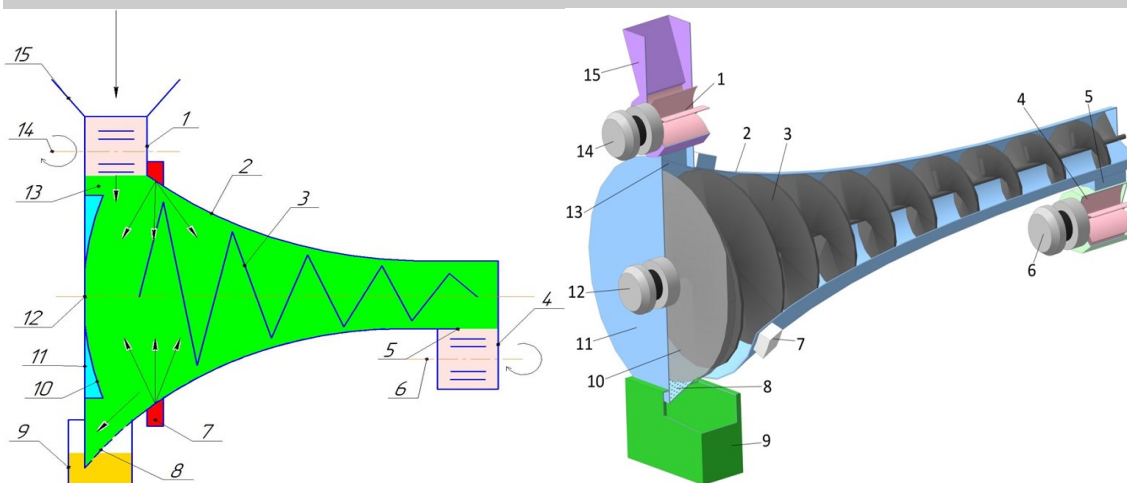


Рис. 5 – СВЧ установка непрерывно-поточного действия для термообработки жиросодержащего сырья: а), б) схематическое и пространственное изображения; в) диэлектрический шнек; г) керамическое зеркало; д) шлюзовой затвор; 1 – верхний шлюзовой затвор; 2 – резонатор в виде усечённого конуса с экспоненциальной образующей; 3 – винтовой диэлектрический шнек; 4 – нижний неферромагнитный шлюзовой затвор; 5 – окно с заслонкой на резонаторе; 6 – электропривод шлюзового затвора 4; 7 – магнетроны с волноводами; 8 – перфорированная часть резонатора; 9 – неферромагнитная приемная емкость; 10 – вогнутое керамическое зеркало; 11 – большое основание резонатора; 12 – электропривод шнека; 13 – окно с заслонкой на резонаторе; 14 – электропривод шлюзового затвора 1; 15 – загрузочная емкость

Следовательно, плавленный жир отделяется от шквары, стекает по внутренней экспоненциальной боковой поверхности резонатора и через перфорацию 8 стекает в приемную емкость 8, а шквара передвигается витками шнека 3 до шлюзового затвора 4 и порционно выгружается в другую емкость. Качество готовой продукции (жира и шквары) зависит от совместного действия факторов: максимальной температуры, продолжительности воздействия ЭМП СВЧ, напряженности электрического поля. Наименьшая продолжительность обработки определяется продолжительностью плавления и напряженностью электрического поля, при которой происходит уничтожение патогенной микрофлоры при данной температуре процесса. Равномерность нагрева сырья обеспечивается также за счет того, что шаг витка шнека меньше, чем две глубины проникновения волны в сырье (3- 6 см). Вогнутое зеркало из керамики, в котором отражающая поверхность и центр кривизны падает на одну и ту же сторону зеркала, обладает оптической системой формирования падающих и отраженных волн. Использование керамического вогнутого зеркала 10, расположенного на большом основании 11 как часть резонатора 2 позволяет поддерживать свободные электромагнитные колебания разных видов, удовлетворяющие условиям границы раздела (сырье-воздух), т.е. условиям полного внутреннего отражения (малые радиационные потери) при диэлектрической проницаемости жиросодержащего сырья (4-5, жир КРС, свиней, овец, кур). Керамика обладает малыми тепловыми потерями, так как тангенс угла диэлектрических потерь всего 0,003, следовательно, собственная добротность резонатора выше, чем без керамического диска. При

размерах диска значительно превышающих длину волны, собственная добротность резонатора может достигать до 10000. Концентрация энергии электромагнитного поля в объеме резонатора и уменьшение потерь на излучение достигается благодаря применению вогнутого керамического зеркала 10. Особенностью резонатора, содержащего керамический диск, является многомодовость, это значит, что равномерность нагрева сырья обеспечивается и отраженные от керамического зеркала волны полностью концентрируются в сырье. Радиогерметичность обеспечивается за счет неферромагнитных дугообразных лопастей шлюзовых затворов 1, 4. Неферромагнитные дугообразные лопасти перекрывают электромагнитное излучение в процессе непрерывного режима работы установки, а через отверстия в перфорированной части 8 поверхности резонатора излучение ограничивается неферромагнитной приемной емкостью 9. Известно, что в коническом резонаторе вырождение типов колебаний H011 и E111 (паразитные типы колебаний) устраняется [23]. Конический резонатор с экспоненциальной образующей и вогнутое керамическое зеркало повышает концентрацию энергии электромагнитных волн в сырье, происходит полное поглощение энергии сырьем. Система генератор-резонатор идеально будет согласована с нагрузкой, так как волны отраженные от вогнутой поверхности керамического зеркала полностью концентрируются на сырье, если резонатор имеет криволинейную поверхность. Поэтому усеченный конический резонатор имеет экспоненциальную образующую, т.е. криволинейную поверхность. Взаимосвязь диаметра (D, см) и длины резонатора (H, см) описывается уравнением тренда (рис. 6)



Рис. 6 – График, характеризующий экспоненциальную образующую резонатора

$$D = 28,428 \cdot e^{-0,025 \cdot H} \quad (18)$$

Отношение энергии, запасенной в резонаторе и умноженное на  $2 \cdot \pi$ , к мощности потерь в нем, за один период колебаний, характеризуется добротностью резонатора [8]:

$$Q = \frac{\omega_{рез} \cdot W}{P_{потерь}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{рез} \cdot \frac{W}{P_{потерь}}, \quad (19)$$

где  $\omega_{рез}$  – угловая резонансная частота, 1/с;  $f_{рез}$  – резонансная частота колебаний волн, Гц;  $W$  – энергия, накопленная (запасенная) в резонаторе, Вт·ч;  $P_{потерь}$  – мощность потерь в резонаторе, Вт.

Собственную добротность резонатора в виде усеченного конуса с экспоненциальной образующей определяли через объем ( $V$ ) и площадь поверхности ( $S$ ) с учетом  $\Delta$  – толщины поверхностного слоя из алюминия,  $1,72 \cdot 10^{-3}$  см, по формуле:

$$Q = 2 \cdot \frac{V}{S \cdot \Delta} \quad (20)$$

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot (R^2 - R \cdot r + r^2) \cdot H, \quad S = \pi \cdot [R^2 + r^2 + l \cdot (R + r)] R \cdot l, \quad l = \sqrt{(R - r)^2 + H^2}, \quad (21)$$

где  $R, r$  – радиус большого и малого оснований, см;  $l$  – длина образующей, см;  $H$  – длина резонатора, см.

Площадь и объем резонатора следует определить учетом экспоненциальной образующей,  $D = 28,428 \cdot e^{-0,025 \cdot H}$  или через радиус основания:  $R = 14,214 \cdot e^{-0,025 \cdot H}$ . Тогда собственная добротность резонатора определяется по формуле 19:

$$Q = \frac{2 \cdot (R^2 - R \cdot r + r^2) \cdot H}{3 \cdot [R^2 + r^2 + l \cdot (R + r)] R \cdot l \cdot 1,72 \cdot 10^{-3}} = \frac{0,388 \cdot 10^3 \cdot [(14,214 \cdot e^{-0,025 \cdot H})^2 - (14,214 \cdot e^{-0,025 \cdot H} \cdot r) + r^2] \cdot H}{[(14,214 \cdot e^{-0,025 \cdot H})^2 + r^2 + l \cdot (14,214 \cdot e^{-0,025 \cdot H} + r)] R \cdot l}$$

Таблица 1 – Технические характеристики СВЧ установки

Наименование	Значение
Производительность, кг/ч	18-20
Мощность 3 генераторов, кВт	2,4
Мощность мотора-редуктора, кВт	0,15
Мощность вентилятора для охлаждения магнетронов, кВт	0,2
Потребляемая мощность СВЧ установки, кВт	2,75
Удельные энергетические затраты, кВт·ч/кг	0,14-0,15

Расчеты показывают, что собственная добротность резонатора при размерах  $D = 24,48$  см,  $d = 6,12$  см,  $H = 61,2$  см находится в пределах 6000.

Технические характеристики разрабатываемой СВЧ установки для термообработки жиродержащего сырья приведены в табл. 1.

**Вывод.** Разработана СВЧ установка непрерывно-поточного действия с резонатором в виде усеченного конуса с экспоненциальной образующей из ферромагнитного материала и керамическим вогнутым зеркальным основанием, внутри которого расположен диэлектрический шнек с уменьшающимся шагом и диаметром витка.

Экспоненциальная образующая резонатора и керамическое зеркало способствуют повышению концентрации напряженности электрического поля в нем до 2 кВ/см при размещении трех магнетронов со сдвигом на 120 градусов по периметру большого основания.

При удельной мощности генератора 2 Вт/г производительность СВЧ установки для термообработки жиродержащего сырья составляет 18-20 кг/ч.; при частоте вращения электропривода шнека 1 об/мин, за 120 с 0,5-0,6 кг сырья вытапливается. Удельные энергетические затраты по сравнению с прототипом (0,2-0,25 кВт·ч/кг) снижается до 0,14-0,15 кВт·ч/кг.

**Литература**

1. Ивашов В.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. Часть 1. – М.: Колос, 2001. – 552 с.

2. Кузнецов, М. Г. Переработка сельскохозяйственного сырья при производстве спирта / М. Г. Кузнецов, О. С. Семичева, Ш. М. Газетдинов // Устойчивое развитие сельского хозяйства в условиях глобальных рисков: Материалы научно-практической конференции. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2016. – С. 430-434. – EDN YQRPQNT
3. Газетдинов, М. Х. Механизмы влияния социально-экономических факторов сельских территорий на результаты аграрного производства / М. Х. Газетдинов, Ш. М. Газетдинов, О. С. Семичева // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 17. – № S2(66). – С. 119-123. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-119-123. – EDN JSLDGP.
4. Белова М.В. Разработка сверхвысокочастотных установок для термообработки сельскохозяйственного сырья: автореферат дис....доктора технических наук. 05.20.02. – М.: ВИЭСХ, 2016. – 39 с.
5. Актуальность применения биогазовых установок в России и за рубежом / Б. Г. Зиганшин, И. И. Кашапов, И. Х. Гайфуллин [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2017. – Т. 12. – № 2(44). – С. 71-74. – DOI 10.12737/article\_59ad07085075f5.79036838. – EDN TBCVLN.
6. Гайфуллин, И. Х. Малогабаритная биогазовая установка анаэробного сбраживания органических отходов / И. Х. Гайфуллин // Воспроизводство плодородия почв и продовольственная безопасность в современных условиях: Сборник трудов международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию кафедры агрохимии и почвоведения Казанского ГАУ. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2021. – С. 221-227. – EDN JHJGSK.
7. Патент № 2726565 РФ, МПК С11В1/12. СВЧ установка с квазистационарным тороидальным резонатором для вытопки обеззараженного жира из измельченного жиросодержащего сырья в непрерывном режиме / А.А. Тихонов, А.В. Казаков, Г.В. Новикова, М.В. Белова, О.В. Михайлова; заявитель и патентообладатель НГСХА (RU). № 2019122928; заявл. 16.07.2019. Бюл. № 20 от 14.07.2020. – 14 с.
8. Патент № 2591126 РФ, МПК С11В1/12. Установка для вытопки жира в электромагнитном поле сверхвысокой частоты / Селиванов И.М., Белова М.В., Белов А.А., Ершова И.Г., Михайлова О.В.; заявитель и патентообладатель АНОВО «АТУ» (RU). № 2015116255; заявл. 25.04.2015. Бюл. № 19 от 10.07.2016. – 13 с.
9. Optimization of main parameters of tractor working with soil-processing implement / A. Nurmiev, S. Khafizov, R. Khafizov, B. Ziganshin // Engineering for Rural Development : Proceedings, Jelgava. – Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2018. – P. 161-167. – DOI 10.22616/ERDev2018.17.N191. – EDN VBNCNO.
10. Зиганшин, Б. Г. Математическое моделирование и экспериментальные исследования газификации отходов птицеводства / Б. Г. Зиганшин, И. Х. Гайфуллин, Н. Н. Фахреев // Техника и технологии в животноводстве. – 2022. – № 3(47). – С. 78-84. – DOI 10.51794/27132064-2022-3-78. – EDN AGFWWX.
11. Исследование неравномерного развития четвертей вымени животных / И. И. Кашапов, Б. Г. Зиганшин, Ю. А. Цой [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 15. – № 3(59). – С. 84-87. – DOI 10.12737/2073-0462-2020-84-87. – EDN IUUUBD.
12. Кузнецов, М. Г. Генераторы акустических колебаний в сельском хозяйстве / М. Г. Кузнецов, О. С. Семичева // Развитие АПК и сельских территорий в условиях модернизации экономики: Материалы III Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.э.н., профессора Н.С. Каткова. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2021. – С. 110-112. – EDN BWRYSR.
13. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов / И.А. Рогов и др. – М.: Легкая и пищевая промышленность. 1981. – 288 с.
14. Егоров В.Н. Микроволновые диэлектрические резонаторы в физических измерениях. Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (01.04.01). Иркутск: ИРГТУ, 2014, с. 47
15. Сабиров, Р. Ф. Определение дисперсности распыливания рабочего раствора биопрепарата / Р. Ф. Сабиров, А. Р. Валиев, Ф. Ф. Мухамадьяров // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 17. – № 1(65). – С. 77-82. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-77-82. – EDN VSYUML.
16. Теоретическое обоснование оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания по величине суммарной ЭДС в парах трения / И. Р. Салахутдинов, А. А. Глущенко, Д. Е. Молочников [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 16. – № 1(61). – С. 90-95.
17. Использование удобрений из куриного помета для выращивания органической продукции / А. С. Ганиев, Ф. С. Сибатуллин [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 17. – № 1(65). – С. 9-14. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-9-14. – EDN BAGTXU.
18. Results of Practical Use of Fertilizers from Chicken Manure in Winter Wheat Cultivation / F. S. Sibagatullin, Z. M. Khaliullina, R. R. Minnikhanov [et al.] // International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2021) : Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources. – Kazan: EDP Sciences, 2021. – P. 00048. – DOI 10.1051/bioconf/20213700048. – EDN GEOCLP.
19. Гинзбург А.С. Расчет проектирование сушильных установок пищевой промышленности. – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.
20. Файзрахманов, Д. И. Инновационная модель эффективного взаимодействия государственных образовательных учреждений и частного бизнеса внутри отраслевых кластеров / Д. И. Файзрахманов, А. Р. Валиев, Б. Г. Зиганшин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2009. – Т. 4. – № 4(14). – С. 93-96. – EDN KXTZDT.
21. Панков, А. О. Преимущества Agile - подхода при разработке проектов цифровизации / А. О. Панков, О. С. Семичева, И. М. Логинова // Современная аграрная экономика: концепции и модели инновационного развития: Материалы I Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.э.н., профессора Л.М. Рабиновича, Казань. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2022. – С. 219-224.
22. Стрекалов А.В., Стрекалов Ю.А. Электромагнитные поля и воны. – М.: РИОР: ИНФРА-М, 2014. – 375 с.
23. Дробахин О.О., Заболотный П.И. Резонансные свойства аксиально-симметричных микроволновых резонаторов с коническими элементами // Радиофизика и радиоастрономия, 2009, т. 4, с. 433-441.



**Сведения об авторах:**

Просвирякова Марьяна Валентиновна - доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бродина»  
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет-МСХА имени Тимирязева», г. Москва, Россия,

Тихонов Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент  
ФГБОУ ВО «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия», г. Нижний Новгород, Россия

Зиганшин Булат Гусманович – доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», г. Казань, Россия

Михайлова Ольга Валентиновна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», Нижегородская область, г. Княгинино, Россия

Новикова Галина Владимировна – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», Нижегородская область, г. Княгинино, Россия.

**INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF EXTRACTING FAT FROM FAT-CONTAINING RAW MATERIALS BY DIELECTRIC HEATING**

**M. V. Prosviryakova, A.A. Tikhonov, B.G. Ziganshin, O. V. Mikhaylova, G. V. Novikova**

**Abstract.** The article substantiates the effective modes of heat treatment of fat-containing raw materials in a radiohermetic ultrahigh-frequency installation with a metal-dielectric resonator.

The raw material for the study was the internal fat of cattle, sheep, chickens, their dielectric characteristics were systematized according to I.A. Rogov.

The purpose of this work is to develop a continuous-flow microwave installation with air-cooled magnetrons and a resonator in the form of a truncated cone with an exponential generator, which contributes to increasing thermal efficiency and maintaining high electric field strength and radio tightness without a shielding housing when heating disinfected fat from fat-containing raw materials. The electrophysical parameters of the fat-containing raw material are analyzed, including the change in dielectric parameters from the frequency of the electromagnetic field (EMF), fat content, density. The intensity of the electric field is matched with the heating rate, the specific power of the generator. A continuous-flow microwave installation with a resonator in the form of a truncated cone with an exponential generator made of non-ferromagnetic material and a ceramic concave mirror base, inside of which a dielectric screw with a decreasing pitch and a diameter of a screw is located, has been developed. A concave ceramic mirror is installed coaxially on the large base of the resonator. A dielectric screw is inscribed along the resonator. Two sluice gates with non-magnetic bent blades are installed on the resonator. The melted fat flows down through the perforation on the surface of the resonator. Magnetrons with waveguides are installed with a shift of 120 degrees along the perimeter of the resonator base. The general properties of a resonator with dielectric inclusions (ceramic mirror, fluoro-formation auger) are analyzed. In such a metal-dielectric resonator, the reflection of the field from the non-magnetic walls of the resonator and critical sections can be combined with full internal reflection in the dielectric.

The exponential generator of the resonator and the ceramic mirror contribute to an increase in the concentration of the electric field strength in it to 2 kV/cm when placing three magnetrons with a shift of 120 degrees along the perimeter of the large base. With a specific power of the generator of 2 W/g, the productivity of the microwave installation for heat treatment of fat-containing raw materials is 18-20 kg/h.; With a frequency of rotation of the electric screw drive of 1 rpm, 0.5-0.6 kg of raw materials is heated in 120 seconds. The specific energy costs compared to the prototype (0.2-0.25 kWh/kg) is reduced to 0.14-0.15 kWh/kg.

**Key words:** fat melting, resonator with exponential generator, electrophysical characteristics, heating dynamics, dielectric loss power.

**References**

1. Ivashov VI. Tekhnologicheskoe oborudovanie predpriyatii myasnoi promyshlennosti. [Technological equipment of meat industry enterprises]. Chast' 1. Moscow: Kolos. 2001; 552 p.
2. Kuznetsov MG, Semicheva OS, Gazetdinov ShM. [Processing of agricultural raw materials in the production of alcohol]. Ustoichivoe razvitiye sel'skogo khozyaistva v usloviyakh global'nykh ris-kov: Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii. Kazan': Kazanskii gosudarstvennyi agrarnyi univer-sitet. 2016; 430-434 p. – EDN YQPQNT
3. Gazetdinov MKh, Gazetdinov ShM, Semicheva OS. [Mechanisms of influence of social and economic factors of rural areas on the results of agricultural production]. Vestnik Kazansko-go gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; Vol.17. S2(66). 119-123 p. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-119-123. – EDN JSLDGP.
4. Belova MV. Razrabotka sverkhvysokochastotnykh ustanovok dlya termoobrabotki sel'skokhozyaistvennogo syr'ya: avtoreferat dis....doktora tekhnicheskikh nauk. 05.20.02. [Development of microwave installations for heat treatment of agricultural raw materials: abstract of dissertation .... doctor of technical sciences]. Moscow: VIESKh. 2016; 39 p.
5. Ziganshin BG, Kashapov II, Gayfullin IKh. [The relevance of the use of biogas plants in Russia and abroad]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017; Vol.12. 2(44). 71-74 p. – DOI 10.12737/article\_59ad07085075f5.79036838. – EDN TBCVLN.
6. Gayfullin IKh. Malogabaritnaya biogazovaya ustanovka anaerobnogo sbrzhivaniya organicheskikh otkhodov. Vosprizvodstvo plodorodiya pochv i prodovol'stvennaya bezopasnost' v sovremennykh usloviyakh: [Small-sized biogas plant for anaerobic digestion of organic waste. Soil fertility reproduction and food security in modern conditions]. Sbornik trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu kafedry agrokhimii i pochvovedeniya Kazanskogo GAU. Kazan': Kazanskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet. 2021; 221-227 p. - EDNJHJGSK.
7. Tikhonov AA, Kazakov AV, Novikova GV, Belova MV, Mikhaylova OV. [Microwave installation with a quasi-stationary toroidal resonator for melting decontaminated fat from crushed fat-containing raw materials in continuous mode]. Patent № 2726565 RF, MPK S11V1/12. Zayavitel' i patentoobladatel' NGSKhA (RU). № 2019122928; zayavl. 16.07.2019. Byul. № 20 ot 14.07.2020. - 14 p.
8. Selivanov IM, Belova MV, Belov AA, Ershova IG, Mikhaylova OV. [Installation for melting fat in an electro-

magnetic field of ultrahigh frequency]. Patent № 2591126 RF, MPK S11V1/12. Zayavitel' i patentoobladatel' ANOVO "ATU" (RU). № 2015116255; zayavl. 25.04.2015. Byul. № 19 ot 10.07.2016. - 13 p.

9. Nurmiev A, Khafizov C, Khafizov R, Ziganshin B. Optimization of main parameters of tractor working with soil-processing implement. Engineering for rural development: proceedings. Jelgava. Latvia University of Agriculture. 2018; 161-167 p. – DOI 10.22616/ERDev2018.17.N191. – EDN VBNCNO.

10. Ziganshin BG, Gayfullin IKh, Fakhreev NN. [Mathematical modeling and experimental studies of poultry waste gasification]. Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve. 2022; 3(47). 78-84 p. – DOI 10.51794/27132064-2022-3-78. – EDN AGFWWX.

11. Kashapov II, Ziganshin BG, Tsoi YuA. [Study of the uneven development of animal udder quarters]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020; Vol.15. 3(59). 84-87 p. – DOI 10.12737/2073-0462-2020-84-87. – EDN IUUUBD.

12. Kuznetsov MG, Semicheva OS. [Generators of acoustic oscillations in agriculture. Development of the agro-industrial complex and rural areas in the conditions of economic modernization]. Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati d.e.n., professora N.S. Katkova. Kazan': Kazanskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet. 2021; 110-112 p. – EDN BWRYSR.

13. 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.

14. Egorov VN. Mikrovolnovye dielektricheskie rezonatory v fizicheskikh izmereniyakh. Avtoreferat dis. na soiskanie uchenoi stepeni doktora fiziko-matematicheskikh nauk (01.04.01). [Microwave dielectric resonators in physical measurements. Abstract dis. for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences (01.04.01)]. Irkutsk: IRGTU. 2014; 47 p.

15. Sabirov RF, Valiev AR, Mukhamad'yarov FF. [Determination of the dispersity of spraying the working solution of a biological product]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; Vol.17. 1(65). 77-82 p. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-77-82. – EDN VSYUML.

16. Salakhutdinov IR, Glushchenko AA, Molochnikov DE. [Theoretical justification for assessing the technical condition of an internal combustion engine by the magnitude of the total EMF in friction pairs]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 1(61). 90-95 p.

17. Ganiev AS, Sibagatullin FS. [The use of fertilizers from chicken manure for growing organic products]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; Vol.17. 1(65). 9-14 p. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-9-14. – EDN BAGTXU.

18. Sibagatullin FS, Khaliullina ZM, Minnikhanov RR. Results of practical use of fertilizers from chicken manure in winter wheat cultivation. International scientific-practical conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2021). Kazan: EDP Sciences. 2021; 00048 p. – DOI 10.1051/bioconf/20213700048. – EDN GEOCLP.

19. Ginzburg AS. Raschet proektirovaniya sushil'nykh ustanovok pishchevoi promyshlennosti. [Calculation design of drying plants for the food industry]. Moscow: Agro-promizdat. 1985; 336 p.

20. Fayzrakhmanov DI, Valiev AR, Ziganshin BG. [Innovative model of effective interaction between public educational institutions and private business within industry clusters]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2009; Vol.4. 4(14). 93-96 p.

21. Pankov AO, Semicheva OS, Loginova IM. [Advantages of the Agile approach in the digitalization projects development. Modern agrarian economy: concepts and models of innovative development]. Sovremennaya agrarnaya ekonomika: kontseptsii i modeli innovatsionnogo razvitiya: Materialy I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati d.e.n., professora L.M. Rabinovicha. Kazan': Kazanskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet. 2022; 219-224 p.

22. Strekalov AV, Strekalov YuA. Elektromagnitnye polya i vony. [Electromagnetic fields and won]. Moscow: RIOR: INFRA-M. 2014; 375 p.

23. Drobakhin OO, Zabolotnuy PI. [Resonance properties of axially symmetric microwave resonators with conical elements]. Radiofizika i radioastronomiya. 2009; Vol.4. 433-441 p.

**Authors:**

Prosviryakova Maryana Valentinovna - Doctor of Technical sciences, professor of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after academician I.F. Brodin

Russian State Agrarian University-MSHA named after Timiryazev, Moscow, Russia

Tikhonov Aleksandr Anatolevich – Ph.D. of Technical sciences, associate professor

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod, Russia

Ziganshin Bulat Gusmanovich - Doctor of Technical sciences, Professor

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia

Mikhaylova Olga Valentinovna – Doctor of Technical sciences, Professor, Department of Info-communication technologies and communication systems

Novikova Galina Vladimirovna – Doctor of Technical sciences, professor, chief researcher

Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Nizhny Novgorod Region, Knyaginino, Russia.