

УДК 621.385.6; 637.513

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2022-364-11-81-87

Е.В. Воронов¹,
О.В. Михайлова¹, ✉
М.В. Просвирыкова³,
Д.А. Семенов¹,
П.В. Зайцев²,
Г.С. Юнусов²

¹ Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Нижний Новгород, Российская Федерация

² Чувашский государственный аграрный университет, Чебоксары, Российская Федерация

³ Российского Государственного Аграрного Университета МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

✉ NovikovaGalinaV@yandex.ru

Поступила в редакцию:
30.07.2022

Одобрена после рецензирования:
29.09.2022

Принята к публикации:
27.10.2022

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2022-364-11-81-87

Evgeniy V. Voronov¹,
Olga V. Mikhailova¹, ✉
Mariyana V. Prosviryakova¹,
Dmitry A. Semenov¹,
Peter V. Zaitsev²,
Gubeidulla S. Unusov²

¹ Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

² Chuvash State Agrarian University, Cheboksary, Russian Federation

³ Russian State Agrarian University — Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation

✉ NovikovaGalinaV@yandex.ru

Received by the editorial office:
30.07.2022

Accepted in revised:
29.09.2022

Accepted for publication:
27.10.2022

Сравнительный анализ СВЧ-грануляторов, реализующих электрофизические методы при переработке вторичного сельскохозяйственного сырья

РЕЗЮМЕ

Введение. Перспективным направлением гранулирования комбинированного вторичного сырья животного и растительного происхождения является высокотемпературное формование гранул под воздействием электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ), обеспечивающего улучшение микробиологических показателей белкового корма.

Методика. Исследования базировались на теории диэлектрического нагрева и теории формования гранул из многокомпонентного сырья. Исследования электродинамических показателей системы «генератор — резонатор» и визуализация распределения электромагнитного поля в резонаторе особой конструкции проводились с использованием программы CST Microwave Studio.

Результаты. Разработаны СВЧ-грануляторы многокомпонентного сырья, содержащие разные конструктивные исполнения резонаторов — например, тороидальный, цилиндрический и эллипсоидный резонаторы. Определены электродинамические параметры указанных резонаторов и описаны технические характеристики грануляторов. Вычислена необходимая удельная теплота для обработки вторичного жиросодержащего сырья. При производительности гранулятора 200 кг/ч и удельной мощности СВЧ-генератора 1,4–2 Вт/г продолжительность воздействия ЭМП СВЧ на сырье массой 0,8–1 кг в резонаторной камере должна составлять 10–12 с. Это обеспечивает минимальные удельные энергетические затраты — 0,06 кВт·ч/кг.

Ключевые слова: отходы животного и растительного происхождения, тороидальный и эллипсоидный резонаторы, СВЧ-генераторы, нагнетательный шнек, грануляторы, электродинамические параметры

Для цитирования: Воронов Е.В., Михайлова О.В., Просвирыкова М.В., Семенов Д.А., Зайцев П.В., Юнусов Г.С. Сравнительный анализ СВЧ-грануляторов, реализующих электрофизические методы при переработке вторичного сельскохозяйственного сырья. Аграрная наука. 2022; 364 (11): 81–87. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-364-11-81-87>

© Воронов Е.В., Михайлова О.В., Просвирыкова М.В., Семенов Д.А., Зайцев П.В., Юнусов Г.С.

Comparative analysis of microwave granulators implementing electrophysical methods for processing secondary agricultural raw materials

ABSTRACT

Introduction. A promising direction for granulation of combined secondary raw materials of animal and vegetable origin is high-temperature molding of granules under the influence of an electromagnetic field of super highfrequency (SHF-EMF), which improves the microbiological parameters of protein feed.

Results. Microwave granulators of multicomponent raw materials containing different design versions of resonators have been developed — for example, toroidal, cylindrical and ellipsoidal resonators. The electrodynamic parameters of these resonators are determined and the technical characteristics of the granulators are described. The required specific heat for the processing of secondary fat-containing raw materials has been calculated. With a granulator capacity of 200 kg/h and a specific power of the microwave generator of 1.4–2 W/g, the duration of exposure to the raw material weighing 0.8–1 kg in the resonator chamber should be 10–12 s. This ensures the minimum specific energy costs of 0.06 kW·h/kg.

Key words: waste of animal and vegetable origin, toroidal and ellipsoidal resonators, microwave generators, injection auger, granulators, electrodynamic parameters

For citation: Voronov E.V., Mikhailova O.V., Prosviryakova M.V., Semenov D.A., Zaitsev P.V., Yunusov G.S. Comparative analysis of microwave granulators implementing electrophysical methods for processing secondary agricultural raw materials. Agrarian science. 2022; 364 (11): 81–87. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-364-11-81-87> (In Russian).

© Voronov E.V., Mikhailova O.V., Prosviryakova M.V., Semenov D.A., Zaitsev P.V., Yunusov G.S.

Введение / Introduction

Известно, что непищевые отходы убоя кроликов и птиц в фермерских хозяйствах утилизируют, так как при помощи имеющихся технологий и технических средств трудно достичь полного уничтожения патогенной микрофлоры. В настоящее время в хозяйствах эксплуатируются грануляторы и экструдеры для приготовления гранул из фуражного зерна, выпускаемые промышленностью [1].

Имеются экструдеры для высокотемпературного формования комбинированного сырья животного и растительного происхождения. Они предназначены для переработки зерновых отходов, отходов продуктовой сферы, шрота и жмыха в гранулированный комбикорм. В грануляторах выдавливающего типа, с формированием гранул в канале прессования кольцевой матрицы, сырье, попадая в полость между колесами-матрицами, вдавливаются зубьями в канал прессования [2]. Выдавливаемые из канала прессования гранулы диаметром 10–14 мм срезаются неподвижным ножом. Такие грануляторы не могут обеспечить высокую прочность и плотность гранул; в них не происходит обеззараживание гранул из-за короткой выдержки сырья под давлением; в матричных каналах необходимо создавать достаточно высокое давление для сдвига сжатого сырья, что существенно нагревает матрицу, происходят потери тепла в окружающую среду [3–8].

Гранулируя вторичное сырье, можно консервировать корм, уменьшить объем комбикорма, дозировать его ингредиенты, что позволит сбалансировать корм для животных, но при этом остается нерешенной проблема снижения общего микробного числа, влияющего на безопасность гранул для животных.

Поэтому разработка технологической линии производства гранулированного белкового корма с улучшенными микробиологическими показателями из непищевых отходов животного происхождения с добавлением вторичного сырья растительного происхождения остается актуальной задачей.

Перспективным направлением гранулирования комбинированного вторичного сырья животного и растительного происхождения является высокотемпературное формование гранул под воздействием электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ), обеспечивающего улучшение микробиологических показателей белкового корма. В связи с этим целью настоящей работы является разработка методологических основ для повышения эффективности технологии гранулирования вторичного сельскохозяйственного сырья сверхвысоко-частотным энергоподводом при сниженных энергетических затратах. При этом решаются задачи, связанные с разработкой и обоснованием параметров СВЧ-грануляторов для высокотемпературного формования гранул из вторичного сырья животного и растительного происхождения. Технической задачей является увеличение пропускной способности грануляторов и сокращение энергозатрат за счет избирательного диэлектрического нагрева многокомпонентного сырья.

Материалы и методы исследования /

Materials and methods

Трехмерное моделирование различных конструктивных исполнений СВЧ-грануляторов (основные рабочие органы которых смещены с объемными резонаторами СВЧ-техники и маломощными магнетронами воздушного охлаждения) выполнялось с помощью программы Компас-3D V17. Исследования электродинамических

показателей системы «генератор — резонатор», а также визуализация распределения электромагнитного поля в рабочем органе особой конструкции проводились с использованием программы CST Microwave Studio.

Результаты и обсуждение /

Results and discussion

По существующей технологии обработки вторичного сельскохозяйственного сырья (жиросодержащего и нежиросодержащего) проводят разваривание и стерилизацию при температуре до 125 °С (в течение 1 ч — жиросодержащего и 40 мин — нежиросодержащего сырья). Качество продукта зависит от комбинированного действия двух факторов: максимальной температуры и продолжительности ее воздействия, зависящей от времени плавления жира и уничтожения патогенной микрофлоры (стерилизации) [9].

Удельная теплота q (Дж/кг), необходимая для обработки вторичного сырья животного происхождения, идет на начальный нагрев, плавление жира, денатурацию белка, испарение влаги и окончательный нагрев; она определяется следующим образом:

$$q = c_1 \cdot (T_{пл} - T_H) + b_{ж} \cdot r_{ж} + c_2 \cdot (T_K - T_{пл}) + a \cdot (T_K - T_H) + b_B \cdot r_B, \quad (1)$$

где c_1 , c_2 — теплоемкость сырья до и после плавления жира, Дж/кг·°С; T_H , $T_{пл}$, T_K — температура сырья начальная, плавления жира и конечная, °С; $b_{ж}$ — массовая доля жира в сырье, кг/кг; $r_{ж}$ — скрытая теплота плавления жира, Дж/кг; a — энергия, идущая на денатурацию белка при изменении его температуры на 1 °С, Дж/кг·°С; b — массовая доля испарившейся воды, кг/кг; r_B — скрытая теплота плавления жира, Дж/кг.

Для вторичного сырья животного происхождения энергия, идущая на денатурацию белка, составляет $a = 840\text{--}1260$ Дж/кг·°С. Теплоемкость жира до плавления (c_1) равна 1300–3000 Дж/кг·°С, а после плавления (c_2) — 2600 Дж/кг·°С; скрытая теплота плавления жира $r_{ж} = 121000\text{--}151000$ Дж/кг; скрытая теплота испарения воды $r_B = (2480 - 2,27 \cdot T) \cdot 10^3$ Дж/кг; T — температура испарения воды.

Подставляя средние значения параметров сырья и температуры, мы рассчитали необходимую удельную теплоту для обработки вторичного жиросодержащего сырья:

$$q = 2000 \cdot (90 - 20) + 0,5 \cdot 136000 + 2600 \cdot (110 - 90) + 1000 \cdot (110 - 20) + 0,05 \cdot (2480 - 2,27 \cdot 100) \cdot 1000 = 462650 \text{ Дж/кг}. \quad (2)$$

В связи с тем, что удельная теплота не зависит от способа подвода энергии, можно вычислить, при какой напряженности электрического поля и за какой промежуток времени можно получить такую удельную теплоту ($462650 \text{ Вт} \cdot \text{с/кг} = 128,5 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг} = 0,1285 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^3$) при нагреве сырья в ЭМП СВЧ. Представим мощность диэлектрических потерь через диэлектрические параметры сырья (k) и электродинамические параметры системы (E , f):

$$P_{уд} = 5,55 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot k \cdot E^2 = 5,55 \cdot 10^{-11} \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 40 \cdot (20000)^2 = 21,75 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3 = 27,75 \cdot 10^5 \text{ Вт/кг}. \quad (3)$$

Проанализируем СВЧ-грануляторы с разными конструктивными исполнениями рабочих органов-резонаторов, разработанных в научной школе [5, 9–11].

1. СВЧ-гранулятор с тороидальным резонатором и дисковой матрицей

Известны тороидальные резонаторы с резко выраженным пространственным разведением электрического и магнитного полей. В конденсаторной части тороидального резонатора сосредоточена энергия электрического поля, и такой резонатор обладает достаточно большим объемом и собственной добротностью. На базе такого резонатора разработан СВЧ-гранулятор (рис. 1). Он выполнен в виде двух коаксиально расположенных цилиндров. Нижним основанием наружного цилиндра служит вращающаяся матрица из неферромагнитного материала со множеством отверстий. В зазоре, над вращающейся матрицей, установлены диэлектрические прижимные ролики с ребристой поверхностью, расположенные на оси. Во внутреннем цилиндре находятся нагнетательный шнек вращающийся нож, прижатый вплотную к решетке, которые образуют измельчающее и перемешивающее устройство. Под вращающейся матрицей установлен стационарный нож и емкость с отверстием для выгрузки гранул. Матрицей служит неферромагнитное перфорированное основание, то есть нижняя обкладка конденсатора, а через верхнюю перфорированную обкладку конденсатора с помощью нагнетательного шнека сырье попадает в рабочую зону, где с помощью СВЧ-генераторов возбуждено электромагнитное поле. Вторичное сырье подвергается термообработке и через матрицу высыпается гранулы. Изготовленный образец имеет производительность около 200 кг/ч при удельной мощности генератора 1,4–2 Вт/г и продолжительности воздействия ЭМП СВЧ на сырье 10–12 с. Это обеспечивает минимальные удельные энергетические затраты — 0,06 кВт·ч/кг.

Электродинамические параметры тороидального резонатора также обоснованы путем вычисления распределения ЭМП в нем с помощью программы CST Microwave Studio (рис. 2). Составлены формулы для определения добротности резонаторов соответствующих конструкций. Например, собственную добротность квазистационарного тороидального резонатора можно

вычислить через его площадь поверхности (S) и объем (V) с учетом толщины поверхности скин-слоя (если резонатор из алюминия, то $\Delta = 1,72 \cdot 10^{-5}$ м). Площадь поверхности перфорированного тороидального резонатора:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^{h_2} r_2 \cdot \sqrt{1 + (r_2')^2} dy + 2 \cdot \pi \cdot \int_{h_2-h_1}^{h_2} r_1 \cdot \sqrt{1 + (r_1')^2} dy + 8 \cdot \int_0^{r_2} \sqrt{r_2^2 - x^2} dx + n \cdot 2 \cdot \pi \cdot \int_0^{h_3} r_3 \cdot \sqrt{1 + (r_3')^2} dy. \quad (4)$$

Объем тороидального резонатора:

$$V = \pi \cdot \int_0^{h_2} r_2^2 \cdot dy - \pi \cdot \int_{h_2-h_1}^{h_2} r_1^2 \cdot dy + n \cdot \pi \cdot \int_0^{h_3} r_3^2 \cdot dy. \quad (5)$$

Собственная добротность перфорированного квазистационарного тороидального резонатора:

$$Q = \frac{2 \cdot k}{\Delta} \cdot \frac{\pi \cdot \int_0^{h_2} r_2^2 \cdot dy - \pi \cdot \int_{h_2-h_1}^{h_2} r_1^2 \cdot dy + n \cdot \pi \cdot \int_0^{h_3} r_3^2 \cdot dy}{2 \pi \cdot \int_0^{h_2} r_2 \cdot \sqrt{1 + (r_2')^2} \cdot dy + 2 \pi \cdot \int_{h_2-h_1}^{h_2} r_1 \cdot \sqrt{1 + (r_1')^2} \cdot dy + 8 \cdot \int_0^{r_2} \sqrt{r_2^2 - x^2} \cdot dx + n \cdot 2 \pi \cdot \int_0^{h_3} r_3 \cdot \sqrt{1 + (r_3')^2} \cdot dy} \times \quad (6)$$

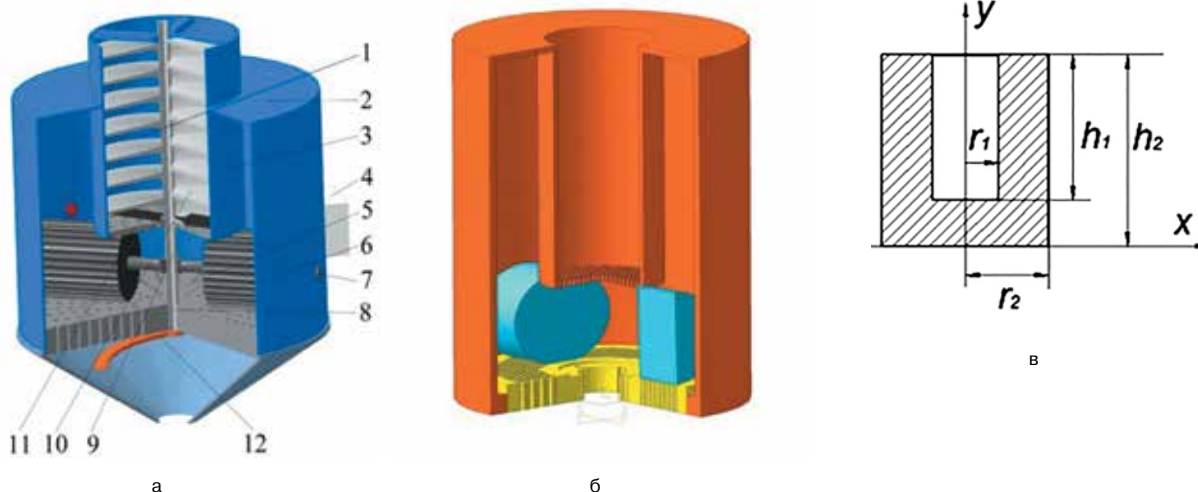
Порядок величины собственной добротности можно вычислить из соотношения:

$$Q = \frac{2}{\sqrt{1/\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu}} \cdot \frac{V}{\mu \cdot S}, \quad (7)$$

где σ — удельная проводимость стенок резонатора, Сим/м; μ — относительная магнитная проницаемость среды; μ_0 — магнитная постоянная вакуума, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; удельная проводимость меди $\sigma = 58 \cdot 10^6$ Сим/м, алюминия $35 \cdot 10^6$ Сим/м.

Рис. 1. СВЧ-гранулятор: а — пространственное изображение; б — квазистационарный тороидальный резонатор; в — схема для расчета добротности; 1 — тороидальный резонатор; 2 — наружный цилиндр; 3 — внутренний цилиндр; 4 — СВЧ-генераторы; 5 — вращающаяся матрица из неферромагнитного материала; 6 — прижимные диэлектрические ролики; 7 — оребренная поверхность; 8 — вал мотора-редуктора; 9 — вращающийся нож; 10 — нагнетательный шнек; 11 — неферромагнитная решетка; 12 — стационарный нож

Fig. 1. Microwave granulator: а — spatial image; б — quasi-stationary toroidal resonator; в — Q-factor calculation scheme; 1 — toroidal resonator; 2 — outer cylinder; 3 — inner cylinder; 4 — microwave generators; 5 — rotating matrix of non-ferromagnetic material; 6 — clamping dielectric rollers; 7 — finned surface; 8 — gear motor shaft; 9 — rotating knife; 10 — injection auger; 11 — non-ferromagnetic grid; 12 — stationary knife



Результаты расчетов собственной добротности сведены в табл. 1.

Проведены исследования электродинамических параметров квазистационарного тороидального резонатора с помощью программы CST Microwave Studio (рис. 2). Результаты исследования свидетельствуют, что напряженность электрического поля в конденсаторной части составляет 3–6 кВ/см. При такой напряженности электрического поля в процессе высокотемпературного гранулирования обеспечивается полная стерилизация вторичного сырья.

2. СВЧ-гранулятор с цилиндрическим резонатором

Установка (рис. 3) предназначена для гранулирования измельченных отходов животного и растительного происхождения в процессе диэлектрического нагрева. СВЧ-гранулятор (патент № 2703940) содержит цилиндрический экранирующий корпус с выгрузным патрубком, внутри которого соосно расположен цилиндрический резонатор, выполняющий функцию рабочей камеры. Внутри камеры между диэлектрическими плитами крепления расположены прижимные диэлектрические ролики с оребренной поверхностью с плотным прилеганием к внутренней поверхности цилиндрической матрицы, являющейся составной частью образующей цилиндрического резонатора. Нижняя диэлектрическая плита расположена на валу электропривода, куда вмонтирован узел, содержащий вертикально расположенный нож и скребок. Загрузочная емкость выполнена в виде воронки из неферромагнитного материала, внутри которой соосно расположен конусообразный экран; его основание и нижнее основание загрузочной емкости расположены таким образом, что между ними имеется кольцевое пространство зазором менее четверти длины волны. С боковой стороны цилиндрического резона-

Таблица 1. Электродинамические параметры резонатора
Table 1. Electrodynamic parameters of the resonator

Наименование	Параметры
Площадь поверхности резонатора, м ²	0,8
Объем резонатора, м ³	0,12
Собственная добротность резонатора	7000
Напряженность электрического поля в зазоре, кВ/см	2,5–3

тора со сдвигом на 120 градусов установлены излучатели от СВЧ-генераторов.

Итак, основными рабочими органами гранулятора выступают матрица, являющаяся образующей цилиндрического резонатора, прижимные ролики и СВЧ-генераторы. В процессе гранулирования многокомпонентного сырья снижается бактериальная обсемененность гранул до предельно допустимого уровня за счет высокой напряженности электрического поля, равной 1–1,5 кВ/см; при транспортировке уменьшается расслоение гранул. Гранулятор позволяет получать гранулы с разными структурно-механическими характеристиками.

Обоснованы эффективные режимы гранулирования комбинированного вторичного сырья животного и растительного происхождения: удельная мощность генератора 2–2,4 Вт/г; продолжительность высокотемпературного формирования гранул 3–5 г/с; плотность гранул 1200–1300 кг/м³; масса сырья в резонаторе 0,8–1,0 кг. Технические характеристики СВЧ-гранулятора (рис. 3) сведены в табл. 2.

Резонансная частота цилиндрического резонатора определяется по формулам:
для E_{mnl} -типа колебаний:

$$f = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{(v_{mn} / \pi \cdot a)^2 + (l / h)^2}; \tag{8}$$

Рис. 2. Электродинамические параметры квазистационарного тороидального резонатора: а — распределение напряженности электрического поля (мода 1, E-Field); б — распределение напряженности магнитной составляющей поля (мода 1, H-Field); в — распределение напряженности магнитной составляющей поля (мода 1, Surface Current)

Fig. 2. Electrodynamic parameters of a quasi-stationary toroidal resonator: а — electric field strength distribution (mode 1, E-Field); б — magnetic field component strength distribution (mode 1, H-Field); в — magnetic field strength distribution (mode 1, Surface Current)

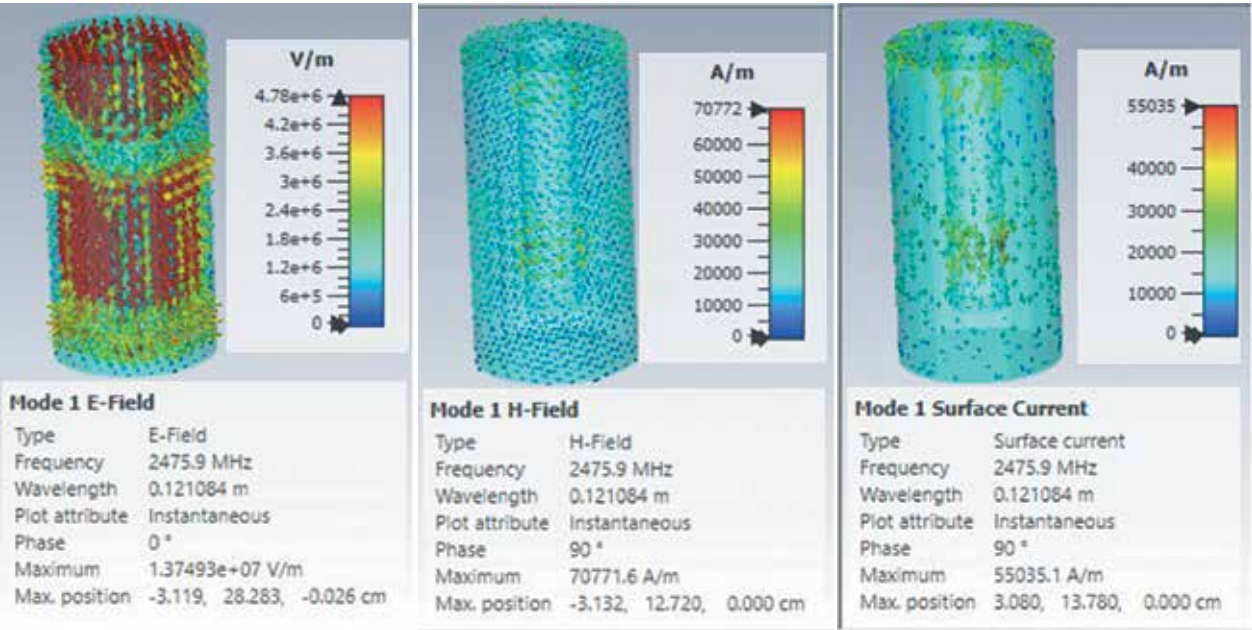
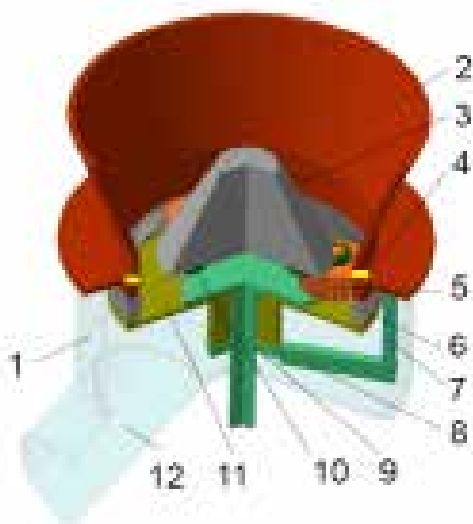


Рис. 3. СВЧ-гранулятор с цилиндрическим резонатором: 1 — экранирующий корпус; 2 — загрузочная неферромагнитная емкость; 3 — конусообразный экран; 4 — излучатели; 5 — прижимные диэлектрические ролики; 6 — неферромагнитная цилиндрическая матрица; 7 — нож; 8 — скребок; 9 — вал электропривода; 10 — верхняя и нижняя диэлектрические плиты для крепления прижимных роликов; 11 — цилиндрический резонатор; 12 — выгрузной патрубок

Fig. 3. Microwave granulator with cylindrical resonator: 1 — shielding housing; 2 — loading non-ferromagnetic container; 3 — cone-shaped screen; 4 — emitters; 5 — pressure dielectric rollers; 6 — non-ferromagnetic cylindrical matrix; 7 — knife; 8 — scraper; 9 — electric drive shaft; 10 — upper and lower dielectric plates for mounting pressure rollers; 11 — cylindrical resonator; 12 — heavy pipe



для H_{mnl} -типа колебаний:

$$f = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{(\mu_{mn} / \pi \cdot a)^2 + (l/h)^2}, \quad (9)$$

где c — скорость света, м/с; μ_{mn} — магнитная проницаемость; a , h — диаметр и высота цилиндрического резонатора;

Для колебаний индекс m соответствует числу полных периодов стоячих волн, укладывающихся по окружности резонаторов; индекс n характеризует число полупериодов по радиусу, а индекс l — по высоте резонатора.

В связи с тем, что высота цилиндрического резонатора в два раза меньше диаметра, мода H_{011} обладает особым свойством. Для такого резонатора не требуется наличие контакта между цилиндрической стенкой и основанием. Силовые линии магнитного поля направлены таким образом, что в стенках резонатора протекают токи по окружности цилиндра. Поэтому между боковой поверхностью и верхним основанием может быть кольцевое отверстие для подачи измельченного сырья в резонатор, что подавляет колебание E_{111} , так как кольцевое отверстие является препятствием для продольных токов волны E_{111} . В силу того, что l не может быть равным нулю, длина волны H_{011} зависит как от радиуса, так и от высоты цилиндрического резонатора (рис. 4).

3. СВЧ-гранулятор с эллипсоидными резонаторами и зубчатыми кольцевыми матрицами

СВЧ-гранулятор (рис. 5), патент № 2709089, предназначен для производства гранул из смеси зерноотходов и отходов животного происхождения влажностью до 25%. Он содержит эллипсоидные резонаторы 1 и зуб-

Рис. 4. Структура поля в цилиндрическом резонаторе

Fig. 4. Field structure in a cylindrical resonator

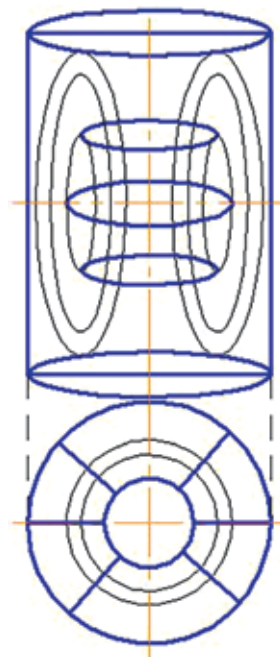


Таблица 2. Технические характеристики СВЧ-гранулятора

Table 2. Technical characteristics of the microwave granulator

Наименование	Параметры
Производительность, кг/ч	300–350
Мощность СВЧ-генераторов, кВт	3,6
Мощность привода прижимных роликов, кВт	7,5
Частота вращения, об/мин	1400
Общая мощность установки, кВт	11,1
Удельные энергетические затраты, кВт·ч/кг	0,032–0,037
Габаритные размеры, м	1,0 x 0,8

чатые кольцевые матрицы 4. Внутри каждого из двух эллипсоидных резонаторов, выполненных из равных нижних и верхних сферических частей, расположены зубчатые фторопластовые кольцевые матрицы. Они установлены между прижимными диэлектрическими кольцами 13. Верхние диэлектрические кольца жестко прикреплены к валам, один из которых — приводной 7, а второй — ведомый 11. По наружным периметрам зубчатых кольцевых матриц до зоны внешнего зубчатого зацепления 9 установлены экранирующие ободы 3, имеющие внутренние пазы для зубьев. В нижних частях эллипсоидных резонаторов имеются выгрузные кольцевые отверстия 8, шириной не более четверти длины волны, и диэлектрические скребки 6, прикрепленные к валам. В верхних частях эллипсоидных резонаторов расположены излучатели 2 от СВЧ-генераторов. На уровне каналов для прессования 10 с внутренней стороны зубчатых кольцевых матриц диэлектрический нож 5 жестко прикреплен к нижнему основанию приемного лотка 12 из неферромагнитного материала, установленного под эллипсоидными резонаторами. Неферромагнитная камера для приема измельченного сырья 14,

расположенная над эллипсоидными резонаторами, на нижнем основании, в зоне внешнего зубчатого зацепления 9, имеет прорезь.

При производительности гранулятора 200 кг/ч и удельной мощности СВЧ-генератора 1,4–2 Вт/г продолжительность воздействия ЭМП СВЧ на сырье массой 0,8–1 кг в резонаторной камере должна составлять 10–12 с. Это обеспечивает минимальные удельные энергетические затраты — 0,06 кВт·ч/кг.

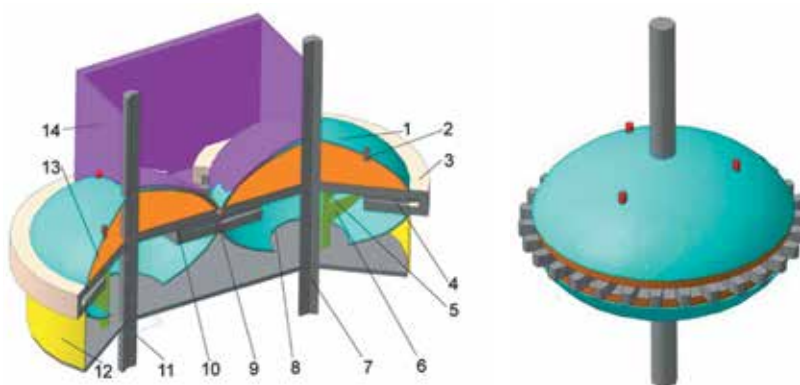
Выводы / Conclusion

Анализ разработанных в нашей научной школе и запатентованных конструкций СВЧ-грануляторов показывает, что приборы с цилиндрическим и тороидальным резонаторами рекомендуется использовать для гранулирования обезвоженных непищевых отходов убоя животных при высокой напряженности электрического поля, обеспечивающей снижение бактериальной обсемененности сырья. Их достоинство — небольшая скорость вращения матрицы, следовательно, меньший износ роликов, простота в обслуживании.

СВЧ-гранулятор с эллипсоидными резонаторами и зубчатыми кольцевыми матрицами рекомендуется использовать для производства стерильных гранул высокого качества из отходов растительного и животного происхождения, предварительно смешанных в определенной концентрации. Установка имеет низкую

Рис. 5. СВЧ-гранулятор с эллипсоидными резонаторами: а — общий вид; б — эллипсоидный резонатор; 1 — эллипсоидный резонатор; 2 — излучатели от генераторов; 3 — экранирующий обод; 4 — зубчатые фторопластовые кольцевые матрицы; 5 — диэлектрический нож; 6 — диэлектрический скребок для выгрузки гранул; 7 — приводной вал; 8 — выгрузное кольцевое отверстие; 9 — внешнее зубчатое зацепление; 10 — каналы для прессования в матрице; 11 — ведомый вал; 12 — приемный лоток для гранул; 13 — фторопластовые прижимные кольца; 14 — камера для приема измельченного сырья

Fig. 5. Microwave granulator with ellipsoid resonators: а — general view; б — ellipsoid resonator; 1 — ellipsoid resonator; 2 — emitters from generators; 3 — shielding rim; 4 — toothed fluoroplastic ring matrices; 5 — dielectric knife; 6 — dielectric scraper for unloading pellets; 7 — drive shaft; 8 — discharge annular hole; 9 — external gear engagement; 10 — channels for pressing in the matrix; 11 — driven shaft; 12 — receiving tray for pellets; 13 — fluoroplastic pressure rings; 14 — chamber for receiving crushed raw materials



производительность, но рабочие органы долговечны. Повышение прочности гранул достигается за счет избирательного диэлектрического нагрева многокомпонентного сырья.

Каждая из предлагаемых конструкций грануляторов имеет свои преимущества и рассчитана на определенный вид вторичного сельскохозяйственного сырья с конкретными электрофизическими параметрами.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные.

Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воякин С.Н., Вишневецкий А.Н., Доценко С.М., Широков В.А. Обоснование процесса и параметров камеры сжатия сырья в смесителе-грануляторе [Процесс в смесителях-грануляторах]. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. 2018; 12(87). 208–213.
2. Макаренков Д.А., Назаров В.И., Гогопольский А.М., Трефилова Ю. А. Особенности выбора оборудования для гранулирования многокомпонентной полидисперсной шихты со вторичными материальными ресурсами на основе системного анализа. *Естественные науки. Вестник МГО*. 2019; 1. 49–64.
3. Сыроватка В.И. Машинные технологии приготовления комбикормов в хозяйствах. М.: ВНИИМЖ. 2010. 248 с.
4. Братишко В.В. Моделирование геометрических параметров шнековых зернопитателей. *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2020; 1(13). 133–138.
5. Жданкин Г.В., Новикова Г.В., Михайлова О.В., Кириллов Н.К. Разработка и обоснование параметров установки для диэлектрического нагрева непищевых отходов животного происхождения в непрерывном режиме [Технологии и технические средства]. *Вестник НГИЭИ*. 2017; 2(69). 61–71

REFERENCES

1. Voyakin S.N., Vishnevskiy A.N., Dotsenko S.M., Shirokov V.A. Justification of the process and parameters of the compression chamber of the mixer-granulator feed [Process in mixer-granulators]. *Bulletin of Krasnoyarsk state agrarian University*. 2018; 12(87). 208–213 (In Russian.)
2. Makarenkov D.A., Nazarov V.I., Gonopolsky A.M., Trefilova Y.A. Features of the choice of the granulating equipment of multicomponent polydisperse charge, with secondary material resources on the basis of the system analysis [Natural Sciences]. *Vestnik MGO*. 2019; 1. 49–64. (In Russian.)
3. Syrovatka V.I. Mashinnyye tekhnologii prigotovleniya kombikormov v khozyaystvakh [Machine technology for animal feed preparation on farms]. M.: VNIIMZH. 2010. 248 p. (In Russian.)
4. Bratishko V.V. Modeling of geometrical parameters of screw grain feeders [Modeling of granulators]. *Bulletin of the all-Russian research Institute of animal husbandry mechanization*. 2020; 1(13). 133–138 (In Russian.)
5. Zhdankin G.V., Novikova G.V., Mikhailova O.V., Kirillov N.K. Development and validation of the installation parameters for dielectric heating of non-food waste of animal origin in continuous mode [Technologies and technical means]. *Bulletin of NGIEI*. 2017; 2(69). 61–71 (In Russian.)

6. Скило В.В. Технологический процесс гранулирования комбикормовой грануляционной мельницы с зубчатыми колесами одинаковой горизонтально-матричной формы [Машинная технология приготовления кормов для животных на фермах]. *Вестник АНК Ставрополь*. 2020; 3(11). 68-71.
7. Полищук В.Ю., Чмыхов И.Г. Применение метода векторной оптимизации для аналитического исследования механизма прессования комбикормового гранулятора. *Пищевая технология. Известия высших учебных заведений*. 1997; 2-3(237-238). 69-70.
8. Стрекалов А.В., Стрекалов Ю. Электромагнитные поля и волны [Расчет электромагнитных полей]. М.: ИНФРА-М. 2015. 375 с.
9. Новикова Г.В., Жданкин Г.В., Михайлова О.В., Белов А.А. Анализ разработанных СВЧ-установок для термообработки сырья. *Электротехника. Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2016; 4(42). 89-93.
10. Шамин Е.А., Крайнов Ю.Е. Разработка установки для высокотемпературного гранулирования обезвоженных пищевых отходов. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2018; № 1(45). 109-114.
11. Шамин Е.А., Новикова Г.В., Крайнов Ю.Е. Разработка установки для высокотемпературного гранулирования обезвоженных непищевых отходов. *Электрификация сельского хозяйства. Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2018; 1(45). 109-114.
6. Skeelo V.V. the Technological process of granulation of feed pellet mill with gear wheels of equal horizontal-a matrix [Machine technology for animal feed preparation on farms]. *Vestnik APK Stavropol*. 2020; 3(11). 68-71 (In Russian.).
7. Polishchuk V.Yu., Chmykh I.G. Application of vector optimization method for analytical study of the pressing mechanism of feed pellet mill [Food technology]. *Proceedings of higher educational institutions*. 1997; 2-3(237-238). 69-70 (In Russian.).
8. Strekalov A.V., Strekalov Yu.A. Electromagnetic fields and waves [Calculation of electromagnetic fields]. M.: INFRA-M. 2015. 375 p. (In Russian.).
9. Novikova G.V., Zhdankin G.V., Mikhailova O.V., Belov A.A. Analysis of the developed microwave plants for heat treatment of raw materials [Electrotechnology]. *Bulletin of the Kazan state agrarian University*. 2016; 4(42). 89-93. (In Russian.).
10. Shamin E.A., Krainov Yu.E. Development of an installation for high-temperature granulation of dehydrated non-food waste. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2018; № 1(45). 109-114. (In Russian.).
11. Shamin E.A., Novikova G.V., Krainov Yu.E. Development of an installation for high-temperature granulation of dehydrated non-food waste [Electrification of agriculture]. *Bulletin of the Bashkir state agrarian University*. 2018; 1(45). 109-114 (In Russian.).

ОБ АВТОРАХ:

Евгений Викторович Воронов, кандидат экономических наук, доцент, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, 22 А, ул. Октябрьская, г. Княгинино, Нижний Новгород, 606340 Российская Федерация
E-mail: e_voronov@list.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1633-3355>

Михайлова Ольга Валентиновна, доктор технических наук., профессор, профессор кафедры Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, 22 А, ул. Октябрьская, г. Княгинино, Нижний Новгород, 606340 Российская Федерация
E-mail: ds1723@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1045-2003>

Марьяна Валентиновна Просвирыкова, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 6, Листовничная аллея, Москва, 127422, Российская Федерация
E-mail: prosviryakova.maryana@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3258-260x>

Дмитрий Александрович Семенов, кандидат экономических наук, доцент, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, 22 А, ул. Октябрьская, г. Княгинино, Нижний Новгород, 606340 Российская Федерация
E-mail: xxxmy@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9228-6864>

Петр Владимирович Зайцев, доктор технических наук, профессор, Чувашский Государственный Аграрный Университет, 29, ул. К. Маркса, Чебоксары, 428003, Российская Федерация
E-mail: zapevl@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7001-9431>

Губейдулла Сибятуллоевич Юнусов, доктор технических наук, профессор, Чувашский Государственный Аграрный Университет, 29, ул. К. Маркса, Чебоксары, 428003, Российская Федерация
E-mail: 270144@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2127-6439>

ABOUT THE AUTHORS:

Evgeny Viktorovich Voronov, Candidate of Economics, Associate Professor, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, 22 A, str. Oktyabrskaya, Knyaginino, Nizhny Novgorod, 606340 Russian Federation
E-mail: e_voronov@list.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1633-3355>

Mikhailova Olga Valentinovna, Tech D, Professor, Professor of the Department Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, 22 A, str. Oktyabrskaya, Knyaginino, Nizhny Novgorod, 606340 Russian Federation
E-mail: ds1723@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1045-2003>

Mariana Valentinovna Prosviryakova, Associate Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiriazev, 6, Listvenichnaya Alley, Moscow, 127422, Russian Federation
E-mail: prosviryakova.maryana@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3258-260x>

Dmitry Aleksandrovich Semenov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, 22 A, str. Oktyabrskaya, Knyaginino, Nizhny Novgorod, 606340 Russian Federation
E-mail: xxxmy@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9228-6864>

Pyotr Vladimirovich Zaitsev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chuvash State Agrarian University, 29 str. K. Marx, Cheboksary, 428003, Russian Federation
Email address: zapevl@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7001-9431>

Yunusov Gubeidulla Sibyatulloevich, Doctor of Technical Sciences, Chuvash State Agrarian University, 29 str. K. Marx, Cheboksary, 428003, Russian Federation
Email address: 270144@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2127-6439>