

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование
и энергоснабжение агропромышленного комплекса

Научная статья
УДК 621.385.6
doi: 10.28983/asj.y2024i4pp108-114

**Микроволновая установка с тороидальным резонатором
для шелушения рапса**

**Николай Николаевич Кучин¹, Николай Васильевич Цугленок²,
Владимир Федорович Сторчевой³, Александр Владимирович Сторчевой⁴**

¹Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Нижегородская обл., г. Княгинино, Россия

²Восточно-Сибирская ассоциация биотехнологических кластеров, г. Красноярск, Россия

³Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия

⁴Российский биотехнологический университет, г. Москва, Россия

e-mail: nkuchin53@mail.ru

Аннотация. Разработана СВЧ-установка непрерывно-поточного действия с пневмосепарирующим каналом и осадочной камерой для отделения лузги от ядер рапса, где реализован принцип шелушения семян рапса в тороидальном резонаторе путем сочетанием способов многократного удара и истирания оболочек увлажненных семян о диски электроприводного ротора, покрытые мелкозернистым абразивным материалом. Обоснованы конструктивные размеры тороидального резонатора с учетом длины волны сантиметрового диапазона и электродинамических параметров, включая собственную добротность и напряженность электрического поля в программе CST Microwave Studio. Выявлены режимные параметры установки и технические характеристики. Удельные энергетические затраты составляют 0,05 кВт·ч/кг.

Ключевые слова: абразивный материал; ротор с радиопрозрачными дисками; пневмосепарирующий канал; напряженность электрического поля

Для цитирования: Кучин Н. Н., Цугленок Н. В., Сторчевой В. Ф., Сторчевой А. В. Микроволновая установка для шелушения семян рапса // Аграрный научный журнал. 2024. № 4. С. 108–114. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i4pp108-114>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

**Microwave installation with a toroidal resonator
for peeling rapeseed**

Nikolay N. Kuchin¹, Nikolay V. Zuglenok², Vladimir F. Storchevoy³, Alexandr V. Storchevoy⁴

¹Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Nizhny Novgorod region, Knyaginino, Russia

²East Siberian Association of Biotechnological Clusters, Krasnoyarsk, Russia

³ Russian State Agrarian University – K.A. Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

⁴ Russian Biotechnological University, Moscow, Russia

e-mail: nkuchin53@mail.ru

Abstract. A continuous-flow microwave installation with a pneumatic separation channel and a sedimentary chamber has been developed to separate the husk from the rapeseed core, where the principle of peeling rapeseed seeds in a toroidal resonator is implemented by combining methods of repeated impact and abrasion of the shells of moistened seeds on electric rotor discs coated with fine-grained abrasive material. The design dimensions of the toroidal resonator are justified, taking into account the wavelength of the centimeter range and electrodynamic parameters, including its own Q-factor and electric field strength in the CT Microwave Studio program, to evaluate the thermal efficiency. The specific energy costs are 0.05 kWh/kg.

Keywords: abrasive material; rotor with radio-transparent discs; pneumatic deflection channel; electric field strength

For citation: Kuchin N.N., Zuglenok N.V., Storchevoy V.F., Storchevoy A.V. Microwave installation for peeling rapeseed // Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2024;(4):108–114. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i4pp108-114>.



Введение. По данным Росстата, в 2022 г. валовый сбор рапса составил 4514,8 тыс. т при урожайности 1,98 т/га [6]. Рапс обладает высокой маслянистостью, именно поэтому его используют для производства растительного рапсового масла, доля которого составляет 33 % в общем объеме масел. Качественное производство рапсового масла возможно только из шелушенных семян рапса.

Существуют шелушители зерна, используемые на заводах малой мощности, например, марки ЗШН и центробежный шелушитель марки Я31.198, предназначенные для шелушения овса, риса, подсолнечника [14]. Но они не приспособлены для шелушения семян рапса из-за того, что размеры семян очень хрупкие и мелкие (1–2 мм). Существует машина для шелушения семян рапса ЛТУ-30, предназначенная для отделения лузги от ядра рапса [2–5], производительностью 200–400 кг/ч. Есть и шелушители семян рапса двух-, и трехмодульные с сверхвысокочастотным энергоподводом в рабочую камеру [11–13]. В этих двухмодульной и трехмодульной установках с СВЧ-энергоподводом в цилиндрический резонатор возникают трудности согласования режимных параметров каждого модуля, отсюда дробление ядра и потери, т. е. эффективность шелушения низкая.

Аналогом является воздушный сепаратор А1-БВ3-10, предназначенный для выделения примесей, отличающихся от зерна аэродинамическими свойствами, и для отделения транспортирующего воздуха от зерна [1]. Но реализовать процесс шелушения в этой установке без существенных изменений рабочей камеры невозможно.

Техническая проблема – низкая эффективность установок для шелушения семян рапса в условиях фермерских хозяйств решается путем разработки радиогерметичного шелушителя непрерывно-поточного действия с СВЧ-энергоподводом в тороидальный резонатор, позволяющего реализовать отделение ядер при многократном ударе и истирании лузги увлажненных семян при высокой напряженности электрического поля и удаление лузги через пневмосепарирующий канал.

Цель исследования – разработать шелушитель с резонатором, конструктивные параметры которого равны семь длин волн; исследовать и визуализировать распределение электромагнитного поля в тороидальном резонаторе; вычислить собственную добротность тороидального резонатора и напряженность электрического поля; обосновать режимы работы шелушителя.

Материалы и методы. Исследуемое сырье – семена рапса. В основу разработки шелушителя с СВЧ-энергоподводом в тороидальный резонатор заложены способы шелушения семян и аэродинамического удаления примесей [1]. При проектировании тороидального резонатора учитывали особенности электромагнитного поля сантиметрового диапазона (длина волны 12,24 см), а именно: объем должен быть достаточен для полного использования мощности генераторов; линейные размеры резонатора не должны превышать 5...7-кратный размер длины волны [8], так как в резонаторе, размеры которого составляют 8...10-кратный размер длины волны, утрачиваются резонансные свойства, а суммарное поле электромагнитных волн будет неравномерным. В программе CST Microwave Studio (CST Computer Simulation Technology, США) [7] проведены исследования электродинамических параметров П-образного тороидального резонатора. Расчет собственной добротности тороидального резонатора и напряженности электрического поля проведен по методикам О.О. Дробахина [9]. Исследования процесса шелушения увлажненных семян рапса путем многократного удара о лопасти вентилятора, покрытые мелкозернистым абразивным материалом проведены с помощью экспериментального устройства в научно-исследовательской лаборатории «Электроэнергетика и электротехника» ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет».

Результаты исследований. Проведены исследования процесса шелушения семян рапса в лабораторном устройстве (рисунок 1) путем многократного удара о лопасти вентилятора, покрытые мелкозернистым абразивным материалом. Эффективность шелушения, оцененная количественными и качественными показателями, показала, что коэффициент шелушения не превышает 50–60 % (рисунок 1, в).

Для повышения эффективности шелушения семян с целью сохранения целостности ядра предложен термомеханический способ воздействия на увлажненные семена электромагнитным полем сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ). Для реализации способа разработана нижеописанная установка. Шелушитель семян рапса (рисунок 2) содержит тороидальный резонатор 2. Он вы-





полнен из неферромагнитного материала (например, из алюминия) и представлен как соосно расположенные цилиндры наружный 6 и внутренний 17, образуя между верхними их основаниями конденсаторную часть 3. Тороидальная часть представлена как кольцевой объем между неферромагнитными цилиндрами 6, 18. К кольцевому неферромагнитному основанию 15 прикреплена неферромагнитная коническая воронка 10 с усеченным конусом 13. У внутреннего неферромагнитного цилиндра 18 отсутствует нижнее основание. Радиопрозрачная воронка 7 расположена соосно в тороидальной части резонатора, представлена как усеченный конус без оснований, у которого боковая поверхность по большому периметру прикреплена к наружному цилиндру 6 на уровне верхнего основания внутреннего цилиндра. К малому периметру радиопрозрачного усеченного конуса прикреплено радиопрозрачное кольцо, образуя между ним и боковой поверхностью внутреннего цилиндра кольцевой канал 8. Во внутреннем неферромагнитном цилиндре установлен вентилятор 16, так, что между его корпусом и боковой поверхностью внутреннего цилиндра образован пневмосепарирующий канал 9. В конденсаторной части 3 тороидального резонатора 2 соосно расположен электроприводной радиопрозрачный ротор 19 с радиопрозрачными дисками, покрытыми мелкозернистым абразивным материалом.



*Рисунок 1 – Лабораторное устройство для шелушения семян рапса:
а, б – устройство; в – частично шелушенные семена рапса*

*Figure 1 – Laboratory device for peeling rapeseed:
a, b – device; c – partially peeled rapeseed*

Шелушитель семян рапса с СВЧ энергоподводом в тороидальный резонатор работает следующим образом. Включить вентилятор 17 и электроприводной радиопрозрачный ротор 21. Распылить воду через патрубков 20 в конденсаторную часть 3 тороидального резонатора 2. Семена рапса, поступающие в неферромагнитную загрузочную емкость 1, при открытии задвижки, падают на радиопрозрачные диски 4. При вращении радиопрозрачного ротора оболочка рапса истирается мелкозернистым абразивным материалом на дисках, и за счет центробежной силы ударяются о радиопрозрачное отражательное кольцо 5, покрытое мелкозернистым абразивным материалом.

При сочетании двух способов шелушения (интенсивного истирания оболочек и многократного удара) происходит постепенное отделение лузги от ядра. Далее смесь лузги и ядра попадает в радиопрозрачную воронку 7, оттуда при прохождении через радиопрозрачный кольцевой канал 8 часть лузги затягивается воздушным потоком в пневмосепарирующий канал 16 через кольцевое отверстие 9. Смесь ядра и лузги из радиопрозрачного кольцевого канала 8, при пересыпании с радиопрозрачного ската 11 в неферромагнитный конус 10, продувается воздушным потоком. Легкие примеси, захваченные воздушным потоком, уносятся через пневмосепарирующий канал 16 в осадочную камеру 14, предназначенную для отделения пыли и примесей от воздуха. Примеси выводятся из осадочной камеры 14 шнеком 12. Воздух, очищенный от пыли и примесей в осадочной камере 14, засасывается центробежным вентилятором 17 через щель дросселя и патрубков, после чего вновь нагнетается в рабочую камеру, циркулируя по замкнутому циклу. При турбулентном движении воздушного потока в вертикальном в пневмосепарирующем канале 16 сила сопротивления зависит от динамического воздействия потока на частицу (коэффициента аэродинамического сопротивления, Миделева сечения, относительной скорости частицы, плотности воздуха). Коэффициент аэродинамического сопротивления зависит от формы частицы и величины критерия Рейнольдса [1].

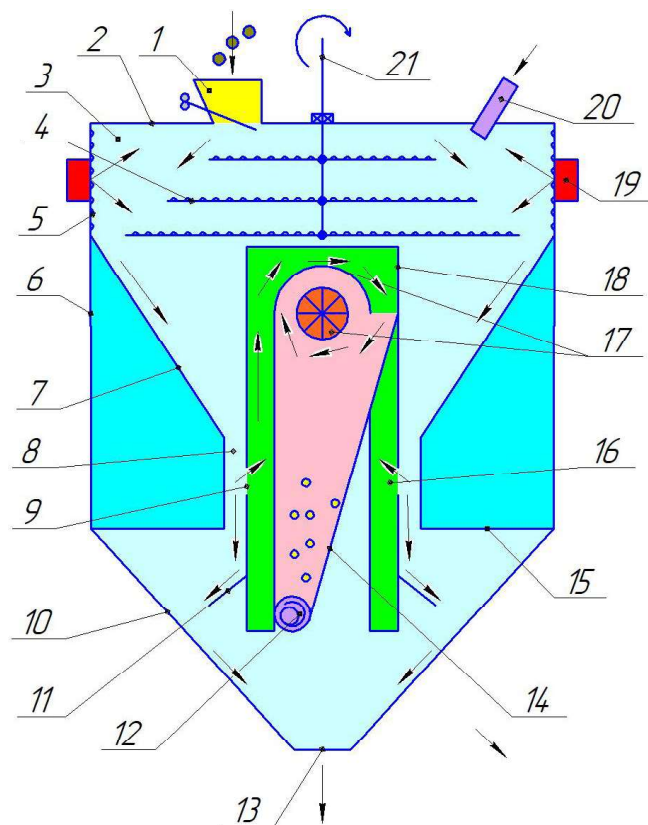
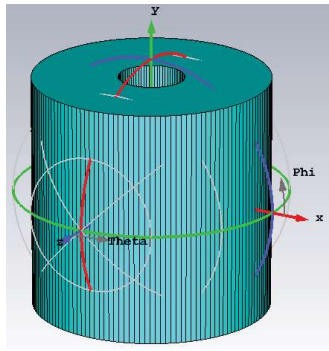


Рисунок 2 – Шелушитель семян рапса с СВЧ энергоподводом в тороидальный резонатор:
 1 – загрузочная емкость; 2 – тороидальный резонатор; 3 – конденсаторная часть тороидального резонатора; 4 – радиопрозрачные диски, покрытые мелкозернистым абразивным материалом; 5 – радиопрозрачное отражательное кольцо; 6 – неферромагнитный наружный цилиндр; 7 – радиопрозрачная воронка; 8 – радиопрозрачный кольцевой канал для семян рапса; 9 – кольцевое отверстие; 10 – неферромагнитный конус; 11 – радиопрозрачный скат; 12 – радиопрозрачный шнек для выгрузки тяжелой примеси; 13 – усеченная часть конуса для выгрузки ядер рапса; 14 – осадочная камера; 15 – неферромагнитное кольцевое основание; 16 – пневмосепарирующий канал; 17 – центробежный вентилятор; 18 – неферромагнитный внутренний цилиндр; 19 – магнетроны с волноводами и вентиляторами; 20 – патрубок для распыления воды; 21 – электроприводной радиопрозрачный ротор

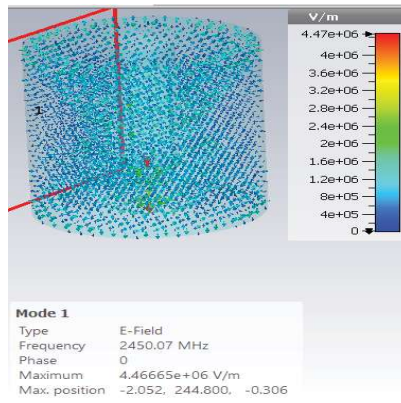
Figure 2 – Rapeseed husker with microwave power supply to a toroidal resonator:
 1 – loading tank; 2 – toroidal resonator; 3 – condenser part of the toroidal resonator; 4 – radio-transparent discs coated with fine-grained abrasive material; 5 – radio-transparent reflective ring; 6 – non-ferromagnetic outer cylinder; 7 – radio transparent funnel; 8 – radiopransparent annular channel for rapeseed; 9 – annular hole; 10 – non-ferromagnetic cone; 11 – radiopransparent ramp; 12 – radiopransparent auger for unloading heavy impurities; 13 – truncated part of the cone for unloading rapeseed kernels; 14 – sedimentary chamber; 15 – non-ferromagnetic annular base; 16 – pneumatic separation channel; 17 – centrifugal fan; 18 – non-ferromagnetic inner cylinder; 19 – magnetrons with waveguides and fans; 20 – nozzle for spraying water; 21 – electrically driven radio-transparent rotor

В основу тороидального резонатора заложен принцип, позволяющий увеличить объем резонатора и сохранить высокую собственную добротность. Особенность такого резонатора – резко выраженное пространственное разъединение электрического и магнитного полей. Концентрация электрического поля происходит в конденсаторной части резонатора, где зазор намного меньше длины волны. Электромагнитное поле здесь возбуждается продольным током, текущим по внутреннему цилиндру резонатора, и соответствует Е-волне. Радиус наружного цилиндра подбирается так, чтобы на частоте 2450 МГц конденсаторная часть работала в режиме отсечки. Зазор в конденсаторной части резонатора кратен четверти длины волны. Изменяя зазор в конденсаторной части можно изменить емкость и соответственно резонансную частоту. Результаты исследования электродинамических параметров тороидального резонатора с конструктивными параметрами, согласованными с длиной волны $\lambda = 12,24$ см (высота и диаметр резонатора 7λ , высота зазора 2λ), полученные в программе CST Microwave Studio [8], приведены на рисунке 3.

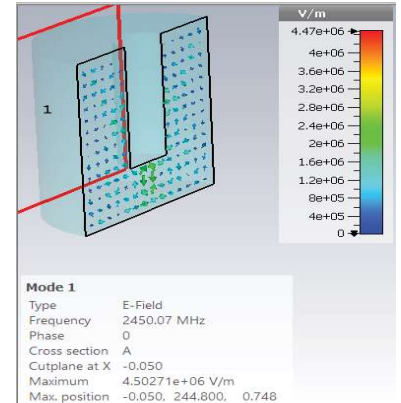




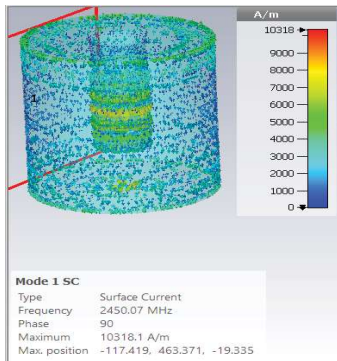
1



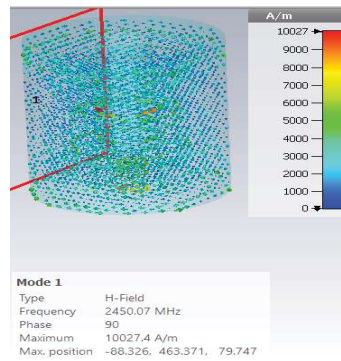
2



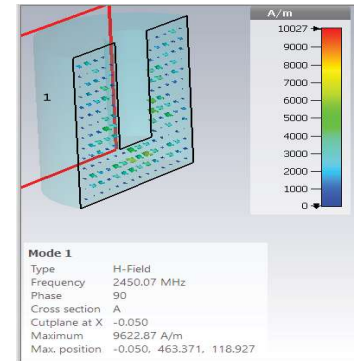
3



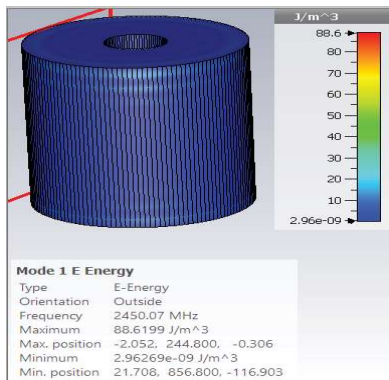
4



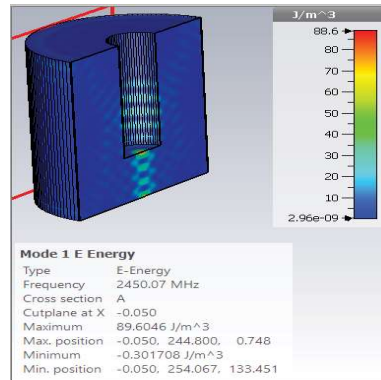
5



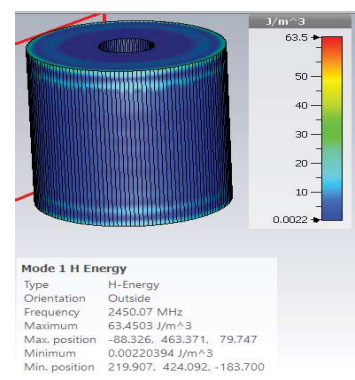
6



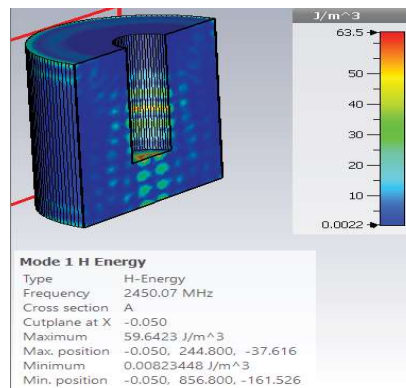
7



8



9



10

Рисунок 3 – Электродинамические параметры системы с тороидальным резонатором (мода 1, конденсаторная часть внизу):

1 – распределение ЭМП по координатам x, y, z; 2, 3 – напряженность электрического поля, В/м; 4, 5, 6 – напряженность магнитного поля, А/м; 7, 8 – Е-энергия, Дж/м³; 9, 10 – Н-энергия, Дж/м³

Figure 3 – Electrodynamics parameters of a system with a toroidal resonator (mode 1, capacitor part at the bottom):
1 – EMF distribution in x, y, z coordinates; 2, 3 – electric field strength, V/m;
4, 5, 6 – magnetic field strength, A/m; 7, 8 – E-energy, J/m³; 9, 10 – H-energy, J/m³



Результаты исследования в программе показывают, что напряженность электрического поля в конденсаторной части тороидального резонатора равна 4–8 кВ/см. Вычисленная по формуле (2) напряженность электрического поля E в резонаторе с тремя магнетронами, мощностью 2400 Вт через величину собственной добротности Q по известной методике [9] составляет 5,6 кВ/см.

Расчет собственной добротности тороидального резонатора при размерах: конденсаторный зазор $d = 0,153$ м, высота резонатора $H = 0,8568$ м, радиус внутреннего цилиндра $r = 0,119$ м, радиус наружного цилиндра $R = 0,4284$ м составляет 137789, а напряженность электрического поля при его объеме $0,16$ м³ составляет 5,6 кВ/см.

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot [R^2 \cdot H - r^2 \cdot (H - d)]}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot [\pi \cdot R^2 + (\pi \cdot R^2 - \pi \cdot r^2)] + 2 \cdot \pi \cdot H \cdot R + (\pi \cdot r^2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot (H - d))} = 137789. \quad (1)$$

$$E = \frac{137789 \cdot 2400}{0,27 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,16 \cdot 10^5} = 5,6 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}. \quad (2)$$

Заключение. Предложенная усовершенствованная технология шелушения семян рапса реализована в тороидальном резонаторе с сверхвысокочастотным энергоподводом в процессе многократного удара и истирания оболочек увлажненных семян о диски электроприводного ротора, покрытые мелкозернистым абразивным материалом и разделение лузги от ядра в пневмосепарирующем канале и осадочной камере.

Обеспечение высокой собственной добротности (138000) тороидального резонатора возможно при высоте и диаметре наружного цилиндра равном 7λ , зазоре в конденсаторной части (1,25–2,00) λ . При этом напряженность электрического поля достигает 4–8 кВ/см, что позволяет увеличить температуру диэлектрического нагрева семян рапса на 15–20 °С. Такая температура способствует отделению увлажненной оболочки от ядра. При мощности электропривода ротора 4,2 кВт, частоте вращения 750 мин⁻¹, мощности магнетронов 3,3 кВт, производительность установки для шелушения семян рапса составит 100–150 кг/ч. Энергетические затраты равны 0,05 кВт·ч/кг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутковский В. А., Мельников Е. М. Технология мукомольного, крупяного и комбикормового производства. М., 1989. С. 67–72.
2. Машина для шелушения семян рапса. Режим доступа: <http://wintone-machinery.ru/machines/shelushilka-dlya-...> Дата доступа 05.03.2024.
3. Новикова Г.В., Михайлова О.В., Просвирякова М.В., Шаронова Т.В. Установка для шелушения рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты // Комбикорма. 2022. № 12. С. 29–31. EDN: MSHNBZ. DOI: 10.25741/2413-287X-2022-12-2-189.
4. Новикова Г.В., Коробков А.Н., Михайлова О.В., Анисимова М.А. Установка для шелушения рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты // Инновации в сельском хозяйстве. 2020. № 2 (35). С. 77–85. EDN: ZLSSAT.
5. Оборудование для шелушения семечек рапса ТМ-800. URL: <http://apkonline.ru/oborudovanie-orekhi-semechki/oborudovanie-dlya-shelusheniya-semechek-rapsa-tm-800-88474.htm..>
6. Производство рапса озимого и ярового в России в 2022. Режим доступа: rosraps.ru/2023/03/13/rapeseed_production_russia_... (дата обращения 05.03.2024).
7. Рябченко В.Ю., Паслен В.В. Компьютерное моделирование объектов с помощью ПП CST microwave Studio // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2018. № 1. С. 139. EDN: QIKITH.
8. Стрекалов А. В., Стрекалов Ю. В. Электромагнитные поля и волны. М., 2014. 375 с.
9. Техника и полупроводниковая электроника СВЧ / О. О. Дробахин [и др.]. Севастополь, 2013. 322 с. ISBN 978-966-335-404-0.
10. Ударные шелушители ЖН. Режим доступа: jk-machinery.ru/mashiny/jhi-udarnye-shelushiteli/. – Дата доступа 05.03.2024.
11. Установка для шелушения рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты : патент 2710063 Рос. Федерация : МПК ВО2В3/00 / Е. А. Шамин [и др.]; заявитель и патентообладатель НГИЭУ. – № 2019109760; заявл. 15.03.2019; опубл. 24.12.19, Бюл. № 36. (In Russ.).



12. Установка для отделения оболочки семян рапса в процессе воздействия ЭМП СВЧ : патент 2769134 Рос. Федерация : МПК В02В3/00 / Г. В. Новикова [и др.]; заявитель и патентообладатель НГИЭУ. – № 2021126132; заявл. 06.09.2021; опубл. 28.03.2022, Бюл. № 10. (In Russ.).

13. Fan Y. et al. Microwave-induced carbonization of rapeseed shell for bio-oil and bio-char: Multi-variable optimization and microwave absorber effect // *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 191. P. 23–38.

14. Шелушитель центробежный 1500 кг/ч. Режим доступа: agroprommash.ru . Дата доступа 05.03.2024.

REFERENCES

1. Butkovsky V.A., Melnikov E. M. Technology of flour milling, cereal and feed production. Moscow, 1989:67-72. (In Russ.).

2. Machine for peeling rapeseed. Available at: <http://wintone-machinery.ru> “machines/shelushilka-dlya-...Access date 03/05/2024. (In Russ.).

3. Novikova G.V., Mikhailova O.V., Prosviryakova M.V., Sharonova T.V. Installation for peeling rapeseed in an electromagnetic field of ultrahigh frequency. *Compound Feed*. 2022;(12):29-31. EDN: MSHNBZ. DOI: 10.25741/2413-287X-2022-12-2-189. (In Russ.).

4. Novikova G.V., Korobkov A.N., Mikhailova O.V., Anisimova M.A. Installation for peeling rapeseed in an electromagnetic field of ultrahigh frequency. *Innovations in Agriculture*. 2020;2(35):77-85. EDN: ZLSSAT. (In Russ.).

5. Equipment for peeling rapeseed seeds TM-800. Available at: <http://apkonline.ru/oborudovanie-orekhi-semechki/oborudovanie-dlya-shelusheniya-semechek-rapsa-tm-800-88474.htm>.

6. Production of winter and spring rapeseed in Russia in 2022. Available at: rosraps.ru “2023/03/13/rapeseed_production_russia_...(accessed 05.03.2024). (In Russ.).

7. Ryabchenko V.Yu., Paslen V.V. Computer modeling of objects using CST microwave Studio PP. *Modern Problems of Radio Electronics and Telecommunications*. 2018;(1):139. EDN: QIKITH. (In Russ.).

8. Strelakov A.V., Strelakov Yu. V. Electromagnetic fields and waves. Moscow, 2014. 375 p. (In Russ.).

9. Drobakhin O. O., Plaksin S. V., Ryabchik V. D., Saltykov D. Yu. Microwave technology and semiconductor electronics. Sevastopol, 2013. 322 p. ISBN 978-966-335-404-0. (In Russ.).

10. JHI impact huskers. Available at: jk-machinery.ru/mashiny/jhi-udarnye-shelushiteli/. Access date 03/05/2024. (In Russ.).

11. Installation for peeling rapeseed in an ultrahigh frequency electromagnetic field : patent 2710063 Ros. Federation : IPC В02В3/00 / E. A. Shamin [et al.]; the applicant and the patent holder are the NGIEU. – No. 2019109760; application dated 03/15/2019; publ. 12/24/19, Issue No. 36. (In Russ.).

12. Installation for separating the shell of rapeseed seeds during exposure to EMPH : patent 2769134 Ros. Federation: IPC В02В3/00 / G. V. Novikova [et al.]; the applicant and the patent holder of NGIEU. – No. 2021126132; application 06.09.2021; publ. 03/28/2022, Issue No. 10. (In Russ.).

13. Fan Y. et al. Microwave-induced carbonization of rapeseed shell for bio-oil and bio-char: Multi-variable optimization and microwave absorber. *Energy Conversion and Management*. 2019;(191):23–38. (In Russ.).

14. Centrifugal peeling machine 1500 kg/h. Available at: agroprommash.ru”. Access date 03/05/2024. (In Russ.).

*Статья поступила в редакцию 24.11.2023; одобрена после рецензирования 29.12.2023; принята к публикации 14.01.2024.
The article was submitted 24.11.2023; approved after reviewing 29.12.2023; accepted for publication 14.01.2024.*

