

Математическая модель процесса комбинированной сушки товарного зерна в установках конвейерного типа

**Евгений Александрович Четвериков, Константин Михайлович Усанов,
Андрей Валерьевич Волгин, Алексей Петрович Моисеев, Людмила Александровна Лягина**
Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Россия
e-mail: mehanik200420042004@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены результаты разработки модели комбинированной микроволново-конвективной сушки зерновой продукции в установках, где продукт перемещается внутри рабочей камеры, попеременно достигая минимумов и максимумов воздействия электромагнитного поля СВЧ диапазона. В ходе исследований установлено, что рациональным для этих целей является использование рабочей камеры, выполненной в виде прямоугольного резонатора. Разработанная математическая модель позволяет производить технический расчет для установок конвейерного типа, например, для барабанных и шахтных зерносушилок, где продукт перемещается горизонтально. Ввиду большого количества металлических конструкций внутри камер сушки, рабочую камеру предложено реализовать в виде отдельного блока, осуществляющего стимулирование выхода влаги на поверхность продукта.

Ключевые слова: сушка зерна; СВЧ-сушка; зерносушильные комплексы; расчет установок сушки; микроволновые технологии; моделирование процесса сушки; микроволново-конвективная сушка.

Для цитирования: Четвериков Е. А., Усанов К. М., Волгин А. В., Моисеев А. П., Лягина Л. А. Математическая модель процесса комбинированной сушки товарного зерна в установках конвейерного типа // Аграрный научный журнал. 2023. № 12. С. 171–176. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i12pp171-176>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

The mathematical model of the process of combined drying of commercial grain in conveyor-type installations

Evgeniy A. Chetverikov, Konstantin M. Usanov, Andrey V. Volgin, Aleksey P. Moiseev, Lyudmila A. Lyagina
Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia
e-mail: mehanik200420042004@gmail.com

Abstract. The article discusses the results of the development of a model of combined microwave-convective drying of grain products in installations where the product moves inside the working chamber, alternately reaching the minima and maxima of exposure to the electromagnetic field of the microwave range. In the course of research, it was found that it is rational for these purposes to use a working chamber made in the form of a rectangular resonator. The developed mathematical model makes it possible to perform technical calculations for conveyor-type installations - for example, for drum and shaft grain dryers, where the product moves horizontally. Due to the large number of metal structures inside the drying chambers, it is proposed to implement the working chamber as a separate unit that stimulates the release of moisture to the surface of the product.

Keywords: grain drying; microwave drying; grain drying complexes; calculation of drying plants; microwave technologies; modeling of the drying process; microwave convective drying.

For citation: Chetverikov E. A., Usanov K. M., Volgin A. V., Moiseev A. P., Lyagina L. A. The mathematical model of the process of combined drying of commercial grain in conveyor-type installations. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(12):171–176. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i12pp171-176>.

Введение. Сушка продукции растительного сырья за счет энергии микроволнового электромагнитного (ЭМ) поля характеризуются выделением тепла в областях сосредоточения влаги внутри продукта, что делает возможным значительно уменьшить время воздействия относительно других видов сушки в том числе наиболее распространенного - конвективного. Существенным минусом микроволнового обезвоживания выступает неравномерный нагрев внутренних слоев продукта, который сильно заметен в установках, где продукт располагается неподвижно в процессе сушки. Примером могут служить сушильные шкафы для малых фермерских хозяйств. В связи с этим в работе предлагается





рассмотреть процессы микроволново-конвективной сушки, протекающие в рабочих камерах установок, где продукт находится в движении.

Цель исследования – изучить параметры сушки товарного зерна микроволновым полем в установках конвейерного типа, разработать математическую модель процесса сушки.

Микроволновые камеры сушки (МКС) в сушилках с неподвижным продуктом, как правило, выполнены в виде прямоугольного резонатора, на 60 и более процентов заполненных сушимым продуктом. Чем более влажный продукт или отдельные его области, тем эффективнее происходит поглощение СВЧ поля продуктом, а, следовательно сильнее происходит внутренний разогрев, однако скорость выхода испаренной влаги при этом снижается. Происходит это из-за того, что в МКС максимальное поглощение микроволновой энергии происходит в точках наибольшего сосредоточения влаги при резонансе, когда величина амплитуды электромагнитного поля, определяющая нагрев, достигает максимума, но при этом происходит наибольший разброс по температуре нагрева, так как микроволновое поле в основном характеризуется стоячими волнами, что ведет к сильной изрезанности интенсивности поля по площади продукта. Данной проблеме посвящено множество работ отечественных и зарубежных авторов [3]. На основании их опыта можно сделать заключение, что одновременно повысить равномерность распределения СВЧ-поля в продукте и сохранить эффективный КПД передачи микроволновой энергии в сушимый продукт, при подводе микроволновой энергии в МКС за счет диэлектрического отверстия камеры, представляется не реализуемой практической задачей.

Кроме того, можно охарактеризовать процесс сушки в установках, где продукт располагается на транспортере и перемещается внутри МКС. Конструкция их реализована на основе широко распространенных прямоугольных, цилиндрических, коаксиальных или желобковых волноводах [1, 5, 6]. Примером здесь могут служить конвейерные установки сушки зерна шахтного и барабанного типов. Использование в них рабочих камер СВЧ для сушки конвективным способом маловероятно ввиду большого количества металлических конструкций внутри. В это связи блок СВЧ нагрева выносятся как отдельная конструкция и используется для стимулирования выхода влаги на поверхность продукта сушки. Такие устройства имеют самое широкое применение в сельскохозяйственном производстве при постоянном воздействии СВЧ энергией на зерновую и другую продукцию с твердыми сыпучими плодами. Как правило конструктивно установки реализуются в комбинированном последовательном сочетании с конвективным воздействием [9,10]. Изрезанность нагрева в таких устройствах происходит из-за затухания основной моды колебания в направлении распространения. Использование МКС в виде тора немного снижает неравномерность нагрева, но на небольшой процент. Стоит обратить внимание, что в отличие от СВЧ-устройств с неподвижным продуктом во время рабочего процесса, конструктивно являющихся сушилками универсального применения и предназначены для сушки широкого спектра сельскохозяйственной продукции различной начальной влажности, устройства с подвижным продуктом, являются сушилками целевого применения и предназначены для СВЧ-сушки, как правило, товарного зерна естественной влажности, либо для экзотических видов продукции – например семян расторопши для попадания в узкий диапазон 5–6 % по конечной влажности, технологически необходимый для качественного получения продуктов переработки – лечебных масел и БАДов.

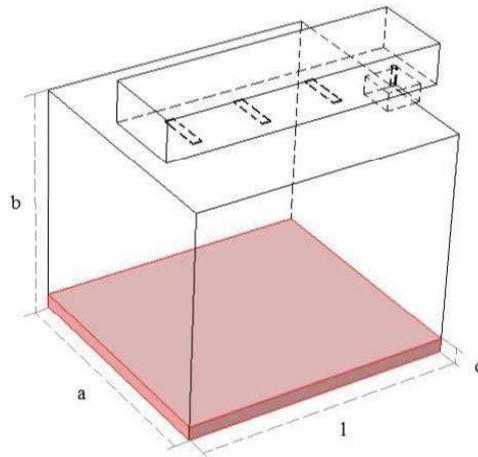
На основании опыта многих исследователей в этой области [14, 15] можно сделать вывод, что обеспечить изрезанность поля по площади сушеного продукта в процентном соотношении не более 15 %, возможно, только в МКС, выполненных на основе не типичных волноводов сложного поперечного сечения (ВСС), в которых четко выражен ёмкостной зазор, а электрическая составляющая микроволнового поля основной моды колебания однородна.

Следовательно, повышение качества технологического процесса обезвоживания сельскохозяйственной продукции в СВЧ-установках сушки посредством совершенствования способов решения внутренней краевой задачи электродинамики и теплопроводности (ВКЗЭиТ) и оптимизации систем возбуждения ЭМ поля в РК и модернизации конструкций рабочих камер СВЧ-установок сушки конвейерного типа является важной народно-хозяйственной задачей.

Методика исследований. Рассмотрим математическое описание процесса преобразование микроволнового поля в тепловую энергию с материалом, в котором содержится внутренняя связанная влага, учитывающее конструктивные нюансы СВЧ-устройств неподвижного и динамические перемещающегося продукта, а также физические свойства обрабатываемого материала. При этом основной задачей, общей для указанных устройств, является одновременное повышение уровня равномерности нагрева и КПД, то есть улучшение выходных характеристик электротехнологического процесса термообработки. Пути решения данной задачи принципиально отличаются для СВЧ-устройств стационарного типа и конвейерного типа. В устройствах СТ снижение уровня изрезанности поля и повышения КПД может быть достигнуто путём модернизации и совершенствования способов подвода поля в МКС, в

то время как в СВЧ-устройствах динамического типа – путём использования ВСС и определения формы продольного профиля МКС, при котором обеспечивается равномерное тепловыделение по ширине образца.

Результаты исследований. Для СВЧ-устройств СТ при определении эффективности использования распределённых СВ было предложено использовать конструкцию рабочей камеры (см. рисунок), представляющую собой прямоугольный резонатор, на нижней стенке которого расположена прямоугольная диэлектрическая пластина (ПДП) с неизменными в процессе нагрева физическими свойствами, имитирующая расположенный на конвейере продукт.



Модель рабочей камеры с системой подвода СВЧ энергии в виде щелей

Такая модель допускает аналитическое решение ВКЗиЭ при использовании продольной поляризации ЭМ поля – E_y, H_y и представлении искомого решения в виде суперпозиции мод Е и Н-типов, при этом остальные компоненты ЭМ поля определяются из первых двух уравнений Максвелла следующим образом:

$$E_x = \frac{1}{\chi_1^2} \left[\frac{\partial E_y}{\partial x \partial y} + j\omega\mu \frac{\partial H_y}{\partial z} \right]; E_z = \frac{1}{\chi_1^2} \left[\frac{\partial E_y}{\partial x \partial z} + j\omega\mu \frac{\partial H_y}{\partial x} \right]; \quad (1)$$

$$H_x = \frac{1}{\chi_1^2} \left[\frac{\partial H_y}{\partial x \partial y} + j\omega\varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial z} \right]; E_x = \frac{1}{\chi_1^2} \left[\frac{\partial E_y}{\partial x \partial y} + j\omega\varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial x} \right].$$

где c_\perp – поперечное число ($c_\perp^2 = K_x^2 + K_z^2$); K_x, K_z – волновые числа по координатным направлениям x, z ; ε, μ – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды; E и H – вектора напряжённости электрического и магнитного полей. ВКЗЭ для продольной поляризации может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} \nabla^2 E_{yi}(\vec{r}, \tau) + K_i^2 E_{yi}(\vec{r}, \tau) &= F_{yi}^{(j)}(\vec{r}, \tau) \\ \nabla^2 H_{yi}(\vec{r}, \tau) + K_i^2 H_{yi}(\vec{r}, \tau) &= F_{yi}^{(M)}(\vec{r}, \tau) \end{aligned} \quad (2)$$

$$F_{yi}^{(E)} = \begin{cases} 0 & (i=1) \\ \mu_0 \frac{\partial j_{y_{cm}}}{\partial \tau} + \frac{1}{\varepsilon_0} \text{grad}_z \rho_{cm} & (i=2) \end{cases}; F_{yi}^{(M)} = \begin{cases} 0 & (i=1) \\ \text{rot} j_{y_{cm}} & (i=2) \end{cases}$$

$$K_i^2 = \begin{cases} \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 & (i=1) \\ \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 & (i=2) \end{cases}$$

где $i=1$ определяет воздушную среду, а $i=2$ ПДП; K^2 – обобщенное волновое число; j_{cm}, c_{cm} – сторонние токи и заряды, определяющие источники ЭМ поля. Решения волновых уравнений системы (2) должны удовлетворять следующим граничным условиям на металлической поверхности РК – S_1 и на поверхности раздела сред – S_2 :

$$\begin{aligned} \vec{E}_\tau(\vec{r}, \tau) = 0, \frac{\partial \vec{H}_n(\vec{r}, \tau)}{\partial n} = 0|_{\text{на}} \\ \vec{E}_{\tau 1}(\vec{r}, \tau) = \vec{E}_{\tau 2}(\vec{r}, \tau); \vec{H}_{\tau 1}(\vec{r}, \tau) = \vec{H}_{\tau 2}(\vec{r}, \tau)|_{\text{на } S_2} \end{aligned} \quad (4)$$



Спектр собственных частот и структура ЭМ поля Е-типов колебаний определяется первым уравнением соотношения (2) при условии $F_{yi}^{(0)} = 0$ и $H_{yi} = 0$ для E_{yi} . Решив однородное волновое уравнение методом разделения переменных и удовлетворяя полученное решение граничному условию (4), получим:

$$E_{yi}(x, y, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} E_{yimnp}(x, y, z), \quad (5)$$

где

$$E_{yimnp}(x, y, z) = (E_{y0})_{mnp} \times \sin \frac{m\pi}{a} x \times (a_{1i} \cos K_{yni} y + b_{1i} \sin K_{yni} y) \sin \frac{p\pi}{l} z. \quad (6)$$

Удовлетворяя решение (6) граничным условиям (4) по направлению y , получим дисперсионное уравнение для определения K_{yni} :

$$\operatorname{tg}(K_{yn1}(b-d)) = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \sqrt{\frac{\omega_{mnp}^2 \Delta \varepsilon \mu}{K_{yn2}^2} + 1} \operatorname{tg}(K_{yn1} d) \sqrt{\frac{\omega_{mnp}^2 \Delta \varepsilon \mu}{K_{yn2}^2} + 1}, \quad (7)$$

где $D\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$. При этом спектр собственных частот определяется из обобщённого дисперсионного уравнения:

$$\omega_{mnp} = \frac{1}{\varepsilon_i \mu_n} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + K_{yn1}^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2}. \quad (8)$$

Решение неоднородного уравнения для E_{yi} (2) представим в виде суперпозиции ортонормированных функций по координатному направлению Y и ортогональных функций X, Z :

$$E_{yi}(x, y, z, \tau) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} T_{mnp}(\tau) \Phi_{yni}(y) \cos \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{p\pi}{l} z; \\ \Phi_{yni}(y) = \begin{cases} \sin K_{yn1} y & \text{при } i = 2; \\ \sin K_{yn2}(b-y) & \text{при } i = 1. \end{cases} \quad (9)$$

Подставляя соотношение (9) в уравнение (2) для $E_{yi}(x, y, z, \tau)$, получим:

$$\left(F_{yi}^{(\exists)}\right)_{cm}(x, y, z, \tau) = \varepsilon_i \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \left(T_{mnp}''(\tau) + \omega_{mnp}^2 T_{mnp}(\tau)\right) \cdot \Phi_{yni}(y) \sin \frac{m\pi}{a} x \cdot \sin \frac{p\pi}{l} z. \quad (10)$$

Соотношение (10) есть разложение функции источника ЭМ поля в ряд Фурье по собственным ортогональным функциям. Применяя обратное преобразование Фурье, получим:

$$T_{mnp}''(\tau) + \omega_{mnp}^2 T_{mnp}(\tau) = \vartheta_{mnp i}(\tau), T_{mnp}''(\tau) + \omega_{mnp}^2 T_{mnp}(\tau) = \vartheta_{mnp i}(\tau), \quad (11)$$

где

$$\left(\vartheta_{mnp}\right)_i(\tau) = \frac{1}{\varepsilon_i \mu} \cdot \frac{1}{(W_{mnp})_i^2} \int_0^a \int_0^b \int_0^l \left(F_{yici}^{(M)}(x, y, z, \tau)\right) \cdot \Phi_{yni}(y) \cos \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{p\pi}{l} z dx dy dz \\ (W_{mnp})_i^2 = \int_0^a \int_0^b \int_0^l \left(\Phi_{yni}^2(y) \cos^2 \frac{m\pi}{a} x \cos^2 \frac{p\pi}{l} z\right) dx dy dz. \quad (12)$$

Решение уравнения (11), проведенное методом вариации произвольной постоянной, имеет вид:

$$T_{mnp}(\tau) = \frac{1}{\omega_{mnp}} \int \vartheta_{qmp}(\tau) \sin \omega_{mnp}(\tau - \xi) d\xi + c_0. \quad (13)$$

Определив E_{yi} с помощью соотношений (1), найдём ЭМ поле в образце, что однозначно определяет тепловой источник в образце. Аналогично проводится и решение ВКЗЭ для Н-типов колебаний.

Аналогичным образом решается ВКЗТ. Тепловое поле в образце определяется решением уравнения теплопроводности:

$$\frac{1}{a_T^2} \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \nabla^2 t(x, y, z, \tau) + \frac{q_V(x, y, z, \tau)}{\lambda_T}, \quad (14)$$

где a_T, λ_T – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности; q_V – удельная плотность тепловых источников:



$$q_V(x, y, z, \tau) = 0,5 \frac{\varepsilon_M \omega}{V_M} (|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2), \quad (15)$$

при этом составляющие ЭМ поля E_x, E_y, E_z определяются из решения ВКЗЭ.

Основной теплообмен нагреваемой пластины с окружающей средой наблюдается со стороны верхней и нижней поверхностей по закону Ньютона-Рихмана, при этом считается, что торцевые поверхности пластины теплоизолированы:

$$\lambda_T \frac{\partial t(\vec{r}, \tau)}{\partial y} = \pm \alpha_T (t(\vec{r}, \tau) - t_{cp}) \Big|_{S_n}; \quad \frac{\partial t(\vec{r}, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial t(\vec{r}, \tau)}{\partial z} = 0 \Big|_{S_4}, \quad (16)$$

где S_3 – верхняя и нижняя поверхности пластины; S_4 – торцевая поверхность. Проводя решение уравнения теплопроводности аналогично ВКЗЭ и удовлетворяя условию (16), получим:

$$-t(\vec{r}, \tau) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\vartheta_{mnp}^*}{(\alpha_T K_{nT})^2} (1 - e^{-(\alpha_T K_{nT})^2 \tau}) \cdot \Phi_{mnp}^*(x, y, z), \quad (17)$$

где

$$\vartheta_{mnp}^*(\tau) = \frac{1}{W_{mnp}^2} \iiint_V \frac{q_V(x, y, z, \tau)}{c_T \rho_T} \cdot \Phi_{mnp}^*(x, y, z) dx dy dz; \quad W_{mnp}^2 = \iiint_V (\Phi_{mnp}^*)^2(x, y, z) dx dy dz, \quad (18)$$

где c_m, ρ_m – удельные теплоемкости и плотность материала, Φ_{mnp}^* – собственные тепловые функции ВКЗТ.

$$\Phi_{mnp}(x, y, z) = \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cdot F_{Tn}(y) \cos\left(\frac{p\pi}{l} z\right); \quad F_{Tn}(y) = \cos K_{nT} y - \frac{\lambda_T K_{nT}}{\alpha_n} \cdot \sin K_{nT} y, \quad (19)$$

при этом собственные тепловые числа K_{nT} – определяются из дисперсионного уравнения:

$$\frac{\tau \xi_n}{\xi_n} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{\left(\frac{\lambda_T \xi_n}{d}\right)^2 - \alpha_1 \alpha_2}, \quad (20)$$

где $x_n = K_{nT} d$; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи с верхней и нижней поверхности пластины. Таким образом, соотношения (1), (6)-(9), (12), (13), (17)-(20) представляют собой решение ВКЗЭиТ для РК с двухслойным диэлектрическим заполнением, которое позволяет рационально реализовать СВ РК микроволновых устройств стационарного типа для более равномерного распределения структуры поля внутри сушеного продукта, а также увеличить КПД электротехнологического процесса сушки.

Заключение. Зерносушильные установки и комплексы незаменимы в технологиях послеуборочной обработки сельскохозяйственной продукции, в частности товарного зерна. Продукция с большим содержанием влаги плохо хранится, горит, теряет свои свойства. Достаточно большое количество топлива уходит на доведения продукта до кондиционной для хранения влажности конвективным способом. В связи с этим использование комбинированных микроволново-конвективных методов сушки для снижения влагосодержания продукта носит актуальный и практически значимый характер. Однако использование микроволновых технологий представляется достаточно сложной для технической реализации задачей, т.к. распределение микроволнового поля внутри рабочей камеры носит неравномерный характер, что ведет к низкому КПД передачи энергии. В настоящей статье разработана математическая модель процесса комбинированной микроволново-конвективной сушки в сушильных камерах с подводом СВЧ-энергии при динамически перемещающимся продукте. Это позволит рассчитывать технические параметры подвода энергии СВЧ-поля для установок сушки, повышать эффективность действующих установок, разрабатывать универсальные программные продукты для технических расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Четвериков Е.А., Шестаев А.Е. Обоснование параметров сушки зерна микроволновым полем // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. Саратов, 2018. С. 29-30.
2. Морозов С.М., Реут В.А. Электродинамическое моделирование СВЧ-установок // Теория и практика современной науки. 2016. № 12(18).
3. Volgin A.V., Kargin V.A., Chetverikov E.A., Moiseev A.P., Lagina L.A. Improving the efficiency of convective grain drying by using low-intensity RF radiation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022; 954 (1): 012017





4. Ганеев И.Р., Тагирова А.А., Каримов Х.Т., Масалимов И.Х. Влияние режимов сушки с применением СВЧ-нагрева на ферментативную активность, энергию прорастания и всхожесть семян рапса // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2021. № 1 (57). С. 92-98.

5. Горелов М.В., Бастрон Т.Н. Установка для предпосевной обработки и сушки семян СВЧ-энергией // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 3 (83). С. 195-198.

6. Ганеев И.Р., Каримов Х.Т., Масалимов И.Х. Исследование режимов сушки семян подсолнечника в СВЧ-установке непрерывного действия // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2017. № 2 (42). С. 67-71.

7. Кокорев А.В., Логачёв А.В., Заплетина А.В. Анализ установок для предпосевной обработки семян овощных культур ЭМП СВЧ // Инновационные тенденции развития российской науки: материалы X Междунар. науч.-практич. конф. молодых учёных, посвящ. Году экологии и 65-летию Красноярского ГАУ. Красноярск, 2017. С. 121-124.

8. Бастрон А.В., Василенко А.А., Горелов М.В. Обработка семян СВЧ-энергией // Сельский механизатор. 2017. № 4. С. 14-15.

9. Горелов М.В., Бастрон Т.Н. Исследование режимов обработки семян сосны в ЭМП СВЧ // Вестник ИрГЦХА. 2017. Вып. 81/2. С. 55-61.

10. Чуринова М.С. Учет и использование нелинейности и распределение параметров процесса сушки зерна // Вестник Омского государственного аграрного университета 2017, № 1 (25). С. 126-131.

11. Сивяков Д.Б. Камера с бегущими волнами на волноводе, свернутом в кольцо // Вопросы электротехнологии. 2017. № 2. С. 29-33.

12. Сивяков Б.К., Григорьян С.В. Установка СВЧ сушки сельскохозяйственных продуктов в фермерских хозяйствах // Вопросы электротехнологии. 2019. № 1. С. 9-13.

13. Sivyakov B.K., Grigorjan S.V., Sivyakov D.B. Mathematical model of microwave camera on the groovewaveguide with additional injection of the microwave energy // International conference on actual problems of electron devices engineering, APEDE. 2018. Vol. 1. P. 334-337.

14. Цугленок Г.И., Заплетина А.В. Исследования влияния параметров СВЧ энергии на качественные и количественные показатели семян гречихи // Вестник Красноярского ГАУ. 2008. № 6. С. 157-165.

15. Исаев А.В., Бастрон А.В., Яхонтова В.С. Исследование влияния степени неравномерности нагрева семян рапса в ЭМП СВЧ на их энергию прорастания и всхожесть // Вестник Красноярского ГАУ. 2016. № 4. С. 131-137.

REFERENCES

1. Chetverikov E.A., Shestaeв A.E. Justification of parameters for grain drying using a microwave field. *Current problems of energy in the agro-industrial complex*. Saratov, 2018: 29-30.

2. Morozov S.M., Reut V.A. Electrodynamic modeling of microwave installations. *Theory and practice of modern science*. 2016; 12(18).

3. Volgin A.V., Kargin V.A., Chetverikov E.A., Moiseev A.P., Lagina L.A. Improving the efficiency of convective grain drying by using low-intensity RF radiation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 954(1):012017

4. Ganeev I.R., Tagirova A.A., Karimov Kh.T., Masalimov I.Kh. The influence of drying modes using microwave heating on enzymatic activity, germination energy and germination of rapeseeds. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2021; 1 (57): 92-98.

5. Gorelov M.V., Bastron T.N. Installation for pre-sowing treatment and drying of seeds using microwave energy. *News of the Orenburg State Agrarian University*. 2020; 3 (83): 195-198.

6. Ganeev I.R., Karimov Kh.T., Masalimov I.Kh. Study of drying modes of sunflower seeds in a continuous microwave installation. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2017; 2 (42): 67-71.

7. Kokorev A.V., Logachev A.V., Zapletina A.V. Analysis of installations for pre-sowing treatment of vegetable seeds with microwave EMF. *Innovative trends in the development of Russian science*. Krasnoyarsk, 2017: 121-124.

8. Bastron A.V., Vasilenko A.A., Gorelov M.V. Treatment of seeds with microwave energy. *Rural machine operator*. 2017; 4: 14-15.

9. Gorelov M.V., Bastron T.N. Study of treatment modes for pine seeds in microwave EMF. *Bulletin of IrGSHA*. 2017; 81/2: 55-61.

10. Churina M.S. Accounting and use of nonlinearity and distribution of parameters of the grain drying process. *Bulletin of the Omsk State Agrarian University*. 2017; 1 (25): 126-131.

11. Sivyakov D.B. Chamber with traveling waves on a waveguide rolled into a ring. *Problems of electrotechnology*. 2017; 2: 29-33.

12. Sivyakov B.K., Grigoryan S.V. Installation of microwave drying of agricultural products on farms. *Issues of electrotechnology*. 2019; 1: 9-13.

13. Sivyakov B.K., Grigorjan S.V., Sivyakov D.B. Mathematical model of microwave camera on the groovewaveguide with additional injection of the microwave energy. *International conference on actual problems of electron devices engineering, APEDE*. 2018; 1: 334-337.

14. Tsuglenok G.I., Zapletina A.V. Research on the influence of microwave energy parameters on the qualitative and quantitative indicators of buckwheat seeds. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2008; 6: 157-165.

15. Isaev A.V., Bastron A.V., Yakhontova V.S. Study of the influence of the degree of uneven heating of rapeseed seeds in a microwave EMF on their germination energy and germination. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2016; 4: 131-137.

Статья поступила в редакцию 6.07.2023; одобрена после рецензирования 29.07.2023; принята к публикации 11.08.2023.

The article was submitted 6.07.2023; approved after reviewing 29.07.2023; accepted for publication 11.08.2023.