

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.53.027.33

DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-59-65

УСТРОЙСТВО И СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ СВЧ-ОБРАБОТКОЙ СЕМЯН НА КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЕ

МАЛАХОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ[✉], аспирант

alex23flame@gmail.com[✉]

ВЕНДИН СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, д-р техн. наук, профессор

elapk@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0482-6657>; Researcher ID: Q-8148-2017

Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина; 308503, Российская Федерация Белгородская обл., Белгородский район, п. Майский, ул. Вавилова, д. 1

Аннотация. Посевные качества семян – такие, как всхожесть, энергия прорастания, масса 1000 семян и др., являются одной из составляющих получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур. Технологические приёмы обработки семян и зерна энергией электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) предполагают использование различных типов СВЧ-устройств, различающихся как по принципу действия, так и по конструктивному исполнению. По сути процесс СВЧ-обработки семян аналогичен процессу термообработки диэлектрических материалов. Следовательно, в зависимости от поставленной цели обработки СВЧ-устройства должны обеспечивать избирательность СВЧ-нагрева, высокий коэффициент преобразования СВЧ-энергии в тепловую, равномерность СВЧ-обработки объёма материала, защиту СВЧ-генератора и электромагнитную безопасность. При СВЧ-обработке семян важно обеспечить равномерность обработки объёма семян и автоматически поддерживать оптимальные режимы обработки (режимы СВЧ-нагрева). Для СВЧ-обработки семян предлагается конструкция установки. Особенностью предлагаемой конструкции является то, что обработка семян производится на движущейся ленте под излучателем с контролем и управлением процессом по скорости и конечной температуре нагрева, а также обеспечением согласования СВЧ-источника с нагрузкой (слоем семян на транспортёрной ленте). Предлагается также алгоритм реализации микропроцессорного управления устройством. Таким образом, предлагаемая конструкция установки для обработки семян в слое под излучателем на движущейся транспортёрной ленте, а также технологический алгоритм согласования СВЧ-источника с нагрузкой позволяют обеспечить гарантированное соблюдение режимов обработки в строго заданных диапазонах конечной температуры и скорости СВЧ-нагрева материала, а также защиту СВЧ-источника от отражённых электромагнитных волн.

Ключевые слова: семена, СВЧ-обработка, СВЧ-источник, микропроцессор, управление, режимы обработки, согласование с нагрузкой.

Формат цитирования: Малахов А.Н., Вендин С.В. Устройство и способ управления СВЧ-обработкой семян на конвейерной ленте // Агроинженерия. 2021. № 4(104). С. 59-65. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-59-65.

© Малахов А.Н., Вендин С.В., 2021



ORIGINAL PAPER

DEVICE AND METHOD FOR CONTROLLING MICROWAVE SEED TREATMENT ON A CONVEYOR BELT

ALEKSANDR N. MALAKHOV[✉], postgraduate student

alex23flame@gmail.com[✉]

SERGEY V. VENDIN, DSc (Eng), Professor

elapk@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0482-6657>; Researcher ID: Q-8148-2017

Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin; 1, Vavilova Str., Maysky settlement, Belgorod region, 308503, Russian Federation

Abstract. The sowing qualities of seeds – such as germination, germination energy, weight of 1000 seeds, etc., are the factors ensuring high yields of agricultural crops. Technological methods of seed and grain treatment with the UHF

MEMF (microwave electromagnetic field of ultrahigh frequency) energy involve the use of various types of microwave devices, differing both in operating principle and in design. In fact, the process of microwave treatment of seeds is similar to the process of heat treatment of dielectric materials. Therefore, depending on the goal of treatment, microwave devices should provide some kind of selectivity of microwave heating, a high conversion factor of microwave energy into thermal energy, uniformity of microwave treatment of the bulk of material, protection of the microwave generator and electromagnetic safety. During the microwave treatment of seeds, it is important to ensure uniform treatment of the bulk of seeds and automatically maintain optimal treatment modes (microwave heating modes). An installation design is proposed for microwave treatment of seeds. A specific feature of the proposed design is that seeds are processed on a moving belt under an emitter with the process control and regulation according to the speed and final heating temperature. Moreover, the microwave source intensity depends on the load (a layer of seeds on the conveyor belt). The authors also propose an algorithm for the microprocessor control of the device. Thus, the proposed design of the installation for treating seeds in a layer under the emitter on a moving conveyor belt, as well as the technological algorithm for matching the microwave source with the load ensure the compliance with the processing modes in strictly specified ranges of the final temperature and microwave heating rate of the material, as well as protect the microwave source from reflected electromagnetic waves.

Key words: seeds, microwave treatment, microwave source, microprocessor, control, treatment modes, load coordination.

For citation: Malakhov A.N., Vendin S.V. Device and method for controlling microwave seed treatment on a conveyor belt. *Agricultural Engineering*, 2021; 4 (104): 59-65. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-59-65.

Введение. Посевные качества семян – такие, как всхожесть, энергия прорастания, масса 1000 семян и др., являются одной из составляющих получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур. В агрономии имеется целый арсенал средств и методов предпосевной и послеуборочной обработки семян включая электрофизические методы воздействия с применением инфракрасного излучения [1], электромагнитных полей сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) [2-5] и др.

Технологические приёмы обработки семян и зерна энергией электромагнитного поля сверхвысокой частоты предполагают использование различных типов СВЧ-устройств, различающихся как по принципу действия, так и по конструктивному исполнению. По сути процесс СВЧ-обработки семян аналогичен процессу термообработки диэлектрических материалов. Следовательно, в зависимости от поставленной цели обработки СВЧ-устройства должны обеспечивать избирательность СВЧ-нагрева, высокий коэффициент преобразования СВЧ-энергии в тепловую, равномерность СВЧ-обработки объёма материала, защиту СВЧ-генератора и электромагнитную безопасность [6-10].

При СВЧ-обработке семян важно обеспечить равномерность обработки объёма семян и автоматически поддерживать оптимальные режимы обработки (режимы СВЧ нагрева). В связи с этим вопросы разработки технологических приёмов, конструкций, способов, а также математических моделей и методов расчета СВЧ-устройств являются актуальными.

Цель исследований: разработка конструкции и способа управления режимами работы для технологической обработки зерна и семян, обеспечивающих согласование СВЧ-источника со слоем семян по минимуму коэффициента отражения и контроль режимов обработки.

Материалы и методы. Исследования проводились на основе патентного поиска и анализа литературы о конструкции устройств и способов СВЧ-обработки сельскохозяйственных материалов, а также с учетом результатов теоретических исследований

электродинамики распространения электромагнитных волн в слоистых средах.

Результаты и обсуждение. Большинство установок СВЧ-обработки различных материалов предусматривает обработку объёма продукта в специальной камере (объёмном резонаторе).

СВЧ-обработка семян и зерна может быть реализована различными технологическими приёмами и на устройствах различных конструкций: обработка порций материала под излучателем; обработка слоя материала на конвейерной ленте под излучателем; обработка объёма (потока) продукта в проходном объёмном резонаторе; обработка объёма материала в объёмном резонаторе периодического действия. При этом основная проблема, возникающая при СВЧ-обработке материала в замкнутом объёме (объёмном резонаторе), заключается в неравномерности обработки (нагрева) различных областей объёма материала.

Отметим, что семена, поступающие на СВЧ-обработку, содержат определенное количество влаги. Поэтому в общем случае процесс СВЧ-нагрева должен сопровождаться влагоудалением (подсушкой семян), и часть выделяемой теплоты будет расходоваться на испарение влаги. При рассмотрении кинетики таких процессов представленные в работах [11-14] математические модели могут быть использованы для управления процессом СВЧ-обработки и сушки семян с контролем конечной температуры нагрева. Изменение влагосодержания продукта также сказывается на изменении его теплофизических и электрофизических характеристик, что, несомненно, отражается на кинетике процесса при достаточно продолжительном СВЧ-нагреве. Однако следует учесть, что процессы СВЧ-обработки семян с целью их предпосевной стимуляции являются кратковременными (до 60 с). В этом случае погрешности, вносимые изменением влагосодержания семян, не оказывают сильного влияния на изменение количественных значений теплофизических и электрофизических характеристик семян, а также скорости СВЧ-нагрева семян. При этом исходная влажность семян является существенным фактором для кинетики

нагрева. Поэтому для создания алгоритма управления можно воспользоваться математическими моделями СВЧ-нагрева семян [15].

Другая причина неравномерности СВЧ-обработки обусловлена тем, что термический эффект диэлектрического нагрева зависит от модуля напряжённости электрического поля. Неравномерность электрического поля в объёме рабочей камеры связана с затуханием электромагнитной волны, отражением и наложением волн с образованием зон минимальной и максимальной напряжённости электрического поля. Кроме того, скорость и конечная температура СВЧ-нагрева определяются не только удельной поглощаемой в единице объёма материала СВЧ-мощностью, но и теплофизическими характеристиками продукта, а также условиями теплообмена в системе. Следовательно, с технологических позиций важно обеспечить минимальную разницу температуры внутри объёма обрабатываемого материала.

Указанные обстоятельства позволяют сделать вывод о том, что СВЧ-обработка слоя семян под излучателем на движущейся ленте имеет определенные

преимущества перед обработкой в замкнутом объёме рабочей камеры. При обработке слоя семян на ленте под излучателем конструктивно проще обеспечить достаточную равномерность обработки слоя семян и обеспечить контроль процесса СВЧ-обработки по таким параметрам, как скорость и конечная температура нагрева семян. Однако при обработке слоя семян на ленте необходимо обеспечивать хорошее согласование СВЧ-источника с нагрузкой (слоем материала) по минимуму коэффициента отражения электромагнитной волны от поверхности слоя.

Для СВЧ-обработки семян предлагается конструкция установки, технологическая схема которой представлена на рисунке 1.

Особенностью предлагаемой конструкции является то, что обработка семян производится на движущейся ленте под излучателем с контролем и управлением процессом по скорости и конечной температуре нагрева, а также с обеспечением согласования СВЧ-источника с нагрузкой (слоем семян на транспортёрной ленте). Теоретическое обоснование параметров технологической схемы приведено в работах [16-17].

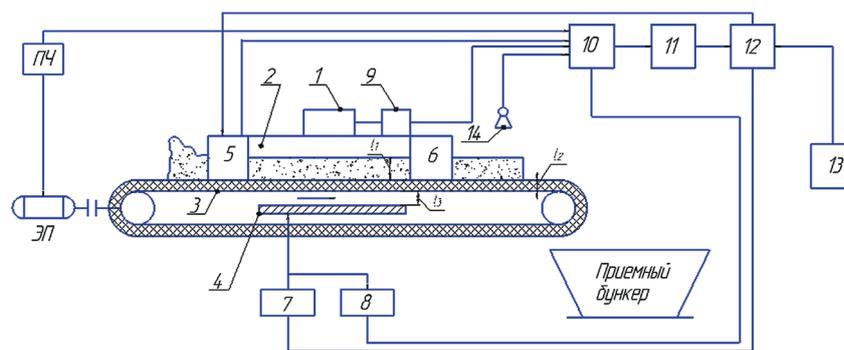


Рис. 1. Технологическая схема СВЧ-установки для обработки семян в слое:

1 – источник электромагнитных колебаний; 2 – камера; 3 – конвейерная лента; 4 – экран; 5 – устройство загрузки; 6 – устройство выгрузки; 7 – привод экрана; 8 – датчик перемещения экрана; 9 – датчик коэффициента отражения; 10 – мультиплексор; 11 – аналого-цифровой преобразователь; 12 – микропроцессорное устройство; 13 – клавиатура; 14 – пирометр; ПЧ – преобразователь частоты; ЭП – электропривод ленточного транспортёра

Fig. 1. Technological scheme of a microwave installation for processing of a seed layer:

1 – source of electromagnetic oscillations; 2 – camera; 3 – conveyor belt; 4 – screen; 5 – loading device; 6 – unloading device; 7 – screen drive; 8 – screen movement sensor; 9 – reflection coefficient sensor; 10 – multiplexer; 11 – analog-to-digital converter; 12 – microprocessor device; 13 – keyboard; 14 – pyrometer; ПЧ – frequency converter; ЭП – electric drive of the belt conveyor

Алгоритм определения конструктивных и технологических параметров для реализации предложенной конструкции СВЧ-установки. Основными условиями для обеспечения режима СВЧ-обработки семян являются конечная температура нагрева семян на выходе T_k (°C) и средняя скорость нагрева $\partial T / \partial t$ (°C/c). Производительность установки Q (кг/ч), устанавливаемая (установленная) СВЧ-мощность $P_{\text{СВЧ}}$ (кВт), а также конструктивные и технологические параметры связаны между собой соотношением:

$$Q = 3600 P_{\text{СВЧ}} v / (P_{\text{уд}} l), \quad (1)$$

где l – длина рабочей зоны (облучателя) установки, м; v – скорость движения ленты транспортёра, м/с; $P_{\text{уд}}$ – удельная мощность СВЧ воздействия, кВт/кг.

Выражение (1) по сути отражает зависимость установленной СВЧ-мощности $P_{\text{СВЧ}}$ (кВт) от производительности установки Q (кг/ч) и времени обработки (СВЧ-нагрева) t_n (с):

$$P_{\text{СВЧ}} = Q P_{\text{уд}} t_n / 3600. \quad (2)$$

В то же время такие параметры, как удельная мощность СВЧ-воздействия $P_{\text{уд}}$ (кВт/кг) и время обработки (СВЧ-нагрева) t_n (с), однозначно могут быть определены только с учетом кинетики процесса СВЧ-нагрева (математической модели СВЧ-нагрева).

Среднее время обработки (СВЧ-нагрева) t_n (с) можно определить с учетом начальной температуры семян T_0 (°C), конечной температуры нагрева семян на выходе

из установки T_k (°C) и рекомендуемой скорости нагрева $\partial T / \partial t$ (°C/c):

$$t_n = \frac{(T_k - T_0)}{\partial T / \partial t} \tag{3}$$

Однако обеспечить заданное значение конечной температуры нагрева семян на выходе из установки T_k (°C) и рекомендуемой скорости нагрева $\partial T / \partial t$ (°C/c) можно только правильным выбором удельной мощности СВЧ-воздействия $P_{уд}$ (кВт/кг). Если использовать результаты теоретических исследований процесса СВЧ-нагрева семян [15], то удельная мощность СВЧ-воздействия $P_{уд}$ (кВт/кг) может быть оценена с учетом графиков кинетики процесса СВЧ-нагрева для центра зерновки (семени) $\dot{T}(0, t_n)$ при $P_{уд} = 1$ кВт/кг [15]:

$$P_{уд} = (\dot{T}(0, t_n) - T_0) / \left(20 \left[\frac{\Theta}{q_m} \right] \right), \tag{4}$$

где $\dot{T}(0, t_n)$ – температура нагрева центра зерновки ($\dot{T}(0, t_n) = T_k$), °C; $[\Theta / q_m]$ – точка относительной температуры СВЧ нагрева семени на графике при $t = t_n$, о.е.

Скорость движения ленты может быть первоначально выбрана исходя из длины рабочей зоны (облучателя) установки l (м) и среднего времени обработки (СВЧ-нагрева) t_n (с):

$$v = l / t_n. \tag{5}$$

Согласно выражению (2) устанавливаемая мощность СВЧ-источника $P_{свч}$ (кВт) определяется производительностью установки Q (кг/ч). Производительность установки будет зависеть от режимов обработки, но в общем случае она определяется высотой слоя зерна на ленте h (м), шириной ленты b (м) и скоростью движения ленты транспортера v (м/с):

$$Q = 3600hbv. \tag{6}$$

В качестве примера для термической обработки семян пшеницы влажностью 10% с начальной температурой $T_0 = 20^\circ\text{C}$ до конечной температуры $T_k = 42^\circ\text{C}$ при скорости нагрева $\partial T / \partial t = 0,4^\circ\text{C/c}$ на ленте транспортера производительностью $Q = 1000$ кг/ч и длине рабочей зоны (облучателя) установки $l = 0,5$ м другие конструктивно-технологические параметры будут равны: $t_n = 55$ с; $v = 0,01$ м/с; $[\Theta / q_m] = 1,8$ о.е.; $P_{уд} = 0,67$ кВт/кг; $P_{свч} = 10,18$ кВт.

Особенностью конструкции СВЧ-установки является также то, что толщина l_2 конвейерной ленты 3, выполненной из диэлектрика, выбирается с учетом длины электромагнитной волны и относительной диэлектрической проницаемости материала ленты. Толщину слоя обрабатываемого материала l_1 поддерживают на определенном уровне с учетом проводимости обрабатываемого материала и его относительной диэлектрической проницаемости.

Для согласования СВЧ-источника с нагрузкой под лентой устанавливают регулируемый электромагнитный экран 4 на расстоянии от нее l_3 , зависящем от проводимости обрабатываемого материала и его относительной диэлектрической проницаемости. Формулы для расчета конструктивных параметров электродинамического

согласования по коэффициенту отражения приведены в работах [16-17]. В процессе работы контролируется суммарный коэффициент отражения и обеспечивается поддержание его минимума путем перемещения электромагнитного экрана.

Температура нагрева семян контролируется датчиком температуры (пирометром) 14. Непосредственно регулирование скорости и конечной температуры нагрева семян обеспечивается изменением скорости движения ленты транспортера за счет регулируемого электропривода.

Следует отметить, что несмотря на определенные технические преимущества разработанной конструкции для установок, работающих с использованием энергии электромагнитных полей СВЧ, необходимо обеспечивать меры безопасности на предельно-допустимые нормы электромагнитного излучения.

Представленный технологический алгоритм согласования реализуется с помощью исполнительных механизмов и микропроцессорного устройства управления. Основу системы управления составляет программируемый логический контроллер, включенный в единую систему с СВЧ-источником, электроприводом электромагнитного экрана, датчиками коэффициента отражения, датчиком температуры и регулируемым электроприводом. В качестве основы системы управления могут быть применены микропроцессорные регуляторы компании ОВЕН ТРМ, так как приборы данной компании по соотношению «Цена-качество» занимают высокие позиции на рынке.

На рисунке 2 приведена схема-алгоритм реализации микропроцессорного управления устройством.

Согласно приведенному алгоритму основная последовательность действий заключается в следующем: ввод параметров обрабатываемого продукта (проводимости обрабатываемого материала g и относительной диэлектрической проницаемости ϵ); расчёт толщины слоя обрабатываемого продукта l_1 ; расчёт расстояния между конвейерной лентой и электромагнитным экраном l_3 ; расчёт суммарного коэффициента отражения R . Затем расчётные значения устанавливаются в рабочей зоне, включаются электропривод ленты транспортера и СВЧ-источник. Происходит обработка продукта. При нарушении согласования СВЧ-источника по сигналу датчика коэффициента отражения происходит перемещение экрана. При отклонении режима СВЧ-нагрева слоя семян по сигналу от датчика температуры регулируемый электропривод ускоряет или замедляет скорость движения ленты транспортера.

Таким образом, предлагаемая конструкция установки для обработки семян в слое под излучателем на движущейся транспортёрной ленте и способ управления режимами работы для технологической обработки зерна и семян обеспечивают согласование СВЧ-источника со слоем семян по минимуму коэффициента отражения и контроль режимов обработки. Практическая реализация разработки позволит обеспечить гарантированное соблюдение режимов обработки в строго заданных диапазонах конечной температуры и скорости СВЧ-нагрева материала, а также защиту СВЧ-источника от отражённых электромагнитных волн. Указанные преимущества повышают надёжность технологического процесса СВЧ-обработки семян и зерна, а также надёжность работы установки.

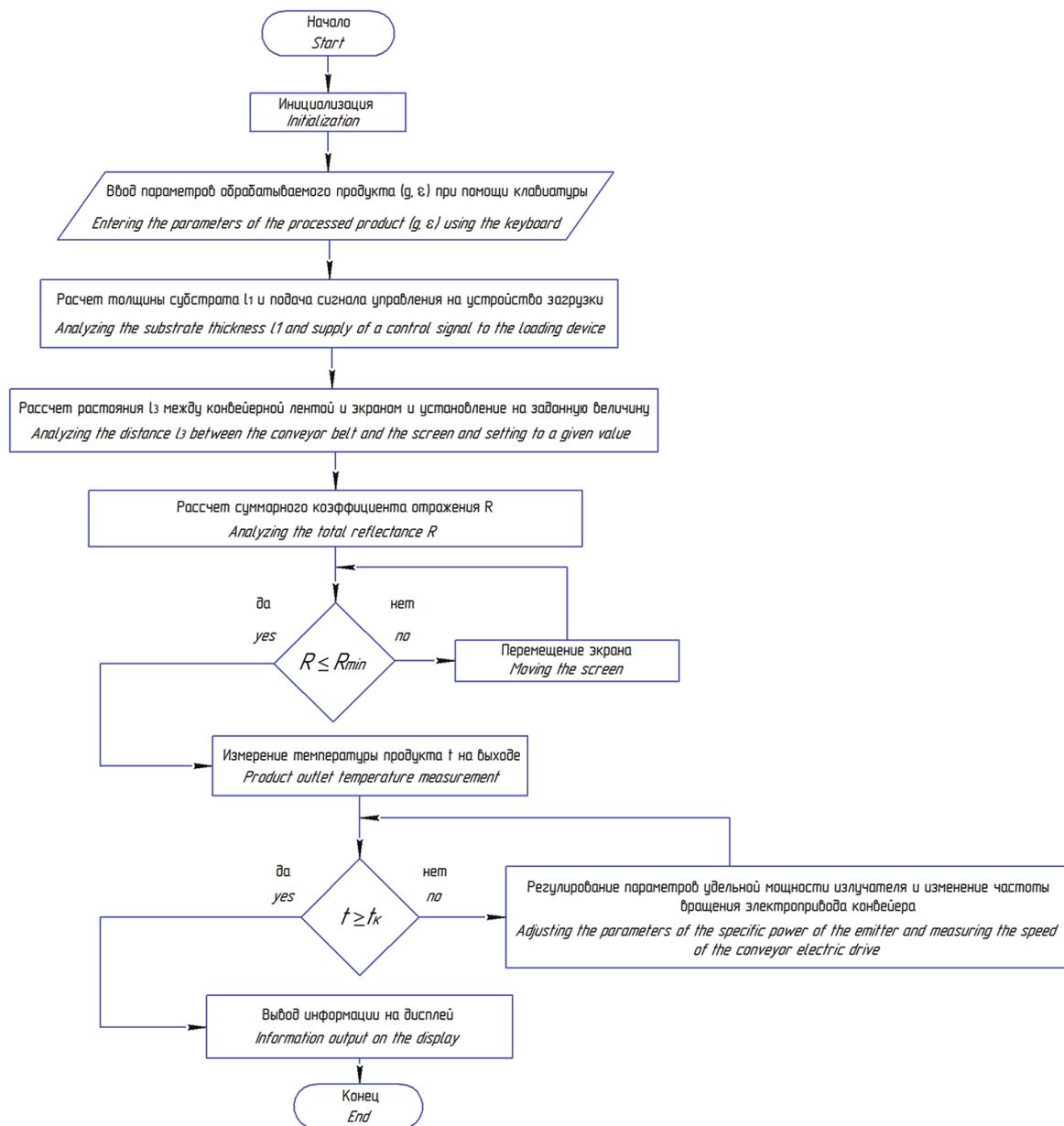


Рис. 2. Алгоритм управления процессом СВЧ-обработки семян

Fig. 2. Algorithm for controlling the microwave treatment of seeds

Выводы

Предлагаемая конструкция установки для обработки семян в слое под излучателем на движущейся транспортёрной ленте, а также технологический алгоритм

согласования СВЧ-источника с нагрузкой позволяют обеспечить гарантированное соблюдение режимов обработки в строго заданных диапазонах конечной температуры и скорости СВЧ-нагрева материала, а также защиту СВЧ-источника от отражённых электромагнитных волн.

Библиографический список

1. Рудобашта С.П., Григорьев И.В. Импульсная инфракрасная сушка семян овощных культур, нетрадиционных и редких растений // Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33. № 8. С. 85-90.
2. Вендин С.В. Экспериментальные исследования процессов СВЧ обработки семян: Монография. Москва-Белгород: ООО «ЦКБ «БИБКОМ», 2017. 116 с.
3. Vendin S.V., Saenko Y.V., Kitaeva O.V. et al. Results of experimental studies on using MWF electromagnetic field energy for pre-sowing treatment of grain crops. International

References

1. Rudobashta S.P., Grigoriev I.V. Impul'snaya infrakrasnaya sushka semyan ovoshchnykh kul'tur, netraditsionnykh i redkikh rasteniy [Pulse infrared drying of vegetable seeds, non-traditional and rare plants]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2011; 33(8): 85-90. (In Rus.)
2. Vendin S.V. Eksperimental'nye issledovaniya protsessov SVCH obrabotki semyan: Monografiya [Experimental studies of microwave seed treatment processes: Monograph]. Moscow-Belgorod: ООО "TSKB "BIBKOM", 2017: 116. (In Rus.)

Journal of Advanced Science and Technology. 2020; 29 (3): 3747-3763.

4. Васильев А.А. Разработка исходных требований для усовершенствованной установки СВЧ-конвективной обработки зерна // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 2 (27). С. 108-111.

5. Белов А.А., Коробков А.Н. Способ обеззараживания зерна в электромагнитном поле сверхвысокой частоты // Вестник НГИЭИ. 2015. № 2(45). С. 5-12.

6. Васильев А.Н., Будников Д.Н., Васильев А.А. Компьютерная модель тепло-влагообмена в зерновом слое при СВЧ-конвективном воздействии // Инженерный вестник Дона. 2017. № 3 (46). С. 47.

7. Васильев А.Н., Оспанов А.Б., Будников Д.А. и др. Тепловая обработка зерна под воздействием электромагнитных полей // Вестник Могилевского государственного университета продовольствия. 2017. № 1 (22). С. 99-102.

8. Васильев А.А. Анализ исследований процессов нагрева и теплообмена в блоках питания магнетронов СВЧ установок сельскохозяйственного назначения // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 3 (28). С. 26-32.

9. Васильев А.А., Васильев А.Н., Будников Д.А. и др. Моделирование и результаты предпосевной СВЧ и конвективно-тепловой обработки семян // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67. № 4 (41). С. 35-43. DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-4-35-43

10. Белов А.А., Жданкин Г.В., Новикова Г.В. и др. Разработка и обоснование параметров установки с движущимися источниками сверхвысокочастотной энергии для термообработки сырья // Вестник НГИЭИ. 2017. № 7 (74). С. 44-54.

11. Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуев Н.А. Тепло-массоперенос при сушке в осциллирующем электромагнитном поле // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45. № 6. С. 641-647.

12. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Карташов Э.М. Тепло-массоперенос при сушке сферической частицы в осциллирующем электромагнитном поле // Теоретические основы химической технологии. 2016. Т. 50. № 5. С. 539-550. DOI: 10.7868/S0040357116050109

13. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Карташов Э.М. Тепло-массоперенос при сушке цилиндрического тела в осциллирующем электромагнитном поле // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 1. С. 241-251.

14. Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуева Г.А. Тепло-массоперенос при сушке пластины в непрерывно действующем электромагнитном поле высокой и сверхвысокой частоты // Теоретические основы химической технологии. 2021. Т. 55. № 2. С. 195-203. DOI: 10.31857/S0040357121020093

15. Вендин С.В. Теория и математические методы анализа тепловых процессов при СВЧ обработке семян: Монография. Москва; Белгород: ООО ЦКБ «БИБКОМ», 2016. 143 с.

16. Вендин С.В. Теория и математические методы анализа электродинамики процессов СВЧ обработки семян: Монография. Москва-Белгород: ООО «ЦКБ «БИБКОМ», 2015. 137 с.

17. Вендин С.В. Технологические приемы СВЧ-обработки семян в слое // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2016. № 2 (10). С. 3-11.

3. Vendin S.V., Saenko Y.V., Kitaeva O.V. et al. Results of experimental studies on using MWF electromagnetic field energy for pre-sowing treatment of grain crops. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2020; 29 (3): 3747-3763.

4. Vasiliev A.A. Razrabotka iskhodnykh trebovaniy dlya usovershenstvovannoy ustanovki SVCH-konvektivnoy obrabotki zerna [Development of initial requirements for an improved installation of microwave convective grain treatment]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*, 2018; 2 (27): 108-111. (In Rus.)

5. Belov A.A., Korobkov A.N. Sposob obezzarazhivaniya zerna v elektromagnitnom pole sverkhvysokoy chasty [Method for disinfecting grain in an electromagnetic field of ultrahigh frequency]. *Vestnik NGIEI*, 2015; 2 (45): 5-12. (In Rus.)

6. Vasiliev A.N., Budnikov D.N., Vasiliev A.A. Kompyuternaya model' teplo-vlagoobmena v zernovom sloye pri SVCH-konvektivnom vozdeystvii [Computer model of heat and moisture exchange in the grain layer under microwave convection]. *Inzhenerniy vestnik Dona*, 2017; 3 (46): 47. (In Rus.)

7. Vasiliev A.N., Ospanov A.B., Budnikov D.A. et al. Teplovaya obrabotka zerna pod vozdeystviyem elektromagnitnykh poley [Heat treatment of grain under the influence of electromagnetic fields]. *Vestnik Mogilevskogo gosudarstvennogo universiteta prodovol'stviya*, 2017; 1 (22): 99-102. (In Rus.)

8. Vasiliev A.A. Analiz issledovaniy protsessov nagreva i teploobmena v blokakh pitaniya magnetronov SVCH ustanovok sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Analysis of studies of heating and heat transfer processes in power supplies of magnetron microwave installations for agricultural purposes]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*, 2018; 3 (28): 26-32. (In Rus.)

9. Vasiliev A.A., Vasiliev A.N., Budnikov D.A. et al. Modelirovanie i rezul'taty predposevnoy SVCH i konvektivno-teplovoy obrabotki semyan [Modeling and results of pre-sowing microwave and convective-heat treatment of seeds]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovaniye v APK*, 2020; 4 (41): 35-43. DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-4-35-43. (In Rus.)

10. Belov A.A., Zhdankin G.V., Novikova G.V. et al. Razrabotka i obosnovanie parametrov ustanovki s dvizhushchimisya istochnikami sverkhvysokochastotnoy energii dlya termoobrabotki syr'ya [Designing and determining the parameters of the installation with moving sources of microwave energy for heat treatment of raw materials]. *Vestnik NGIEI*, 2017; 7 (74): 44-54. (In Rus.)

11. Rudobashta S.P., Kartashov E.M., Zuev N.A. Teplo-massoperenos pri sushke v ostilliruyushchem elektromagnitnom pole [Heat and mass transfer during drying in an oscillating electromagnetic field]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2011; 45(6): 641-647. (In Rus.)

12. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Kartashov E.M. Teplo-massoperenos pri sushke sfericheskoy chastitsy v ostilliruyushchem elektromagnitnom pole [Heat and mass transfer when drying a spherical particle in an oscillating electromagnetic field]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2016; 50 (5): 718-729. (In Rus.)

13. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Kartashov E.M. Teplomasoperenos pri sushke tsilindricheskogo tela v ostilliruyushchem

elektromagnitnom pole [Heat and mass transfer during drying of a cylindrical body in an oscillating electromagnetic field]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2018; 91(1): 241-251. (In Rus.)

14. Rudobashta S.P., Kartashov E.M., Zueva G.A. Teplo-massopereenos pri sushke plastiny v nepreryvno deystvuyushchem elektromagnitnom pole vysokoy i sverkhvysokoy chastoty [Heat and mass transfer during plate drying in a continuously operating electromagnetic field of high and ultrahigh frequency]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2021; 55(2): 195-203. DOI: 10.31857/S0040357121020093. (In Rus.)

15. Vendin S.V. Teoriya i matematicheskie metody analiza teplovykh protsessov pri SVCH obrabotke semyan: Monografiya [Theory and mathematical methods of analysis of thermal processes during microwave processing of seeds: Monograph]. Moscow; Belgorod: OOO TsKB "BIBKOM", 2016: 143. (In Rus.)

16. Vendin S.V. Teoriya i matematicheskie metody analiza elektrodinamiki protsessov SVCH obrabotki semyan: Monografiya [Theory and mathematical methods of analysis of electrodynamics of microwave seed treatment processes: Monograph]. Moscow-Belgorod: OOO TsKB "BIBKOM", 2015: 137. (In Rus.)

17. Vendin S.V. OOO «TSKB «BIBKOM», 2015. 137 s.
17. Vendin S.V. Tekhnologicheskie priyemy SVCH-obrabotki semyan v sloye [Technological methods of microwave treatment of seeds in a layer]. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy*, 2016; 2 (10): 3-11. (In Rus.)

Критерии авторства

Малахов А.Н., Вендин С.В. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Малахов А.Н., Вендин С.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.03.2021

Одобрена после рецензирования 20.04.2021

Принята к публикации 22.04.2021

Contribution

A.N. Malakhov, S.V. Vendin performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. A.N. Malakhov, S.V. Vendin have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 16.03.2021

Approved after reviewing 20.04.2021

Accepted for publication 22.04.2021