

Микроволновая сушка зерновых культур на основе свойств поверхностного волновода

¹**РИТТЕР Екатерина Сергеевна**, PhD, доцент, kritter315@gmail.com,

¹**САВОСТИН Алексей Александрович**, к.т.н., профессор, alexey.savostin@gmail.com,

^{1*}**РИТТЕР Дмитрий Викторович**, к.т.н., профессор, dritter7676@gmail.com,

¹**САВОСТИНА Галина Владимировна**, PhD, доцент, galinash85@mail.ru,

¹**СМИРНОВ Андрей Петрович**, докторант, gprsboost03@mail.ru,

¹Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, Казахстан, Петропавловск, ул. Пушкина, 86,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Целью данной работы является разработка более качественного способа микроволновой сушки семян зерновых культур путем создания нового функционала, позволяющего осуществлять равномерное распределение электромагнитной энергии микроволнового диапазона по всему объему зернового материала. В статье обсуждены преимущества предлагаемого способа: использование коллинеарной переизлучающей антенной решетки, применение вибраторной системы возбуждения поверхностных волн, применение магнетронов средней и малой мощности, не требующих согласования по фазе и частоте. Вибраторное устройство возбуждения поверхностных волн позволяет производить ступенчатую регулировку подводимой мощности к облучаемому зерновому материалу. В соответствии с проведенными исследованиями предложена схема установки для микроволновой сушки зерновых культур, в основе которой лежит поверхностный волновод, вибраторное устройство возбуждения поверхностных волн и эллиптический отражатель. Также даны рекомендации по проектированию оболочки эллиптического отражателя с целью защиты обслуживающего персонала от вредоносного микроволнового излучения.

Ключевые слова: микроволновая сушка, поверхностный волновод, переизлучающий вибратор, отражатель, распределение поля, поглощающая нагрузка.

Введение

Одним из приоритетных направлений в Республике Казахстан является развитие агропромышленного комплекса (АПК). Важнейшей задачей АПК Казахстана является увеличение производства и заготовок зерна, что неразрывно связано с постоянным развитием и совершенствованием технологий сушки.

Проведенный анализ существующих технологий сушки и конструкций сушильных установок показал, что данные методы и конструкции установок имеют ряд существенных недостатков (перегрев зерна, приводящий к пересыханию, большие габариты, неудобство транспортировки камер, низкий КПД).

Кроме того, применяемые на сегодняшний день сушильные установки рассчитаны на достаточно большой пропускной объем. В условиях небольших крестьянских хозяйств, где требуется экстренная, малозатратная сушка зерна небольших объемов, применение сушилок данного типа нецелесообразно. Следует отметить тот факт, что в большинстве стран, занимающихся переработкой зерновых культур, уборка урожая зерна производится при влажности 16-17%. В Казахстане же

природные условия таковы, что 60-70% собранного урожая должно обязательно высушиваться до влажности, требуемой для хранения зерна. При использовании сушильных установок данного типа необходимо несколько раз прогонять зерновой материал через установку, что в свою очередь приведет к неизбежным энергетическим затратам.

На сегодняшний день наиболее производительным способом сушки зерновых культур является применение электромагнитной энергии микроволнового диапазона [1].

Проведя анализ работ разных авторов, было установлено, что большая часть исследователей предлагает традиционно облучать зерновой материал микроволновой энергией с помощью рупорных излучателей, используя при этом магнетронные генераторы большой мощности. Данный способ имеет ряд существенных недостатков, такие как: локальный перегрев зернового материала, приводящий к его растрескиванию, дороговизна и капризность работы магнетронов большой мощности, большая металлоёмкость и неудобство транспортировки установок [2, 3].

Основная часть. В данной статье рассматри-

вается более качественный способ микроволновой сушки семян зерновых культур путем разработки нового функционала, позволяющего осуществлять равномерное распределение электромагнитной энергии микроволнового диапазона по всему объему зернового материала.

По мнению авторов, для решения поставленной задачи лучше всего подходит применение волновода поверхностных волн, выполненного из провода, покрытого тонким слоем диэлектрика. Важным свойством такого волновода является распространение энергии поля около провода волновода в виде цилиндра, имеющего радиус, равный приблизительно одной длине волны [4].

В результате возбуждения поверхностной волны E_{00} около провода устанавливается электромагнитное поле имеющее структуру, показанную на рисунке 1.

Известно, что волна E_{00} содержит три компоненты: H_φ – компонента магнитного поля, E_r – радиальная компонента электрического поля, E_z – продольная компонента электрического поля.

Компоненты электромагнитного поля волны E_{00} представим в виде выражений:

$$H_\varphi = B \cdot H_1^{(1)}(hr) e^{-\gamma z}, \quad (1)$$

$$E_r = B \cdot \frac{h}{\omega \cdot \epsilon_0} \cdot H_1^{(1)}(hr) e^{-\gamma z}, \quad (2)$$

$$E_z = B \cdot \frac{h}{\omega \cdot \epsilon_0} \cdot H_0^{(1)}(hr) e^{-\gamma z}, \quad (3)$$

где h – постоянная распространения в пространстве;

r – текущий радиус;

γ – постоянная распространения вдоль провода;

ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость свободного пространства;

ω – круговая частота;

$H_n^{(1)}$ – функция Ганкеля 1-го рода n -порядка.

Из представленных выше выражений (1-3) следует, что при соответствующем выборе величины толщины диэлектрического слоя и размеров сечения провода возможно организовать условия, при которых будет достигнута максимальная концентрация энергии поверхностной волны E_{00}

в объеме, ограниченном воображаемым цилиндром с радиусом r .

$$\frac{h}{h_i} = \frac{1}{\epsilon_0} \times \times \frac{H_0^{(1)}(h_i a) H_0^{(2)}(h_i a) - H_0^{(2)}(h_i a) H_0^{(1)}(h_i a) H_1^{(1)}(h_i a)}{H_0^{(1)}(h_i a) H_0^{(2)}(h_i a) - H_0^{(2)}(h_i a) H_1^{(1)}(h_i a) H_0^{(1)}(h_i a)}, \quad (4)$$

где a_1 – радиус диэлектрического покрытия;

h_i – постоянная распространения в диэлектрическом покрытии провода;

$H_0^{(2)}$ – функция Ганкеля второго рода нулевого порядка.

Следует отметить, что выражение (4) осуществляет связь между постоянными распространения в окружающем пространстве возле провода и в слое диэлектрического покрытия.

Таким образом, учитывая сведения источника [5], относительно граничного радиуса можно сделать следующие выводы:

1. Провод, покрытый тонким слоем диэлектрика, обладает гораздо меньшим граничным радиусом концентрации микроволновой энергии, чем тот же провод без диэлектрического слоя.

2. При неизменном сечении провода, но увеличении толщины слоя диэлектрика около провода граничный радиус возрастает. При внушительном увеличении сечения провода значение граничного радиуса возрастает не намного.

3. При уменьшении сечения провода, но неизменной толщине диэлектрического слоя, с увеличением частоты значение радиуса концентрации энергии уменьшается.

Другой важной особенностью поверхностного волновода является поглощение или переизлучение электромагнитной энергии объектами различной природы, помещенными в его поле. При этом может быть организован режим как поглощения энергии волновода, так и режим переизлучения его энергии.

Это означает, что возбудить электромагнитное поле волны E_{00} можно с помощью вибраторов, расположенных около провода. В данном случае использование группы переизлучающих вибраторов позволяет осуществлять концентрацию микроволновой энергии в требуемой ограниченной области. Данного вида вибраторные

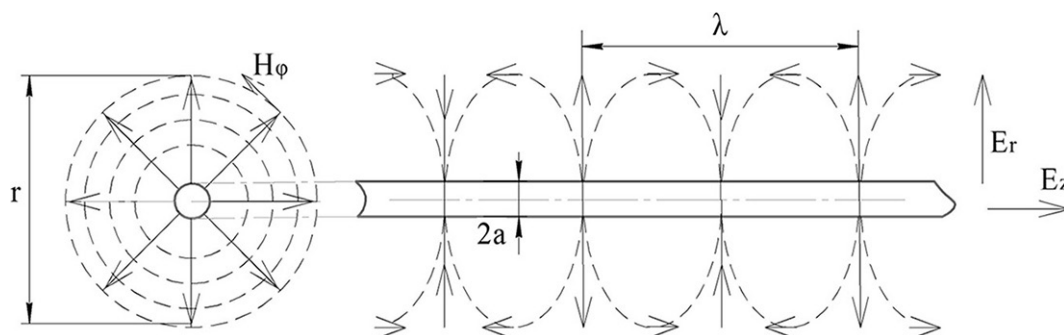


Рисунок 1 – Схематичный вид поля волны E_{00}

решетки хорошо описаны и часто используются в технике сверхвысоких частот. В случае применения поверхностного волновода для сушки и нагрева различных диэлектрических объектов существует ряд особенностей. В частности, обеспечение равномерности облучения объектов сушки по длине достигается размерами переизлучающих вибраторов, а не расстоянием объекта сушки до провода волновода.

Другой важной задачей при микроволновой сушке зерновых культур является обеспечение требуемой мощности в области, где размещается облучаемый зерновой материал.

Важным недостатком магнетронов, рассчитанных на мощности в десятки киловатт, является их цена. К примеру, стоимость магнетрона, рассчитанного на мощность 70 киловатт, составляет более одного миллиона тенге. Стоит также отметить, что эксплуатация таких магнетронов сопровождается рядом известных трудностей: требуют постоянного согласования в трактах, необходимо постоянное регулирование и контроль. В этом отношении магнетроны средней и малой мощности менее требовательны и стоимость таких магнетронов составляет порядка 15 000 тенге. Применение поверхностного волновода в совокупности с вибраторной системой возбуждения [6] позволяет достигать требуемые значения подводимой мощности к облучаемому объекту.

Немаловажным является и то, что предложенный вариант позволяет суммировать мощности ряда независимых маломощных генераторов в виде тепла в объекте, для суммирования мощностей не требуется синхронизации источников энергии, т.к. каждый из них вносит независимый вклад в нагрев облучаемого объекта. Данный эффект позволяет наращивать и регулировать высокие значения мощности с помощью маломощных магнетронных генераторов путем соответствующего подключения (отключения) парциальных генераторов.

Схема установки для микроволновой сушки зерновых культур представлена на рисунке 2.

Данная установка включает: 1 – ряд магнетронов малой мощности, 2 – вибраторная система

возбуждения волн E_{00} , 3 – коллинеарная переизлучающая антенная решетка, состоящая из ряда полуволновых вибраторов 4 ($V_1, V_2, V_3 \dots V_n$) и провода волновода, 5 и 6 – диэлектрический желоб или труба для размещения зернового материала, 7 – защитный кожух, выполненный в виде эллиптического отражателя, 8 – поглощающая нагрузка.

Данный вариант установки представляет собой следующее:

В области эллиптического отражателя на его первой фокальной оси размещается провод поверхностного волновода. На провод волновода соосно с проводом устанавливается ряд переизлучателей в виде полуволновых вибраторов. В качестве переизлучающих вибраторов могут служить металлические проводники, помещенные в поле поверхностной волны E – типа [7]. Конструкции вибраторов могут быть различны. Возможно применить вибраторы цилиндрической формы или в виде спирали. Для переизлучения микроволнового излучения был выбран вибратор цилиндрической формы. Совокупность таких вибраторов, установленных соосно с проводом волновода, формируют коллинеарную антенную решетку [8]. Провод волновода с одной стороны соединен с вибраторным устройством возбуждения поверхностных волн, с другой стороны провода подключен блок поглощающих нагрузок. Система возбуждения и поглощающая нагрузка экранированы и замыкают эллиптический отражатель с торцов.

Микроволновое излучение с антенной решетки равномерно распространяется в пределах эллиптического отражателя и фокусируется за счет его свойств на второй фокальной оси, создавая максимальную концентрацию электромагнитного потока на объекте сушки. На второй фокальной оси размещают объект сушки, который может быть диэлектрическим желобом, либо диэлектрической трубой, сквозь которые пропускается за счет конвейерной ленты тот или иной зерновой материал.

Поверхность эллиптического отражателя рекомендуется выполнить из одно- или двухлиней-

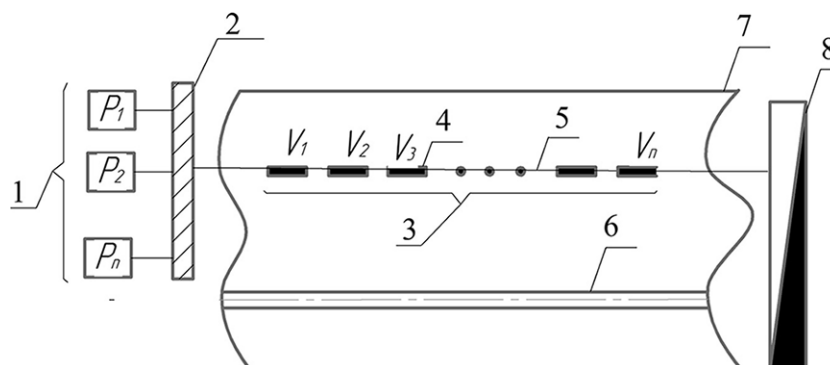


Рисунок 2 – Схема установки для микроволновой сушки зерновых культур

ной сетки. Как показали проведенные исследования, чем меньше размеры ячейки, тем больше затухание излучаемого электромагнитного поля, что важно для обеспечения безопасности обслуживающего персонала. Также поверхность отражателя может быть выполнена из сплошного листа латуни или сплава алюминия [9].

Наиболее целесообразно конструкцию эллиптического отражателя выполнить из натянутых проводов, образуя при этом однолинейную сетку, и всю конструкцию поместить в металлический кожух. Конструкцию кожуха следует выбрать с учетом условий эксплуатации и удобства изготовления [10].

Выводы

Преимущества предложенного способа микроволновой сушки зерновых культур на основе свойств поверхностного волновода:

- во-первых, достигается требуемое значение результирующей мощности микроволнового излучения от несинхронизированных маломощных магнетронов с помощью поверхностного волновода в совокупности с вибраторной системой

возбуждения;

- во-вторых, достигается равномерное распределение плотности микроволнового излучения по длине конвейерной ленты, которая обусловлена размещением коллинеарной антенной решетки на первой фокальной оси эллиптического отражателя;

- в-третьих, обеспечивается концентрация энергии в области размещения зернового материала и экранирование от вредоносного микроволнового излучения обслуживающего персонала за счет свойств эллиптического отражателя;

- в-четвертых, образуется минимальное количество невоображаемой мощности, которую требуется утилизировать не более 5% от подводимой мощности к облучаемому объекту сушки.

Таким образом, использование свойств поверхностного волновода для микроволновой сушки зерновых культур является перспективным, так как позволяет решить целый ряд практических задач в отличие от применяемых в настоящее время традиционных способов на зерноперерабатывающих предприятиях.

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP13268797).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин В.Д. Технологии, машины и агрегаты послеуборочной обработки зерна и подготовки семян / В.Д. Галкин, А.Д. Галкин. – Пермь: Изд. ИПЦ «ПрокРост», 2021. – 234 с.
2. Bualuang O., Onwude D.I., Pracha K. Microwave drying of germinated corn and its effect on phytochemical properties. J. Sci. Food Agric. 2017, 97, pp. 2999-3004.
3. Зубова Р.А. Обоснование режимов предпосевной обработки семян с твердой оболочкой ультразвуком и электромагнитным полем сверхвысокой частоты: Дис. ... канд. техн. наук. – Краснодар: КрасГАУ, 2017. – 141 с.
4. Goubau G. Surface Waves and Their Application to Transmission Lines // Journal of Applied Physics. 1950, no. 21 (11), pp. 1119-1128.
5. Риттер Е.С. Сверхвысокочастотная сушка древесины на основе однопроводной линии поверхностных волн: Дис. ... д-ра филос. (PhD) по 6D071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации. – Петропавловск, 2021. – 118 с.
6. Риттер Е.С., Кисмерешкин В.П., Илимбаева Ж.А., Риттер Д.В. Комплекс антенн по технологии поверхностного волновода // Вестник Академии гражданской авиации. – Алматы: 2019. – №4. – С. 127–129.
7. Dharmendra Singh Rajpurohit and Rahul Chhibber. «Design of Multimode Microwave Cavity for Materials Processing», 5th International & 26th India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th-14th. 2014. IIT Guwahati, Assam. India.
8. Кисмерешкин В.П., Матвеев А.В., Реализация равномерного распределения поля поверхностной волны по переизлучающим вибраторам // Динамика систем, механизмов и машин. – 2009. – № 3. – С. 313-317.
9. Гоголева Е.М., Фарафентова Е.П. Прикладная оптика: учебное пособие. – Екатеринбург, 2016. – 184 с.
10. Михеенко, А.В. Геометрическая оптика: учебное пособие. – Хабаровск: ТОГУ, 2018. – 100 с.

Дәнді дақылдарды жоғарғыбеттік толқынөткізгіштің қасиеттері негізінде микротолқынды кептіру

¹РИТТЕР Екатерина Сергеевна, PhD, доцент, kritter315@gmail.com,

¹САВОСТИН Алексей Александрович, т.ғ.к., профессор, alexey.savostin@gmail.com,

¹*РИТТЕР Дмитрий Викторович, т.ғ.к., профессор, dritter7676@gmail.com,

¹САВОСТИНА Галина Владимировна, PhD, доцент, galinash85@mail.ru,

¹СМИРНОВ Андрей Петрович, докторант, gprsboost03@mail.ru,

¹М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан, Петропавл, Пушкин көшесі, 86,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Жұмыстың мақсаты – астық материалының бүкіл көлеміне микротолқынды диапазонның электромагниттік энергиясын біркелкі таратуға мүмкіндік беретін жаңа функционалдылықты құру арқылы дәнді дақылдарды микротолқынды кептірудің жақсы әдісін жасау. Әдістің артықшылықтары талқыланды: коллинеарлы қайта сәулелейтін антенналық торды пайдалану, жоғарыбеттік толқындарын қоздыру вибраторлық жүйесін қолдану, фаза мен жиілік бойынша келісуді талап етпейтін орташа және аз қуатты магнетрондарды қолдану. Жоғарыбеттік толқындарын қоздыратын вибратор құрылғысы сәулелендірілген астық материалына берілетін қуатты сатылы реттеуге мүмкіндік береді. Зерттеулерге сәйкес, дәнді дақылдарды микротолқынды кептіруге арналған қондырғы ұсынылған, оның негізінде жоғарыбеттік толқындары, жоғарыбеттік толқындарын қоздыратын діріл құрылғысы және эллиптикалық шағылыстырғыш бар. Сондай-ақ қызмет көрсетуші персоналды зиянды микротолқынды сәулеленуден қорғау мақсатында эллиптикалық шағылыстырғыштың қабығын жобалау бойынша ұсынымдар берілді.

Кілт сөздер: микротолқынды кептіру, жоғарғы беттік толқын өткізгіш, қайта шығаратын вибратор, рефлектор, өрісті бөлу, сіңіретін жүктеме.

Microwave Drying of Crops Based on the Properties of the Surface Waveguide

¹**RITTER Ekaterina**, PhD, Associate Professor, kritter315@gmail.com,

¹**SAVOSTIN Alexey**, Cand. of Tech. Sci., Professor, alexey.savostin@gmail.com,

^{1*}**RITTER Dmitry**, Cand. of Tech. Sci., Professor, dritter7676@gmail.com,

¹**SAVOSTINA Galina**, PhD, Associate Professor, galinash85@mail.ru,

¹**SMIRNOV Andrey**, doctoral student, gprsboost03@mail.ru,

¹M. Kozybayev North Kazakhstan University, Kazakhstan, Petropavl, Pushkin Street, 86,

*corresponding author.

Abstract. The purpose of this work is the development of better method of microwave drying of grain seeds by creating of new methods of applications enabling uniform distribution of electromagnetic energy of the microwave range over the entire volume of grain material. The advantages of the proposed method are discussed in this article: the use of a collinear reradiative antenna array, the use of a vibrator system for exciting surface waves, the use of medium and low power magnetrons that do not require phase and frequency coordination. Vibrator device for exciting surface waves makes it possible to perform step-by-step regulations of horsepower input to irradiated grain material. In accordance with the studies carried out, a scheme of the device for microwave drying of crops is proposed, which is based on a surface waveguide, a vibrator device for exciting surface waves, and an elliptical reflector. Recommendations are given for designing of an elliptical reflector shell in order to protect the staff from harmful microwave radiation.

Keywords: microwave drying, surface waveguide, reradiative vibrator, reflector, field distribution, absorbing load.

REFERENCES

1. Galkin V.D. Tekhnologii, mashiny i agregaty posleuborochnoi obrabotki zerna i podgotovki semyan [Technologies, machines and units for post-harvest grain processing and seed preparation] V.D. Galkin, A.D. Galkin. – Perm: Publ. IPTS «ProkRost», 2021. – 234 p.
2. Bualuang O., Onwuode D.I., Pracha K. Microwave drying of germinated corn and its effect on phytochemical properties. J. Sci. Food Agric. 2017, 97, pp. 2999-3004.
3. Zubova R.A. Obosnovanie rezhimov predposevnoi obrabotki semyan s tverdoi obolochkoi ultrazvukom i elektromagnitnym polem sverkhvysokoi chastoty: Dis. ... kand. tekhn. nauk. [Substantiation of modes of pre-sowing treatment of seeds with a hard shell by ultrasound and electromagnetic field of microwave frequency. Cand. Sci. Technical) diss]. – Krasnodar: KrasGAU, 2017. – 141 p.
4. Goubau G. Surface Waves and Their Application to Transmission Lines // Journal of Applied Physics. 1950, no. 21 (11), pp. 1119-1128.
5. Ritter E.S. Sverkhvysokochastotnaya sushka drevesiny na osnove odnoprovodnoi linii poverkhnostnykh voln: Dis. ... d-ra filos. (PhD) po 6D071900 – Radiotekhnika, elektronika i telekommunikatsii. [Ultrahigh-frequency drying of wood based on a single-wire line of surface waves: Dis. ... of doctor of philosophy (PhD) 6D071900 – Radio Engineering, Electronics and Telecommunications]. – Petropavlovsk, 2021. – 118 p.
6. Ritter E.S, Kismereshkin V.P., Ilimbaeva Zh.A., Ritter D.V. Kompleks antenn po tekhnologii poverkhnostnogo volnovoda [Antenna complex based on surface waveguide technology] // Vestnik Akademii grazhdanskoi aviatsii. – Almaty: 2019. – No. 4. – pp. 127-129.
7. Dharmendra Singh Rajpurohit and Rahul Chhibber. «Design of Multimode Microwave Cavity for Materials Processing», 5th International & 26th India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th-14th. 2014. IIT Guwahati, Assam. India.
8. Kismereshkin V.P., Matveev A.V., Realizatsiya ravnomernogo raspredeleniya polya poverkhnostnoi volny po pereizluchayushchim vibratoram [Implementation of a uniform distribution of the surface wave field over reradiating vibrators] // Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. – 2009. – No. 3. – pp. 313-317.
9. Gogoleva, E.M., Farafontova, E.P. Prikladnaya optika: uchebnoe posobie [Applied Optics: a tutorial]. – Ekaterinburg, 2016. – 184 p.
10. Mikheenko, A.V. Geometricheskaya optika: uchebnoe posobie [Geometric optics: tutorial]. – Khabarovsk: TOGU, 2018. – 100 p.