

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 533.9.082.74:621.385.6:664.723:633.1:004.94

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-73-79>**Исследование на компьютерной модели влияния элементов конструкции и влажности зерна на добротность СВЧ-конвективной зоны***А.А. Васильев¹, Д.А. Тихомиров², А.Н. Васильев³*^{1,2,3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ Lex.of@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3147-659X>² Tihda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474>³ Vasilev-viesh@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7988-2338>

Аннотация. Сушку зерна после уборки урожая часто проводят в конвективных зерносушилках с СВЧ-воздействием. При проектировании СВЧ-устройств с резонаторами стремятся к достижению максимальной добротности СВЧ-конвективных зон. В связи с отсутствием исследований по влиянию влажности зерна и элементов, расположенных в СВЧ-конвективной зоне, на её добротность авторы статьи исследовали данные зависимости на компьютерной модели. С помощью программы CST Microwave Studio 2019 получены данные об изменении добротности резонаторов. Применяли методы Time Domain Solver для выполнения расчёта СВЧ-активной зоны в широком диапазоне частот и Eigenmode Solver – для нахождения собственных мод резонансных структур. Компьютерное моделирование проводили в два этапа. На первом этапе оценивали влияние на величину добротности размещения в СВЧ-конвективной зоне волноводов. На втором этапе исследовали изменение добротности СВЧ-конвективной зоны с волноводами и зерном различной влажности (14, 24 и 26%). Установлена существенная зависимость добротности зоны обработки зерна от особенностей конструкции и размещения в ней технологических элементов, а также от влажности обрабатываемого зерна и его температуры. Авторами дана рекомендация к проектированию СВЧ-конвективной зоны для технологических процессов, заключающаяся в том, чтобы стремиться не к достижению максимума добротности, а к обеспечению равномерного распределения поля СВЧ в активной зоне.

Ключевые слова: добротность СВЧ-конвективной зоны, поле СВЧ, СВЧ-активная зона, сушка зерна, влажность зерна, резонатор, добротность, компьютерное моделирование, проектирование СВЧ-конвективной зоны

Для цитирования: Васильев А.А., Тихомиров Д.А., Васильев А.Н. Исследование на компьютерной модели влияния элементов конструкции и влажности зерна на добротность СВЧ-конвективной зоны // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 73-79. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-73-79>

ORIGINAL PAPER

Study of a computer model of the influence of structural elements and grain moisture on the Q-factor of the microwave-convective zone*A.A. Vasiliev¹, D.A. Tikhomirov², A.N. Vasiliev³*^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Centre VIM; Moscow, Russia¹ Lex.of@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3147-659X>² Tihda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474>³ Vasilev-viesh@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7988-2338>

Abstract. Grain drying after harvesting is often carried out in convective grain dryers with microwave exposure. When designing microwave devices with resonators strive to achieve the maximum efficiency (Q-factor) of microwave convection zones. Due to the lack of studies on the influence of grain humidity and elements located in the microwave convective zone on its Q-factor, the authors investigated these dependences on a computer model. Using the CST Microwave Studio 2019 software, the authors obtained the data on the change in the Q-factor of the resonators. Time Domain Solver methods were used to perform the calculation of the microwave active zone in a wide range of frequencies, and Eigenmode Solver methods – to find the eigenmodes (natural modes) of resonant structures. Computer modeling was carried out in two stages. At the first stage, the authors evaluated the influence on the Q-factor value of the placement in the microwave convective zone of the waveguides. At the second stage, the authors analyzed the change in the Q-factor of microwave convective zone with waveguides and grain of different

moisture content (14, 24, and 26%). The study established significant dependence of the Q-factor of the grain processing zone on the design features and placement of technological elements in it, as well as on the humidity of the processed grain and its temperature. The authors recommended that when designing microwave convective zone for technological processes, the goal should be not to achieve the maximum Q-factor, but to ensure uniform distribution of the microwave field in the active zone.

Keywords: Q-factor of microwave convection zone, microwave field, microwave active zone, grain drying, grain moisture, resonator, Q-factor (efficiency), computer modeling, microwave convection zone design

For citation: Vasiliev A.A., Tikhomirov D.A., Vasiliev A.N. Study of a computer model of the influence of structural elements and grain moisture on the Q-factor of the microwave-convective zone. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):73-79. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-73-79>

Введение

При использовании микроволнового поля для сушки зерна в процессе его уборки [1-3] необходимо иметь зерносушильное оборудование производительностью 5...50 т/ч [4-6]. Как правило, для этого используют конвективные зерносушилки [7, 8]. Значительная часть таких зерносушилок обеспечивает сушку зерна в плотном слое. Зерно движется сверху вниз и продувается агентом сушки (горячим воздухом), подаваемым непосредственно в зерновой слой по воздушным каналам (коробам) [9]. Зерно нагревается воздухом, влага из него испаряется и выносится агентом сушки за пределы установки. В зерносушилках с СВЧ-воздействием нагрев влажного зерна осуществляется за счёт микроволнового поля, что снижает энергозатраты на сушку и делает эти установки привлекательными с точки зрения энергоёмкости процесса.

Известны два подхода использования поля СВЧ в шахных зерносушилках: в первом используют микроволновое воздействие в процессе рециркуляции для интенсификации влагопереноса между влажным и подсушенным зерном [10]; во втором применяют СВЧ-конвективное воздействие на зерновой слой [11, 12]. Микроволновое поле способствует перемещению влаги из зерновки в межзерновое пространство, а подогретый воздух выносит из зернового слоя влагу.

Авторы статьи разрабатывают модульные СВЧ-конвективные установки, в которых волноводы расположены внутри активной зоны, заполненной зерном. В активной зоне зерно перемещается сверху вниз под собственным весом. Внутри модуля располагаются волноводы со щелевыми излучателями, по которым электромагнитное поле сверхвысокой частоты подаётся в зерно [13]. Количество волноводов в модуле и количество модулей в установке определяют, исходя из требуемой производительности по обработке зерна, места расположения установки и типа установки (мобильная или стационарная).

Нашими исследованиями¹ [14] установлена зависимость изменения влажности зерна, обрабатываемого в СВЧ-конвективной зоне, на глубину проникновения поля в зерновой слой.

СВЧ-конвективная зона – это заполненная обрабатываемым продуктом (зерном) резонаторная камера [15, 16]. В идеальном варианте конструкция резонаторной камеры должна при основной частоте излучения магнетрона (2,45 ГГц) обеспечивать максимальную добротность, тогда всё излучение магнетрона будет в ней максимально накапливаться и распределяться в зерновом слое [17, 18]. Однако в отличие от техники передачи сигналов СВЧ в установках связи резонаторные камеры в технологических процессах переработки продукции не являются пустыми объёмами. Как правило, они полностью или частично заполнены обрабатываемым материалом или элементами конструкции, и тогда встает вопрос о том, как в этом случае изменяется добротность СВЧ-конвективной зоны. На данный момент нет исследований по влиянию элементов, расположенных в активной зоне, и влажности зерна в СВЧ-конвективной зоне на её добротность. Ответ на этот вопрос поможет более точно определить необходимые параметры расчёта СВЧ-конвективной зоны.

Цель исследований: установить влияние влажности зерна и особенностей конструкции размещённых в ней технологических элементов на добротность СВЧ-конвективной зоны.

Материалы и методы

В СВЧ-колебательных системах передачи энергии для уменьшения потерь применяют резонаторы, представляющие собой объём, ограниченный со всех сторон металлической оболочкой [19]. Возбуждаемые в объёме колебания электромагнитной волны могут существовать в нём постоянно.

¹ Будников Д.А., Васильев А.Н., Васильев А.А. Проектирование рабочих зон установок СВЧ-конвективной обработки зерна путём электродинамического моделирования. Орёл, 2022. 348 с.

В нашем случае в резонаторе обрабатывается зерно, и резонаторная камера считается СВЧ-активной зоной. Установка для СВЧ-конвективной обработки зерна собирается из нескольких СВЧ-активных зон (резонаторных камер), устанавливаемых вертикально друг на друга. Отличительной особенностью применяемых резонаторных камер является их открытость. СВЧ-активная зона не имеет ограждения сверху и снизу, и зерно движется самотёком из верхней СВЧ-активной зоны в нижнюю, днище которой ограничено корпусом выгрузного бункера с выгрузным устройством.

Исследовались СВЧ-активные зоны, представленные на рисунке 1.

Корпус СВЧ-активной зоны размером $600 \times 400 \times 300$ выполнен из стали (рис. 1). Такие размеры обусловлены требуемыми расстояниями между волноводами в одном ряду и между рядами волноводов. При моделировании по центру корпуса размещали один двойной волновод из двух полукруглых волноводов. Боковые поверхности волноводов содержат щелевые отверстия, через которые электромагнитное поле попадает в зерновой слой. Возле боковых стенок корпуса размещали два полукруглых волновода, излучающих электромагнитные волны навстречу центральному волноводу (рис. 1б). Такая комплектация модуля позволяет адекватно моделировать процессы распределения микроволнового поля в СВЧ-конвективной зоне.

Для моделирования использовалась программа CST Microwave Studio. Применяли два метода расчёта: Time Domain Solver для вычисления

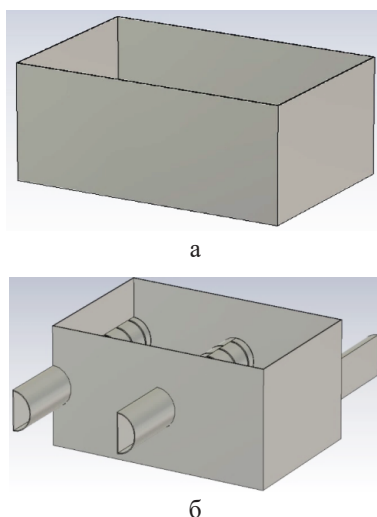


Рис. 1. Макеты СВЧ-активных зон, используемые при расчёте их добротности:
а – без волноводов; б – с волноводами

Fig. 1. Layouts of microwave active zones used in the calculation of their goodness:
a – without waveguides; b – with waveguides

СВЧ-активной зоны в широком диапазоне частот и Eigenmode Solver – для нахождения собственных мод резонансных структур.

Чтобы вся энергия источника излучения эффективно использовалась для нагрева обрабатываемого материала, желательно, чтобы добротность резонатора была максимальной.

Если резонатор заполнен проводящей средой (влажным зерном), то добротность резонатора будет зависеть и от потерь в этой среде [19]:

$$N = \int_V \frac{\sigma E^2}{2} dV, \quad (1)$$

где N – потери энергии, Вт/ч; V – объём резонатора, m^3 ; E – напряжённость электромагнитного поля, В/м; σ – удельная электропроводность, См/м.

Полная энергия, выделяемая в резонаторе, определяется уравнением [15]:

$$\Sigma N = \int_V \frac{\epsilon E^2}{2} dV, \quad (2)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость, Ф/м.

Добротность находится в виде отношения:

$$Q = f \frac{\Sigma N}{N}, \quad (3)$$

где f – частота магнетрона, Гц.

Учитывая (2) и (3), получим

$$Q = f \frac{\epsilon}{\sigma}. \quad (4)$$

В резонаторе обязательно существуют потери в стенках и непосредственно в среде, которая заполняет резонатор. Поэтому общая добротность СВЧ-активной зоны найдётся из выражения [19]:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{cp}} + \frac{1}{Q_{ст}}, \quad (5)$$

где Q_{cp} – добротность обрабатываемой среды; $Q_{ст}$ – добротность стальной конструкции корпуса СВЧ-активной камеры (резонатора).

Из уравнения (5) следует, что добротность обрабатываемого материала зависит от его диэлектрических свойств и удельной электропроводности. Обе эти величины в значительном диапазоне изменяются² в процессе обработки зерна полем СВЧ [16, 17], причём изменения происходят за счёт не только уменьшения влажности зерна, повышения его температуры, но и поляризации зерновок в электромагнитном поле.

Следует учитывать, что при стандартных расчётах добротности резонаторов внутри них нет никаких конструкций. В случаях использования

² Диденко А.Н. СВЧ-энергетика. Теория и практика. М.: Наука, 2003. 446 с.

СВЧ-воздействия в технологических процессах обработки сельскохозяйственной продукции внутри резонаторных камер располагают вспомогательное оборудование (мешалки, ёмкости, отражатели и пр.). В нашем варианте внутри резонаторной камеры расположены излучающие волноводы. Для этого случая существующие методики расчёта добротности резонаторных камер не подходят.

Результаты и их обсуждение

При СВЧ-конвективной обработке изменение влажности зерна может быть различным. Начальная влажность зерна может составлять от 16 до 30%. Далее она снижается в процессе сушки. При обеззараживании зерно имеет влажность до 16%. При предпосевной обработке семян в микроволновом поле зерно имеет кондиционную влажность 13...14% (для пшеницы и ячменя). При таком диапазоне изменения влажности зерна существенно изменяются и его диэлектрические свойства.

Теоретические исследования добротности проводили в два этапа. На первом этапе оценили, как влияет на величину добротности размещение в СВЧ-конвективной зоне волноводов. На втором этапе проводили исследование изменения добротности СВЧ-конвективной зоны с волноводами и зерном различной влажности.

Чтобы оценить, как наличие волноводов влияет на добротность СВЧ-активной зоны, произвели моделирование по определению добротности с использованием программы CST Microwave Studio [19] для корпуса зоны без волноводов (рис. 1а) и для корпуса с четырьмя волноводами (рис. 1б). Результаты расчётов представлены в таблице 1.

Отметим, что наиболее близкими к частоте магнетрона (2,45 ГГц) являются третья и четвёртая моды

для СВЧ-активной зоны без волновода (выделенные курсивом в таблице 1), причём значения добротности для них невысоки: 2,624 и 1,939. Для СВЧ-активной зоны с четырьмя волноводами самое близкое расчётное значение резонансной частоты – 2,456675 ГГц, для которой добротность составляет 15,93. Резонансных частот, близких к частоте магнетрона, нет.

Результаты расчётов показывают, что размещение технологического оборудования в резонаторах приводит к значительному изменению их добротности.

Влияние влажности зерна на добротность исследовалось для характерного для СВЧ-обработки диапазона влажности 14...26%. Результаты представлены в таблице 2.

Сравнение данных, приведённых в таблице 2, показывает отсутствие совпадений мод резонансных частот с частотой генерации магнетрона. Величины добротности для резонансных частот, близких к частоте генерации магнетрона, колеблются от 0,8173 до 6,949 для различных мод, причём они существенно отличаются даже при одной влажности зерна, что является объяснимым. Поскольку в передаче энергии поля СВЧ участвуют несколько типов волн и их резонансные частоты изменяются в зависимости от изменения диэлектрических свойств материала, находящегося в зоне обработки, изменяется и радиационная эффективность излучения.

Результаты расчёта изменения добротности резонаторов показали существенное влияние влажности зерна на изменение добротности СВЧ-активной зоны, причём не просматривается зависимость между величинами по модам СВЧ-излучения для различной влажности зерна.

Изменение влажности зерна в СВЧ-активной зоне приводит к изменению амплитуды воздействия, направленности его максимума как вдоль длины

Моды резонансных частот и добротности для СВЧ-активной зоны

Таблица 1

Modes of resonant frequencies and Q-factor for the microwave active zone

Table 1

№ моды No. of modes	СВЧ-активная зона без волноводов <i>Microwave active zone without waveguides</i>		СВЧ-активная зона с 4 волноводами <i>Microwave active zone with four waveguides</i>	
	Резонансная частота, ГГц <i>Resonant frequency, GHz</i>	Добротность <i>Q-factor</i>	Резонансная частота, ГГц <i>Resonant frequency, GHz</i>	Добротность <i>Q-factor</i>
1	2,401070	8,321	2,456675	15,930
2	2,409471	32,500	2,461078	11,780
3	2,445958	2,624	2,469784	3,044
4	2,450990	1,939	2,470463	21,660
5	2,455016	1,212	2,478836	2,795

Моды резонансных частот и добротности для СВЧ-активной зоны с волноводами и с зерном различной влажности

Modes of resonant frequencies and Q-factor for microwave active zone with waveguides and with grains of different moisture content

№ моды No. of modes	СВЧ-активная зона с зерном влажностью W / Microwave active zone with grain moisture content W					
	W = 14%		W = 24%		W = 26%	
	Резонансная частота, ГГц Resonant frequency, GHz	Добротность Q-factor	Резонансная частота, ГГц Resonant frequency, GHz	Добротность Q-factor	Резонансная частота, ГГц Resonant frequency, GHz	Добротность Q-factor
1	2,448412	4,659	2,445161	0,8173	2,44959	5,054
2	2,453007	2,158	2,445267	4,9950	2,451184	4,461
3	2,453947	6,979	2,447031	2,2220	2,452292	7,881
4	2,458258	5,976	2,448635	2,6670	2,460817	6,863
5	2,460989	2,740	2,456276	0,8439	2,463381	2,401
6	2,464295	5,541	2,459164	4,0000	2,465827	4,347

волновода, так и относительно излучающей поверхности. Изменяется также и равномерность излучения поля вдоль длины волновода.

Поскольку добротность зависит от влажности обрабатываемого зерна и его температуры, то показатель добротности является вторичным, и отводить ему главенствующую роль при расчёте СВЧ-активных зон нет смысла. Приоритетом может быть обеспечение равномерности поля СВЧ в зоне.

Список литературы

1. Bruce R.M., Atungulu G.G., Sadaka S., Smith D. Impact of specific energy input of a 915 MHz microwave dryer on quality, functional, and physicochemical properties of different rice cultivars. *Cereal Chemistry*. 2021;98(3):557-570. <https://doi.org/10.1002/cche.10398>
2. Abano E.E. Kinetics and quality of microwave-assisted drying of mango (*Mangifera indica*). *International Journal of Food Science*. 2016;2037029. <https://doi.org/10.1155/2016/2037029>
3. Kovalev A.V., Spiridonov O.B., Lysenko I.E., Ezhova O.A. Method and system of pre-sowing microwave treatment of agricultural crop seeds. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020;13(11):3964-3969.
4. Soyer Ay., Kolsarici N., Candoğan K. Effect of conventional and microwave cooking methods on some nutritive contents and quality properties of chicken meat. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 1999;23(8):289-296. <https://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/vol23/iss8/6>
5. Vasil'yev A.N., Dorokhov A.S., Budnikov D.A., Vasil'yev A.A. Trends in the use of the microwave field in the technological processes of drying and disinfection of grain. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):63-68. EDN: GGWPRQ
6. Сабашкин В.А., Торопов В.Р. Выбор зерноочистительно-сушильных комплексов в зонах с высокой влажностью зерна // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2018. Т. 48, № 3. С. 58-64. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2018-3-8>

Выводы

Компьютерное моделирование с использованием программы CST показало зависимость добротности зоны обработки зерна от особенностей конструкции СВЧ-активной зоны и размещения в ней технологических элементов, а также от влажности и температуры обрабатываемого зерна. При расчете СВЧ-конвективных зон необходимо исследовать равномерность поля СВЧ в зоне.

References

1. Bruce R.M., Atungulu G.G., Sadaka S., Smith D. Impact of specific energy input of a 915 MHz microwave dryer on quality, functional, and physicochemical properties of different rice cultivars. *Cereal Chemistry*. 2021;98(3):557-570. <https://doi.org/10.1002/cche.10398>
2. Abano E.E. Kinetics and quality of microwave-assisted drying of mango (*Mangifera indica*). *International Journal of Food Science*. 2016;2037029. <https://doi.org/10.1155/2016/2037029>
3. Kovalev A.V., Spiridonov O.B., Lysenko I.E., Ezhova O.A. Method and system of pre-sowing microwave treatment of agricultural crop seeds. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020;13(11):3964-3969.
4. Soyer Ay., Kolsarici N., Candoğan K. Effect of conventional and microwave cooking methods on some nutritive contents and quality properties of chicken meat. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 1999;23(8):289-296. <https://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/vol23/iss8/6>
5. Vasil'yev A.N., Dorokhov A.S., Budnikov D.A., Vasil'yev A.A. Trends in the use of the microwave field in the technological processes of drying and disinfection of grain. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):63-68.
6. Sabashkin V.A., Toropov V.R. The choice of grain cleaning-and-drying units in areas with high grain humidity. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2018;48(3):58-64. (In Rus.) <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2018-3-8>

7. Jia Ch., Wang L., GuoW., Liu Ch. Effect of swing temperature and alternating airflow on drying uniformity in deep-bed wheat drying. *Applied Thermal Engineering*. 2016;106:774-783. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.056>

8. Жолобов Н.В., Чертков Г.Я., Сагайдачный Д.А. Обзор и анализ сушилок зерна // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии-2019». 2019. С. 26-30. EDN: KCDYHD

9. Кирмасов В.Ю., Баскаков И.В., Оробинский В.И., Болотов Д.Б., Распопов А.С., Кондобарова Е.А., Шарова Ю.А. Обзор конструктивных схем зерносушилок // Сборник трудов Национальной научно-практической конференции «Прикладные вопросы физики (к 120-летию со дня рождения академиком И.В. Курчатова и А.П. Александрова). Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. С. 318-325. EDN: ZJZSZF

10. Кожухов В.А., Ушкалов В.Ю. Рециркуляционная зерносушилка шахтного типа с активным вентилированием и СВЧ-активацией зерна // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития». Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2018. С. 118-121. EDN: YACVAD

11. Gursoy S., Choudhary R., Watson D.G. Microwave drying kinetics and quality characteristics of corn. *International journal of agricultural and biological engineering*. 2013;6(1):90-99. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20130601.009>

12. Shivhare U.S., Raghavan G.S.V., Bosisio R.G. Microwave drying of corn. 1. Equilibrium moisture content. *Transactions of the ASAE*. 1992;35(3):947-950. <https://doi.org/10.13031/2013.28683>

13. Vasilyev A.A., Vasilyev A.N., Budnikov D.A. Using modeling to select the type of microwave field emitter for dense-layer grain dryers. *Applied Sciences*. 2023;13(16):9070. <https://doi.org/10.3390/app13169070>

14. Vasiliev A.N., Goryachkina V.P., Budnikov D. Research methodology for microwave-convective processing of grain. *International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEO)*. 2020;9(2):1-11. <https://doi.org/10.4018/IJEEO.2020040101>

15. Mallanna S.D., Viswanath K. Performance analysis of resonators for microwave applications. International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer and Optimization Techniques (ICEECCOT). Mysuru, India, 2018. Pp. 741-745. <https://doi.org/10.1109/ICEECCOT43722.2018.9001448>

16. Кабдин Н.Е., Андреев С.А. Обеспечение равномерности СВЧ-обработки сельскохозяйственных материалов в объемном резонаторе // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 5. С. 42-49. EDN: YUZNUD

17. Nelson S.O. Dielectric properties of agricultural materials and their applications. Academic Press, 2015. 229 p.

18. Черкашин Д.Е., Хакимов Н.Т. Использование пакета программ CST MICROWAVE STUDIO для расчёта эффективной площади рассеивания различных объектов // Сборник научных трудов по материалам II Международной научно-практической конференции «Интеграционные процессы в современной науке: новые подходы и актуальные вопросы». Анапа, 2022. С. 62-66. EDN: XYJPKS

19. Васинкина Е.Ю., Тригорлый С.В., Кадыкова Ю.А., Калганова С.Г. Моделирование СВЧ-термообработки композиционных материалов в камерах резонаторного типа // Вестник технологического университета. 2022. Т. 25, № 5. С. 107-110. EDN: EMPHNN

7. Jia Ch., Wang L., GuoW., Liu Ch. Effect of swing temperature and alternating airflow on drying uniformity in deep-bed wheat drying. *Applied Thermal Engineering*. 2016;106:774-783. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.056>

8. Zholobov N.V., Chertkov G.Ya., Sagaidachniy D.A. Review and analysis of grain dryers. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Innovative Technologies – 2019"*. 2019:26-30. (In Rus.)

9. Kirmasov V.Yu., Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Bolotov D.B., Raspopov A.S., Kondobarova E.A., Sharova Yu.A. Overview of design schemes of grain dryers. In: *Proceedings of the National Scientific and Practical Conference "Applied issues in physics (to the 120th anniversary of Academicians I.V. Kurchatov and A.P. Aleksandrov)*. Voronezh, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 2022:318-325. (In Rus.)

10. Kozhukhov V.A., Ushkalov V.Yu. Recirculating grain dryer of mine type with active ventilation and microwave activation of grain. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Science and Education: Experience, Problems, Development Prospects"*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University. 2018:118-121 (In Rus.)

11. Gursoy S., Choudhary R., Watson D.G. Microwave drying kinetics and quality characteristics of corn. *International journal of agricultural and biological engineering*. 2013;6(1):90-99. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20130601.009>

12. Shivhare U.S., Raghavan G.S.V., Bosisio R.G. Microwave drying of corn. 1. Equilibrium moisture content. *Transactions of the ASAE*. 1992;35(3):947-950. <https://doi.org/10.13031/2013.28683>

13. Vasilyev A.A., Vasilyev A.N., Budnikov D.A. Using modeling to select the type of microwave field emitter for dense-layer grain dryers. *Applied Sciences*. 2023;13(16):9070. <https://doi.org/10.3390/app13169070>

14. Vasiliev A.N., Goryachkina V.P., Budnikov D. Research methodology for microwave-convective processing of grain. *International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEO)*. 2020;9(2):1-11. <https://doi.org/10.4018/IJEEO.2020040101>

15. Mallanna S.D., Viswanath K. Performance analysis of resonators for microwave applications. International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer and Optimization Techniques (ICEECCOT). Mysuru, India, 2018. Pp. 741-745. <https://doi.org/10.1109/ICEECCOT43722.2018.9001448>

16. Kabdin N.E., Andreev S.A. Ensuring the uniformity of microwave processing of agricultural materials in volumetric resonator. *International Technical and Economic Journal*. 2018;5:42-49. (In Rus.)

17. Nelson S.O. Dielectric properties of agricultural materials and their applications. Academic Press, 2015. 229 p.

18. Cherkashin D.E., Khakimov N.T. Using the CST MICROWAVE STUDIO software package to calculate the effective dispersion area of various objects. In: *Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference "Integration Processes in Modern Science: New Approaches and Current Issues"*. Anapa, 2022:62-66. (In Rus.)

19. Vasinkina E.Yu., Trigorry S.V., Kadykova Yu.A., Kalganova S.G. Modeling of microwave heat treatment of composite materials in resonator-type chambers. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta*. 2022;25(5):107-110. (In Rus.)

Информация об авторах

Алексей Алексеевич Васильев¹, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; Lex.of@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3147-659X>

Дмитрий Анатольевич Тихомиров², чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник; Tihda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474>

Алексей Николаевич Васильев³, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник;

Vasilev-viesh@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7988-2338>

^{1,2,3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

А.А. Васильев – формальный анализ, методология, проведение исследования, создание черновика рукописи

Д.А. Тихомиров – руководство исследованием

А.Н. Васильев – концептуализация, верификация данных

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 02.10.2023; после рецензирования и доработки 26.12.2023; принята к публикации 26.12.2023

Author information

Aleksei A. Vasiliev¹, CSc(Eng), Senior Researcher;

Lex.of@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3147-659X>

Dmitriy A. Tikhomirov², RAS Corresponding Member,

DSc (Eng), Professor, Chief Researcher; Tihda@mail.ru;

<https://orcid.org/0000-0002-3526-4474>

Aleksei N. Vasiliev³, DSc (Eng), Professor, Chief

Research Engineer, Vasilev-viesh@inbox.ru;

<https://orcid.org/0000-0002-7988-2338>

^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russian Federation

Author contribution

A.A. Vasiliev – formal analysis, methodology, investigation, original draft preparation

D.A. Tikhomirov – research supervision

A.N. Vasiliev – conceptualization, data verification

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 02.10.2023; revised 26.12.2023; accepted 26.12.2023