

18. *Anfinogentov V.I.* Chislennoe modelirovanie sverkhvysokochastotnogo elektromagnitnogo nagreva neszhimaemoy vyazkoy zhidkosti, dvizhushcheysya v tsilindricheskoj trube [Numerical simulation of ultra-high-frequency electromagnetic heating of an incompressible viscous liquid moving in a cylindrical tube], *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2006, Vol. 11, No. 2-3, pp. 3-9.
19. *Anfinogentov V.I.* Ob optimal'nom upravlenii SVCh nagrevom dielektrikov [On optimal control of microwave heating of dielectrics], *Aviakosmicheskie tekhnologii i oborudovanie: Mater. Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Aviation and space technologies and equipment: Materials of the International scientific and practical conference]. Kazan': Izd-vo Kazan, gos. tekhn. un-ta, 2006, pp. 346-349.
20. *Anfinogentov V.I., Galimov M.R., Morozov G.A., Morozov O.G.* Matematicheskoe modelirovanie mikrovolnovoy separatsii vodoneftyanoy emul'sii [Mathematical modeling of microwave separation of oil-water emulsion], *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT18: Sb. trudov XVIII Mezhdunarod, nauch. konf.* [Mathematical methods in engineering and technology-MMTT18: proceedings of the XVIII International scientific conference]. In 10 vol., Vol. 3. Kazan': Izd-vo Kazanskogo gos. tekhnol. un-ta, 2005, pp. 159-162.
21. *Bukreev V.G., Eremin A.D., Chekrygina I.M.* Patent na izobrenenie № 2101884 RF ot 10.01.1998. SVCh-nagrevatel' zhidkosti [Patent for invention No. 2101884 of the Russian Federation dated 10.01.1998. microwave liquid heater].
22. *Chekrygina I.M., Eremin A.D., Bukreev V.G., Rakitin A.N.* Patent na izobrenenie № 2171584 RF ot 10.08.2001. Sposob pasterizatsii (sterilizatsii) zhidkikh vodosoderzhashchikh pishchevykh produktov [Patent for invention No. 2171584 of the Russian Federation dated 10.08.2001. Method of pasteurization (sterilization) of liquid water-containing food products.].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Макаров.

Кисель Наталья Николаевна – Южный федеральный университет; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Ваганова Анастасия Алексеевна – e-mail: anastasia_vaganova@mail.ru; аспирантка; м.н.с.

Ваганов Иван Алексеевич – e-mail: vaganov@sfedu.ru; студент.

Kisel Natalia Nikolayevna – Southern Federal University; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

Vaganova Anastasia Alexeevna – e-mail: anastasia_vaganova@mail.ru; postgraduate student; junior researcher.

Vaganov Ivan Alexeevich – e-mail: vaganov@sfedu.ru; student.

УДК 621.372.81

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-78-88

Н.Н. Кисель, А.А. Ваганова, А.Н. Савицкий

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ЗЕРНА ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СВЧ ПОЛЯ

Высокая скорость и эффективность нагрева диэлектриков микроволновым излучением позволяют использовать электромагнитное поле для нагревания и высушивания практически любых содержащих влагу материалов. Одним из перспективных направлений использования СВЧ-энергии является интенсификация процесса сушки зерна. Для обеспечения быстрого прототипирования и снижения возможности потерь, обусловленных ошибками на различных стадиях разработки и внедрения оборудования, особую значимость приобретает разработка моделей. Цель данной работы состоит в выполнении имитационного моделирования волноводно-целевой решетки для сушки зерна. Основная задача, которая

стоит при моделировании, обеспечить равномерное распределение мощности каждой щелью. В качестве среды моделирования используется специализированный программный комплекс FEKO. Для описания модели используется точный метод расчета – метод моментов. Получено распределение электрического поля и удельной поглощаемой мощности в слое зерна, подвергающегося СВЧ облучению. Модели были верифицированы путем сравнения результатов, полученных при различном мешировании элементов поверхности. Моделирование распределения напряженности электрического поля показало, что отдаление волноводов от кюветы с зерном приводит к выравниванию неравномерностей поля, однако в этом случае некоторая часть излучаемой мощности рассеивается в пространство. При этом увеличение расстояния между волноводами и кюветой с зерном не влияет на КСВ антенн. Следует отметить, что в реальной обстановке волновой характер поля сглаживается за счет теплопереноса, и это явление не может быть учтено в процессе электромагнитного моделирования. Кроме того, следует исследовать весь спектр возможного изменения диэлектрических параметров зерна, чтобы проанализировать процесс распространения волны при высокой влажности зерна. Целесообразно также рассмотреть другие модификации волноводно-целевых антенн, которые смогут обеспечить более равномерный нагрев внутри кюветы с зерном.

Имитационное моделирование; нагрев диэлектриков; СВЧ нагрев; сушка зерна; волновод; волноводно-целевая антенна.

N.N. Kisel, A.A. Vaganova, A.N. Savitskiy

SIMULATION MODELING OF GRAIN HEATING BY THE ENERGY OF ELECTROMAGNETIC MICROWAVE FIELD

High speed and efficiency of microwave heating of dielectrics makes it possible to use the electromagnetic field to heat and dry almost any material containing moisture. One of the promising areas for the use of microwave energy is the intensification of the grain drying process. To ensure rapid prototyping and reduce the possibility of losses caused by errors at various stages of equipment development and implementation, model development is of particular importance. The purpose of this work is to perform simulation of a slotted waveguide grating for grain drying. The main task of the simulation is to ensure an even distribution of power to each slot. A specialized software package FEKO is used as a modeling environment. To describe the model, an exact calculation method is used - the method of moments. The distribution of the electric field and specific absorbed power in a layer of grain exposed to microwave radiation is obtained. The models were verified by comparing the results obtained with different mesh values of surface elements. Modeling the distribution of the electric field strength showed that moving the waveguides away from the cell with the grain leads to the leveling of the field irregularities, but in this case some of the radiated power is dissipated into space. In this case, an increase in the distance between the waveguides and the cell with grain does not affect the antenna SWR. It should be noted that in a real situation, the wave nature of the field is smoothed out due to heat transfer, and this phenomenon cannot be taken into account in the process of electromagnetic simulation. In addition, the entire variety of possible changes in the dielectric parameters of grain should be investigated in order to analyze the process of wave propagation in grain with high moisture. It is also advisable to consider other modifications of slotted waveguide antennas, which can provide more uniform heating in the container with grain.

Simulation modeling; dielectric heating; microwave heating; grain drying; waveguide; waveguide slot antenna.

Введение. Высокая скорость и эффективность нагрева диэлектриков микроволновым излучением позволяют использовать электромагнитное поле для нагревания и высушивания практически любых содержащих влагу материалов. Микроволновое излучение еще в 1960х гг. начали применять в промышленных масштабах для тепловой обработки и высушивания пищевых продуктов [1–15]. Сушка зерна (или других сыпучих материалов) заключается в удалении влаги путем испарения.

Микроволновый нагрев (диэлектрический, СВЧ нагрев) основан на проникновении электромагнитной энергии в материал и преобразовании ее в тепловую энергию. Проникновение электромагнитной энергии в материал происходит мгновенно, а поглощение зависит от диэлектрических свойств. Распределение тепловой энергии создает условия для ускорения диффузии пара из внутренних слоев материала к периферийным, что уменьшает энергетические затраты на процесс нагрева и сокращается его продолжительность. Интенсификация процесса сушки зерна является одним из перспективных направлений использования СВЧ-энергии.

Выбор частоты определяется характеристиками подлежащего нагреву материала. Для промышленных нагревательных устройств в России выделены следующие диапазоны частот: 433 МГц, 915 МГц, 2450 МГц. Диэлектрические показатели зерна не остаются постоянными и зависят от напряженности электрического поля, частоты воздействия, давления, температуры, плотности материала, влажности, от плотности зерновой смеси, сорта, наличия предварительной обработки, наличия примесей и других факторов, что необходимо учитывать при проектировании оборудования для их электромагнитной обработки.

Для обеспечения быстрого прототипирования и снижения возможности потерь, обусловленных ошибками на различных стадиях разработки и внедрения оборудования, особую значимость приобретает разработка моделей и имитационное моделирование этих моделей, включая анализ чувствительности геометрических параметров оборудования с целью определения требований к точности изготовления модулей оборудования. Кроме того, для правильного моделирования необходимы сведения об диэлектрических свойствах материалов и зависимость этих значений от плотности, влажности и т.д. Моделирование выполняется на основе электродинамического моделирования и может быть выполнена в таких программах продуктах как CST Studio, HFSS, FEKO [17–19].

Постановка задачи. Цель работы состоит в выполнении имитационного моделирования волноводно-щелевой решетки для сушки зерна. Основная задача, которая стоит при моделировании, обеспечить равномерное распределение мощности каждой щелью. В качестве среды моделирования используется специализированный программный комплекс FEKO. Моделирование выполняется на частоте 2450 МГц, в качестве источника используется магнетрон с минимальной мощностью 0,75 кВт и максимальной 1,5 кВт. Диэлектрическая проницаемость зерна лежит в пределах 2,6 – 3,4, потери составляют $\text{tg}\delta = 0,22 \dots 0,33$.

Для сушки зерна используются волноводно-щелевые антенны, представляющие собой систему полуволновых щелей, прорезанных в стенке волновода. Подвод энергии электромагнитного поля осуществляется сверху и снизу короба, в котором размещено зерно. Используются прямоугольные волноводы с волной H_{10} . Необходимо обеспечить однородное облучение протяжённого объекта, и мощность излучения всех щелей, расположенных на одном облучающем волноводе, должна быть одинаковой.

Способ решения. При расположении резонансной щели на продольной оси широкой стенки её нормированное сопротивление равно нулю, щель является неизлучающей. Таким образом, увеличивая по ходу подводимой мощности угол ориентации щели относительно продольной оси широкой стенки волновода, можно реализовать облучающую систему с однородным излучением СВЧ-мощности на значительной длине. Методика расчёта синфазных многощелевых антенн при короткозамкнутом конце линии подробно изложена в [16, 17].

Следует отметить, что синфазные волноводно-щелевые антенны являются резонансными как по размерам щелей, так и по расстоянию между ними, в случае рассогласования отражения от каждой щели в волноводе складываются в фазе и КСВ в питающем волноводе резко возрастает. Схема наклонной щели изображена на рис. 1.

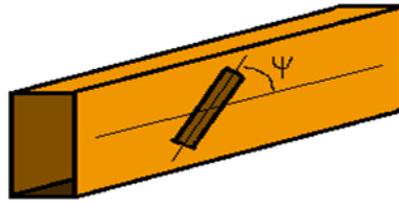


Рис. 1. Модель щели в широкой стенке волновода

Щель размещена симметрично относительно ее средней линии широкой стенки волновода. Поскольку щель возбуждается продольными токами (поперечные токи по обеим сторонам средней линии имеют противоположные знаки), поэтому i -щель эквивалентна последовательному сопротивлению

$$R = 0.131 \cdot \frac{\lambda}{\lambda_b} \frac{\lambda^2}{ab} \left[f_1(\psi) \sin(\psi) + \frac{\lambda_b}{2a} f_2(\psi) \cos(\psi) \right]^2,$$

$$f_1(\psi) = \frac{\cos \frac{\pi \xi}{2}}{1 - \xi^2} - \frac{\cos \frac{\pi \gamma}{2}}{1 - \gamma^2}, f_2(\psi) = \frac{\cos \frac{\pi \xi}{2}}{1 - \xi^2} + \frac{\cos \frac{\pi \gamma}{2}}{1 - \gamma^2},$$

$$\xi = \frac{\lambda}{\lambda_b} \cos \psi - \frac{\lambda}{2a} \sin \psi, \gamma = \frac{\lambda}{\lambda_b} \cos \psi + \frac{\lambda}{2a} \sin \psi,$$

где ψ – угол между осью щели и средней линией стенки волновода. Для выполнения условия согласования необходимо, чтобы выполнялось условие

$$Rn = l,$$

n – количество щелей в волноводно-щелевой решетке. На рис. 2 приведена зависимость нормированного сопротивления щели от угла наклона щели относительно поперечно ориентированной щели в узкой стенке волновода.

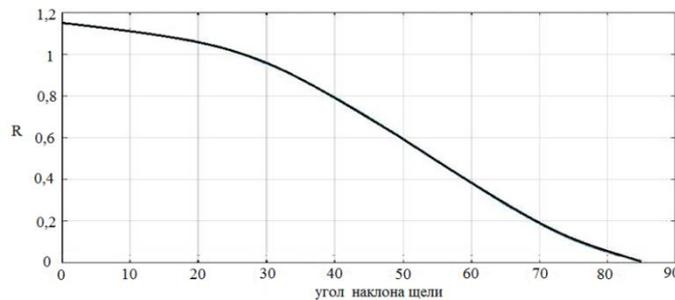


Рис. 2. Зависимость нормированного сопротивления щели от угла наклона щели относительно поперечной щели в широкой стенке волновода

На рис. 3 показана зависимость нормированного сопротивления щели от угла наклона щели относительно поперечной щели в широкой стенке волновода для неоднородного волновода, в котором высота волновода линейно уменьшается по мере удаления от источника (сужение волновода по вертикали).

Зависимости нормированного сопротивления позволяют выбрать угол наклона щелей как в однородном, так и в суживающем волноводе, обеспечивающий условие согласования.

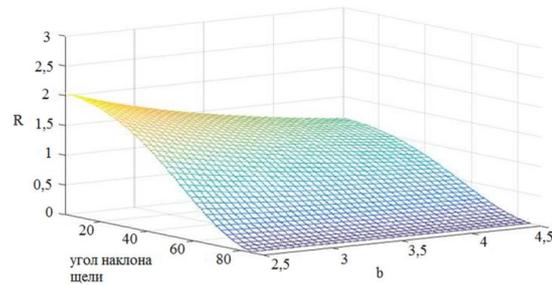


Рис. 3. Зависимость нормированного сопротивления щели R от угла наклона щели в широкой стенке волновода и высоты волновода b

Исследуемая модель волноводно-щелевой антенны с 28 щелями, выполненная в программе FEKO изображена на рис. 4. Для описания модели использовался точный метод расчета – метод моментов.

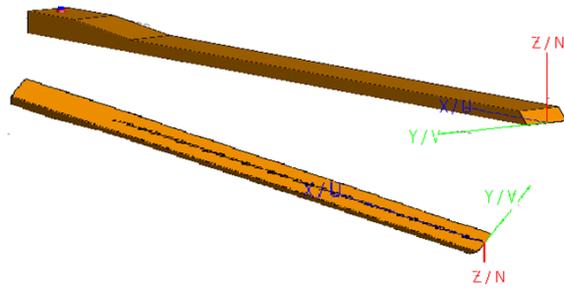


Рис. 4. Модель волноводно-щелевой антенны в пакете FEKO

Для изображенной выше модели волноводно-щелевой антенны были исследованы зависимости КСВ (коэффициента стоячей волны) антенны от ширины щелей и угла поворота щелей (рис. 5). Модели были верифицированы путем сравнения результатов, полученных при различном мезшировании элементов поверхности.

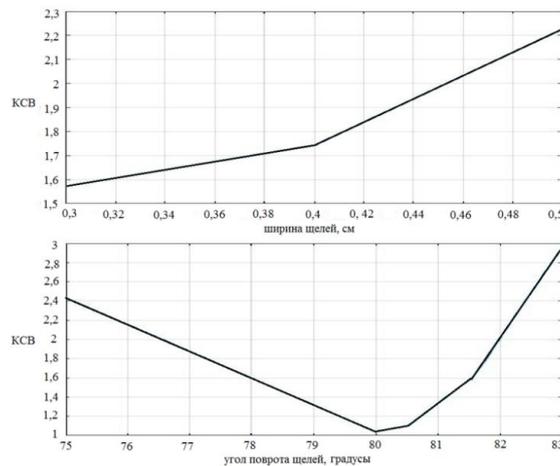


Рис. 5. Зависимость КСВ от ширины щелей и от угла наклона щелей (угол отсчитывается от поперечной ориентации щелей)

Как видно из приведенных зависимостей, увеличение ширины щелей ведет к почти линейному увеличению КСВ в волноводном тракте. Поэтому для дальнейших расчетов ширина щелей была принята равной 3 мм. Зависимость КСВ от угла поворота щелей имеет ярко выраженный минимум. При этом изменение угла наклона от 75° до 83° приводит к изменению КСВ в пределах от 1,1 до 3.

Обсуждение результатов. На рис. 6 приведено распределение напряженности электрического поля в продольной плоскости волновода. Наибольшая неравномерность наблюдается в центре волноводно-щелевой антенны, которая может быть устранена за счет изменения углов поворота щелей с номерами 12–17. Следует отметить, что такое решение приведет к росту КСВ антенны, однако для исследуемой модели КСВ не превышает 1,7.

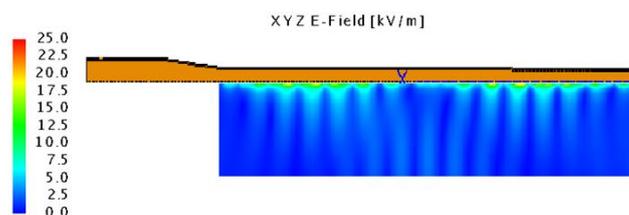


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля в продольной плоскости волновода

Таким образом, все 28 щелей антенны излучают электромагнитное поле, при этом обеспечивается КСВ в волноводном тракте не хуже 1,7.

Конструктивно оборудование обработки зерна представляет собой емкость с зерном, которая подвергается СВЧ-обработке с помощью двух волноводно-щелевых антенн, расположенных с противоположных сторон и сдвинутых относительно друг друга с целью создания более равномерного распределения в объеме. Исследуемая модель приведена на рис. 7. Расстояние между емкостью с зерном и волноводами $h_{\text{зазор}}$ составило $\lambda_g/8$, $\lambda_g/4$, где λ_g – длина волны в волноводе. Ширина щелей принята 0,3 см, угол наклона щелей $82,25^\circ$, КСВ не превышает 1,7 для обоих случаев расположения волноводов по отношению к кювету с зерном.

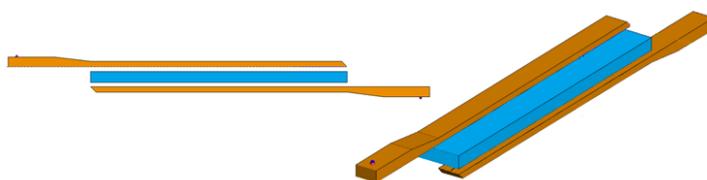


Рис. 7. Модель обработки зерна СВЧ-излучением, созданным двумя волноводно-щелевыми антеннами

Следует особо обратить внимание на выбор высоты кювета с зерном. Неравномерность распространения мощности по толщине обрабатываемого материала обусловлена потерями в слоях материала по мере удаления от источника. Основной характеристикой этой неравномерности может служить глубина проникновения поля, которая определяется по зависимости:

$$\tau = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\epsilon'} \operatorname{tg} \delta'}$$

где λ – длина волны, м; ε' – диэлектрическая постоянная материала, $\operatorname{tg}\delta$ – тангенс угла потерь. Глубина проникновения поля показывает на какой толщине поле ослабевает в e -раз. На рис. 8 изображена зависимость толщины *skin*-слоя от потерь в материале и диэлектрической проницаемости материала. Величина *skin*-слоя является определяющим параметром при выборе размеров кювета с зерном.

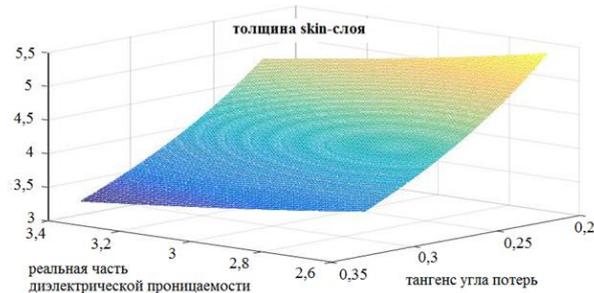


Рис. 8. Зависимость толщины *skin*-слоя от потерь в материале и диэлектрической проницаемости материала

Ниже приведены результаты электромагнитного моделирования напряженностей полей и удельной поглощаемой мощности (Вт/кг) внутри кювета с зерном в горизонтальных и вертикальных плоскостях. Расположение двух сдвинутых относительно друг друга волноводов позволяет выполнить более равномерный нагрев зерна внутри объема. В работе исследованы распределения электрического поля и удельной поглощаемой мощности в вертикальной и горизонтальной плоскостях, ориентированных по отношению к щелям волноводно-щелевой антенны, при различном расстоянии от кювета с зерном. Как показали расчеты, удаление волновода от поверхности кювета приводит к более равномерному распределению электрического поля при одновременном снижении его уровня. На рис. 9–12 приведены распределения напряженностей электрических полей и удельной поглощаемой мощности в горизонтальной и вертикальной плоскостях в середине кювета с зерном при расстоянии волновода от кювета с зерном, равном $\lambda_w/4$.

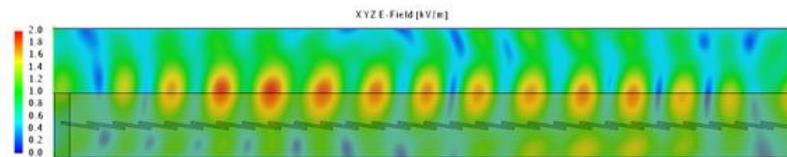


Рис. 9. Распределение электрического поля в середине слоя зерна в горизонтальной плоскости ($h_{\text{зазор}} = \lambda_w/4$)

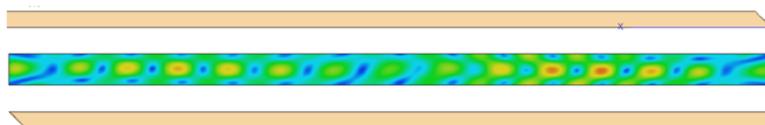


Рис. 10. Распределение электрического поля в середине слоя зерна в вертикальной плоскости ($h_{\text{зазор}} = \lambda_w/4$)

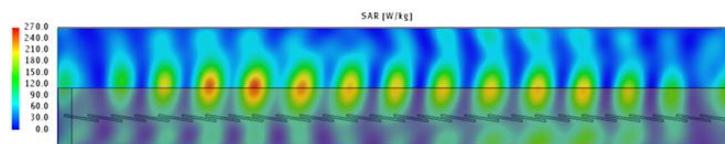


Рис. 11. Удельная поглощаемая мощность в середине слоя зерна в горизонтальной плоскости ($h_{\text{зазор}} = \lambda_d/4$)

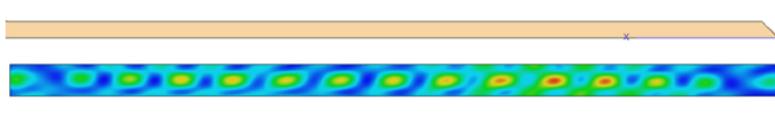


Рис. 12. Удельная поглощаемая мощность в середине слоя зерна в вертикальной плоскости ($h_{\text{зазор}} = \lambda_d/4$)

Таким образом, приведенная модель волноводно-щелевой антенны позволяет осуществить нагрев зерна. Для улучшения проникновения электромагнитной волны предлагается между волноводом и кюветом располагать согласующий слой диэлектрического материала с параметрами $\sqrt{\epsilon'}$ для улучшения согласования с объемом зерна. Приведенные примеры распределений полей показывают, что имеется неравномерность распределения поля по объему камеры. Некоторое удаление волноводов от камеры приводит к выравниванию неоднородности поля, но при этом часть излучаемой мощности теряется. Как показали результаты расчета увеличение расстояния от волновода до кювета с зерном не отразилось на КСВ волноводов.

Заключение. В данной работе было выполнено имитационное моделирование нагрева зерна с помощью облучения его электромагнитным СВЧ полем. Основная задача моделирования состояла в обеспечении равномерного нагрева зерна за счет равномерного распределения мощности, излучаемой всеми щелями в волноводе. Были получены зависимости КСВ антенны от ширины и угла наклона щелей, что позволило выбрать оптимальное расположение щелей. С помощью специализированного программного комплекса FEKO получено распределение электрического поля и удельной поглощаемой мощности в слое зерна, подвергающегося СВЧ облучению.

Моделирование распределения напряженности электрического поля показало, что отдаление волноводов от кюветы с зерном приводит к выравниванию неоднородностей поля, однако в этом случае некоторая часть излучаемой мощности рассеивается в пространство. При этом, как показали результаты вычислений, увеличение расстояния между волноводами и кюветой с зерном не влияет на КСВ антенн.

Следует отметить, что в реальной обстановке волновой характер поля сглаживается за счет теплопереноса, и это явление не может быть учтено в процессе электромагнитного моделирования. Кроме того, следует исследовать весь спектр возможного изменения диэлектрических параметров зерна, чтобы проанализировать процесс распространения волны при высокой влажности зерна. Целесообразно также рассмотреть другие модификации волноводно-щелевых антенн, которые смогут обеспечить более равномерный нагрев внутри кюветы с зерном.

Научные исследования выполнены в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства аппаратно-программных комплексов обработки сельхозсырья на основе СВЧ излучения» (Соглашение с Минобрнауки РФ № 075-11-2019-083 от 20.12.2019 г., Договор ЮФУ № 18 от 20.09.2019 г., номер работы в ЮФУ № ХД/19-25-РТ).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Будников Д.А. Исследование динамических свойств зернового слоя при СВЧ-конвективном воздействии // Инновации в сельском хозяйстве. – 2014. – № 4. – С. 92-96.
2. Будников Д.А. Планирование эксперимента по контролю изменения комплексного диэлектрического показателя зернового слоя при СВЧ-конвективном воздействии // Вестник ВНИИМ. – 2015. – № 4. – С. 39-42.
3. Будников Д.А. Поглощение электромагнитного поля СВЧ сельскохозяйственными материалами // Вестник ВИЭСХ. – 2013. – № 2. – С. 38-40.
4. Цымбал А.А., Будников Д.А. Диэлектрические свойства зерновых // Вестник ВНИИМЖ. – 2016. – № 4 (24).
5. Будников Д.А. Исследование распределения напряженности СВЧ поля в зерновом слое // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3.
6. Vaptista F., Silva L.L., C. de Visser. Energy Efficiency in Agriculture // 5th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management. Lisbon, Portugal 2013.
7. Васильев А.Н., Будников Д.А., Смирнов Б.Г. Эффективность применения поля СВЧ для интенсификации сушки зерна активным вентилированием // Переработка и хранение сельскохозяйственной продукции. – 2008. – № 7. – С. 29-30.
8. Vankatesh M.S. An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials // Biosystems Engineering. – 2004. – Vol. 88 (1). – P. 1-18.
9. Будников Д.А. Моделирование влияния конструктивных параметров зоны обработки на распределение поля СВЧ в электро-технологическом модуле для сушки и обработки зерна // Инновации в сельском хозяйстве. – 2014. – № 4 (9). – С. 88-91.
10. Uy S., Easteal A., Farid M., Keam R., Conner G. Seaweed processing using industrial single-mode cavity microwave heating: a preliminary investigation // Carbohydrate Research. – 2005. – P. 1357-1364.
11. Dev S.R., Garipey Y., Orsat V., Raghavan G. FDTD modeling and simulation of microwave heating of in-shell eggs // Progress in Electromagnetics Research. – 2010. – Vol. 13. – P. 229-243.
12. Lurie K.A., Yakovlev V.V. Method of control and optimization of microwave heating in waveguide systems // IEEE Transactions on Magnetics. – 1999. – Vol. 35, No. 3. – P. 1777-1780.
13. Domínguez-Tortajada E., Monzo-Cabrera J., Diaz-Morcillo A. Uniform electric field distribution in microwave heating applicator by means of genetic algorithms optimization of dielectric multilayer structures // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2007. – Vol. 55, No. 1. – P. 85-91.
14. Xie G.Q., Suzuki M., Louzguine-Luzgin D.V., Li S., Tanaka M., Sato M., Inoue A. Analysis of electromagnetic field distribution in a 915 MHz single mode microwave applicator // Progress in Electromagnetics Research. – 2009. – Vol. 89. – P. 135-148.
15. Risman P.O., Celuch-Marcysiak M. Electromagnetic modelling for microwave heating applications. In Microwaves, Radar and Wireless Communications // MIKON-2000. 13th International Conference on. – 2000. – P. 167-182.
16. Кременецкий С.Д., Лось В.Ф., Шаманов А.Н. Волноводно-щелевые антенные решетки // Антенны. – 2004. – № 8-9 (87-88). – С. 47-55.
17. Евстропов Г.А., Царанкин С.А. Исследование волноводно-щелевых антенн с идентичными резонансными излучателями // Радиотехника и электроника. – 1965. – № 9. – С. 1663-1670.
18. Кисель Н.Н. Моделирование задач электродинамики и антенн на супервычислительной системе в пакете ФЕКО: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 326 с.
19. Кисель Н.Н. Электродинамическое моделирование антенн и устройств СВЧ в пакете ФЕКО: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 263 с.
20. Кисель Н.Н. Основы компьютерного проектирования РЭС САПР СВЧ: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 196 с.

REFERENCES

1. Budnikov D.A. Issledovanie dinamicheskikh svoystv zernovogo sloya pri SVCh-konvektivnom vozdeystvii [Research of dynamic properties of the grain layer under microwave convective action], *Innovatsii v sel'skom khozyaystve* [Innovations in agriculture], 2014, No. 4, pp. 92-96.

2. *Budnikov D.A.* Planirovanie eksperimenta po kontrolyu izmeneniya kompleksnogo dielektricheskogo pokazatelya zernovogo sloya pri SVCh-konvektivnom vozdeystvii [Planning an experiment to control changes in the complex dielectric index of the grain layer under microwave convective influence], *Vestnik VNIIM* [Vestnik VNIIM], 2015, No. 4, pp. 39-42.
3. *Budnikov D.A.* Pogloshchenie elektromagnitnogo polya SVCh sel'skokhozyaystvennymi materialami [Absorption of the microwave electromagnetic field by agricultural materials], *Vestnik VIESKh* [Bulletin of RESh], 2013, No. 2, pp. 38-40.
4. *TSymbal A.A., Budnikov D.A.* Dielektricheskie svoystva zernovykh [Dielectric properties of grains], *Vestnik VNIIMZh* [Bulletin of VNIIMI], 2016, No. 4 (24).
5. *Budnikov D.A.* Issledovanie raspredeleniya napryazhennosti SVCh polya v zernovom sloe [Investigation of the distribution of the microwave field strength in the grain layer], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the don], 2015, No. 3.
6. *Baptista F., Silva L.L., C. de Visser.* Energy Efficiency in Agriculture, *5th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management. Lisbon, Portugal 2013.*
7. *Vasil'ev A.N., Budnikov D.A., Smirnov B.G.* Effektivnost' primeneniya polya SVCh dlya intensivatsii sushki zerna aktivnym ventilirovaniem [Efficiency of application of the microwave field for intensification of grain drying by active ventilation], *Pererabotka i khraneniye sel'skokhozyaystvennoy produktsii* [Processing and storage of agricultural products], 2008, No. 7, pp. 29-30.
8. *Vankatesh M.S.* An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials, *Biosystems Engineering*, 2004, Vol. 88 (1), pp. 1-18.
9. *Budnikov D.A.* Modelirovanie vliyaniya konstruktivnykh parametrov zony obrabotki na raspredeleniye polya SVCh v elektro-tehnologicheskoy module dlya sushki i obrabotki zerna [Modeling the influence of design parameters of the processing zone on the distribution of the microwave field in the electro-technological module for grain drying and processing], *Innovatsii v sel'skom khozyaystve* [Innovations in agriculture], 2014, No. 4 (9), pp. 88-91.
10. *Uy S., Easteal A., Farid M., Keam R., Conner G.* Seaweed processing using industrial single-mode cavity microwave heating: a preliminary investigation, *Carbohydrate Research*, 2005, pp. 1357-1364.
11. *Dev S.R., Garipey Y., Orsat V., Raghavan G.* FDTD modeling and simulation of microwave heating of in-shell eggs, *Progress in Electromagnetics Research*, 2010, Vol. 13, pp. 229-243.
12. *Lurie K.A., Yakovlev V.V.* Method of control and optimization of microwave heating in waveguide systems, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, Vol. 35, No. 3, pp. 1777-1780.
13. *Dominiguez-Tortajada E., Monzo-Cabrera J., Diaz-Morcillo A.* Uniform electric field distribution in microwave heating applicator by means of genetic algorithms optimization of dielectric multilayer structures, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2007, Vol. 55, No. 1, pp. 85-91.
14. *Xie G.Q., Suzuki M., Louzguine-Luzgin D.V., Li S., Tanaka M., Sato M., Inoue A.* Analysis of electromagnetic field distribution in a 915 MHz single mode microwave applicator, *Progress in Electromagnetics Research*, 2009, Vol. 89, pp. 135-148.
15. *Risman P.O., Celuch-Marcysiak M.* Electromagnetic modelling for microwave heating applications. In *Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON-2000. 13th International Conference on*, 2000, pp. 167-182.
16. *Kremenetskiy S.D., Los' V.F., Shamanov A.N.* Volnovodno-shchelevyye antennye reshetki [Waveguide-slot antenna arrays], *Antenny* [Antennae], 2004, No. 8-9 (87-88), pp. 47-55.
17. *Evstropov G.A., TSarapkin S.A.* Issledovanie volnovodno-shchelevykh anten s identichnymi rezonansnymi izluchatelyami [Investigation of waveguide-slit antennas with identical resonant emitters], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 1965, No. 9, pp. 1663-1670.
18. *Kisel' N.N.* Modelirovanie zadach elektrodinamiki i antenn na supervychislitel'noy sisteme v pakete FEKO: ucheb. posobie [Modeling of electrodynamic and antenna problems on a supercomputing system in the FEKO package: tutorial]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 326 p.
19. *Kisel' N.N.* Elektrodinamicheskoye modelirovanie antenn i ustroystv SVCh v pakete FEKO: ucheb. posobie [Electrodynamic modeling of antennas and microwave devices in the FEKO package: tutorial]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2010, 263 p.
20. *Kisel' N.N.* Osnovy komp'yuternogo proektirovaniya RES SAPR SVCh: ucheb. posobie [Fundamentals of computer design RES CAD microwave: textbook]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 196 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Макаров.

Кисель Наталья Николаевна – Южный федеральный университет; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Ваганова Анастасия Алексеевна – e-mail: anastasia_vaganova@mail.ru; аспирантка; м.н.с.

Савицкий Алексей Николаевич – e-mail: savicky@sfedu.ru; студент.

Kisel Natalia Nikolayevna – Southern Federal University; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

Vaganova Anastasia Alexeevna – e-mail: anastasia_vaganova@mail.ru; postgraduate student; junior researcher.

Savitskiy Alexei Nikolaevich – e-mail: savicky@sfedu.ru; student.