

18. *Byrne C.J., Karafin B.J., Robinson D.B.* Systematic Jitter in a Chain of Digital Repeaters, *Bell System Technical Journal*, November 1963, pp. 2679- 2714.
19. *Gardner F.M.* Phaselock Techniques. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York, 1979.
20. *Sunde E.D.* Self-Timing Regenerative Repeaters, *Bell System Technical Journal*, July 1957, pp. 891-938.
21. *Duttweiler D.L.* The Jitter Performance of Phase-Locked Loops Extracting Timing from Base-band Data Waveforms, *Bell System Technical Journal*, January 1976, pp. 37-58.
22. Impact of Jitter on the Second Order Digital Multiplex at 6312 kbit/s, *AT&T Submittal to CCITT study group on jitter, Green Book*, Vol. 3, pp. 861-869.
23. *Muratani T. Saitoh H.* Synchronization in TDMA Satellite Communications, *IEEE International Conference on Communications*, 1979, pp. 11.4.1-11.4.6.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Марчук.

Нсue Хасинто Мба Бийе – Южный федеральный университет; e-mail: jacintonsue@gmail.com; 347928, г. Таганрог, ул. Некрасовский, 44; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Федосов Валентин Петрович – e-mail: vpfedosov@sfnedu.ru, кафедра теоретических основ радиотехники; профессор.

Кучерявенко Светлана Валентиновна – e-mail: svkucheryavenko@sfnedu.ru, кафедра теоретических основ радиотехники; доцент.

Nsue Jacinto Mba Biye – Southern Federal University; e-mail: jacintonsue@gmail.com; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632; postgraduate student.

Fedosov Valentin Petrovich – e-mail: vpfedosov@sfnedu.ru, professor.

Kucheryavenko Svetlana Valentinovna – e-mail: svkucheryavenko@sfnedu.ru, associate professor.

УДК 621.372.81

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-68-78

Н.Н. Кисель, А.А. Ваганова, И.А. Ваганов

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА МОЛОКА ЭНЕРГИЕЙ СВЧ ПОЛЯ

Термообработка диэлектрических материалов и пищевых продуктов является одним из важных направлений развития производства различной продукции. Использование энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот для сушки, нагрева, размораживания и пастеризации пищевых продуктов является перспективным, поскольку такие технологии подходят обработки различных диэлектрических материалов и при этом являются эффективными и экологически чистыми. Несмотря на наличие множества разработок в сфере обработки материалов с помощью СВЧ, создание универсального устройства, подходящего для тепловой обработки любых материалов, затруднительно из-за разнообразия их форм и размеров, а также существенного различия электрофизических свойств диэлектриков. Поэтому в каждом конкретном случае требуется создавать оптимальную конструкцию устройства и выбирать вариант возбуждения электромагнитного поля. Данная работа посвящена моделированию поглощения энергии электромагнитного поля СВЧ в устройстве для пастеризации молока. С применением САПР FEKO построена 3D модель устройства и выполнено моделирование его работы. Проведено исследование влияние угла наклона кварцевых трубок на распределение электромагнитного поля в волноводе. Полученные результаты показывают, что большая часть мощности поглощается ближе к началу волновода, причем при увеличении угла наклона трубок это явление имеет более выраженный характер. На основании проведенных расчетов установлен оптимальный угол наклона трубок. Также рассмотрено влияние диаметра и материала трубок. Получены распределения электрического поля и удельной мощности, поглощенной на кг диэлектрика в волноводе.

Выполнена оценка точности результатов. Возможными модификациями предлагаемой конструкции устройства пастеризации могут быть другие варианты расположения трубок с жидкостью. Также влияние на поглощаемую мощность может оказывать толщина стенок трубки. Кроме того, состав молока изменяет его электрофизические свойства, и соответственно также может повлиять на уровень поглощаемой мощности. Однако эти вопросы требуют дальнейшего исследования.

Имитационное моделирование; СВЧ нагрев; САПР; удельная поглощаемая мощность; SAR; волновод.

N.N. Kisel, A.A. Vaganova, I.A. Vaganov

SIMULATION MODELING OF MILK HEATING BY THE ENERGY OF MICROWAVE FIELD

Heat treatment of dielectric materials and food products is one of the important directions in the development of the production of various products. The use of the electromagnetic field energy of ultrahigh frequencies for drying, heating, defrosting and pasteurizing food products is promising, since such technologies are suitable for processing various dielectric materials and, at the same time, are efficient and environmentally friendly. Despite many developments in the field of microwave processing of materials, the creation of a universal device suitable for heat treatment of any kind of materials is difficult because of the variety of their shapes and sizes, as well as the significant difference in the electrical properties of various dielectrics. Therefore, in each specific case, it is required to create an optimal design of the device and choose the option for exciting the electromagnetic field. This work is devoted to modeling the absorption of energy of the microwave electromagnetic field in a device for milk pasteurization. Using CAD FEKO, a 3D model of the device was built and its operation was modeled. The study of the influence of the angle of inclination of quartz tubes on the distribution of the electromagnetic field in the waveguide is carried out. The results show that most of the power is absorbed closer to the beginning of the waveguide, and this phenomenon is more pronounced with an increase in the angle of inclination of the tubes. On the basis of performed calculations, the optimal angle of inclination of the tubes was determined. The influence of the diameter and material of the tubes was also considered. The distributions of the electric field and specific power absorbed per kg of dielectric in the waveguide are obtained. The accuracy of the results is evaluated. Possible modifications of the proposed design of the pasteurization device can be made by choosing other variants of the arrangement of the tubes with milk. The thickness of the tube's walls can also affect the absorbed power. In addition, the composition of milk can change its electrophysical properties, and therefore can also affect the level of absorbed power. However, these questions require further research.

Simulation modeling; pasteurization; microwave heating; CAD; specific absorption power; SAR; waveguide.

Введение. Термообработка диэлектрических материалов и пищевых продуктов является одним из важных направлений развития производства различной продукции. Использование энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот для сушки, нагрева, размораживания и пастеризации пищевых продуктов является перспективным, поскольку такие технологии подходят обработки различных диэлектрических материалов и при этом являются эффективными и экологически чистыми.

Существует множество исследований, посвященных проблеме разработки СВЧ-устройств, позволяющих обеспечить равномерный нагрев диэлектрического материала [1–22]. Так в работе [4] исследуется возможность применения СВЧ-устройств для плавления снежно-ледяной массы. Работы [5, 6] посвящены проблеме повышения равномерности нагрева диэлектриков в СВЧ-установках резонаторного типа за счет использования распределенных систем возбуждения. При проведении экспериментов в качестве диэлектрического поглощающего материала использовалась вода. Определялось распределение теплового поля в рассматриваем-

мом материале, уровень поглощаемой СВЧ-мощности и неравномерность нагрева. В работах [7, 8] предложен способ повышения равномерности нагрева диэлектрических материалов и пищевых продуктов в резонаторных СВЧ-установках, основанный на распределении энергии СВЧ по объему нагреваемого материала и предложена конструкция четырехщелевой управляемой системы возбуждения электромагнитного поля, позволяющая реализовать предложенный способ. Работы [9, 10] посвящены разработке СВЧ-устройств равномерного нагрева диэлектрических материалов. Рассматриваются устройства волноводного и резонаторного типов сложного сечения. В работах [10–14], посвященных разработке и исследованию СВЧ-устройств для термообработки диэлектрических материалов, предложены волноводные устройства круглого и меандрового типа, позволяющие выполнять равномерную обработку диэлектриков по сечению в режиме бегущей волны. В работах [15–17] рассмотрены проблемы применения технологии СВЧ-нагрева в химическом производстве. Работа [18–20] посвящены математическому моделированию микроволновой обработки диэлектриков, в том числе нефти.

Несмотря на наличие множества разработок в сфере обработки материалов с помощью СВЧ, создание универсального устройства, подходящего для тепловой обработки любых материалов, затруднительно из-за разнообразия их форм и размеров, а также существенного различия электрофизических свойств диэлектриков. Поэтому в каждом конкретном случае требуется создавать оптимальную конструкцию устройства и выбирать вариант возбуждения электромагнитного поля.

Постановка задачи и способ решения. Цель работы состоит в том, чтобы промоделировать процесс нагрева молока электромагнитным СВЧ полем в устройстве пастеризации и выбрать оптимальные параметры устройства.

В данной работе исследуется устройство для пастеризации жидкостей, конструкция которого предложена в [21–22]. Упрощенно конструкция устройства показана на рис. 1. Его основой является прямоугольный волновод с проходящими через него полыми диэлектрическими трубками. На вход нагревателя подаются СВЧ-колебания с частотой 915 МГц. Далее диэлектрические трубки, включенные последовательно наполняются жидкостью. В данной работе в качестве нагреваемой жидкости рассматривается молоко с теплоемкостью 3,96 кДж/кг и относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$. Протекая через волновод, жидкость в диэлектрических трубках поглощает СВЧ-энергию и нагревается до заданной температуры. Температура нагрева жидкости определяется скоростью ее прохождения по диэлектрическим трубкам и мощностью СВЧ-генератора.

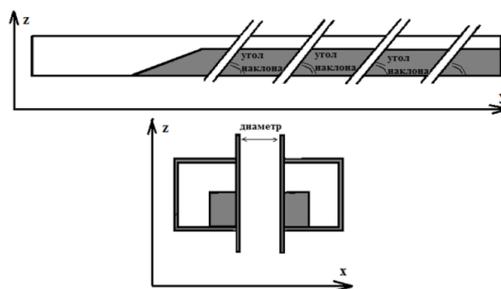


Рис. 1. Конструкция устройства

В качестве среды моделирования использовалась САПР ФЕКО, предназначенная для проведения электродинамических расчетов. На рис. 2 показана созданная в этой программе 3D модель устройства пастеризации и выделены сечения, в которых был выполнен расчет электромагнитного поля.

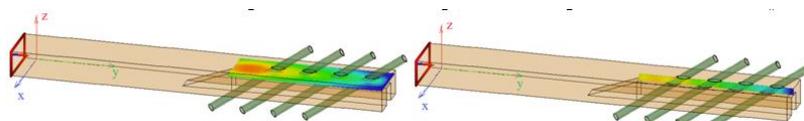


Рис. 2. Модель устройства пастеризации в программе FEKO

Необходимо промоделировать влияние таких параметров, как угол наклона трубок, их диаметр и материал на распределение электромагнитного поля в волноводе, чтобы выбрать оптимальный вариант. При расчете использовался метод конечных элементов, заложенный в программе FEKO. Были рассчитаны распределения электрического поля (E) и удельной мощности (SAR), поглощенной на кг диэлектрика в волноводе.

Обсуждение результатов. Проведено исследование влияния угла наклона кварцевых трубок на распределение электромагнитного поля в волноводе. Угол наклона трубок выбирается исходя из следующих ограничений. С одной стороны, при расположении трубок близком к вертикальному, жидкость будет протекать через них слишком быстро и не успеет прогреться до требуемой температуры. С другой стороны, при расположении трубок близком к горизонтальному, они начнут перекрывать друг друга по вертикали, то есть в одной точке вдоль волновода окажется несколько расположенных друг над другом трубок. С учетом этого, в данной работе угол наклона изменялся в диапазоне $35^\circ \dots 55^\circ$. Были рассчитаны распределения электрического поля (E) и удельной мощности (SAR), поглощенной на кг диэлектрика в волноводе.

На рис. 3 показана рассчитанная величина удельной мощности, поглощаемой в объеме диэлектрика, при разных углах наклона трубок. Рис. 3 соответствует сечению волновода в плоскости yOz . Видно, что большая часть мощности поглощается ближе к началу волновода, при чем при увеличении наклона трубок это явление имеет более выраженный характер. Так при угле в 55° поглощение в четвертой трубке практически отсутствует, а в третьей – значительно ослабевает.

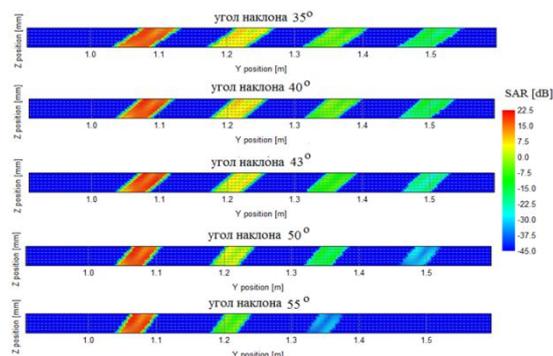


Рис. 3. Удельная поглощаемая мощность в плоскости yOz

Рис. 4 показывает распределение электрического поля (E) вдоль волновода и величину удельной поглощаемой мощности (SAR) в каждой трубке. Линии разного цвета соответствуют разным углам наклона. Видно, что уровень мощности, поглощаемой диэлектриком в первой трубке приблизительно одинаков при любом угле наклона, но при увеличении угла наклона распределение мощности по трубкам имеет более спадающий характер.

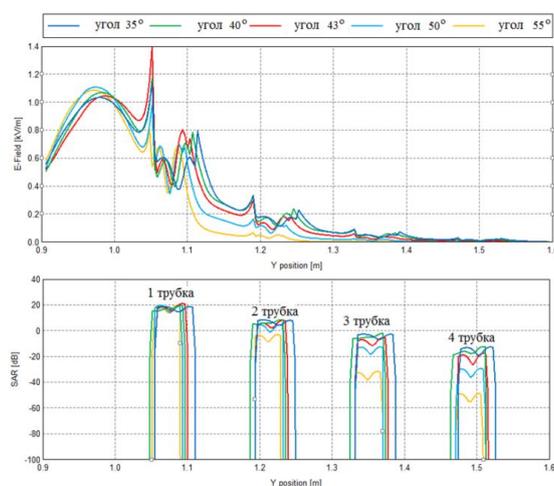


Рис. 4. Распределение электрического поля вдоль волновода и удельная поглощаемая мощность в каждой трубке при разных углах наклона

На рис. 5 изображена величина удельной поглощаемой мощности в ваттах на килограмм. При этом, поскольку разница между мощностью поглощенной в первой и последней трубках очень велика, ось Oy разбита на два участка.

На основании проведенных расчетов является оптимальным выбрать угол наклона трубок равный 43° , поскольку он не слишком пологий, однако при этом в работе задействованы все четыре трубки (во всех происходит поглощение мощности, а соответственно, и нагрев жидкости). При этом во всех случаях получить равномерное распределение поглощаемой мощности по трубкам не удастся, и уровень мощности в первой и последней трубках отличается примерно в 20 раз. Однако согласно описанию предлагаемой конструкции, жидкость протекает через эти трубки последовательно, а не параллельно, поэтому полученная неравномерность является приемлемой.

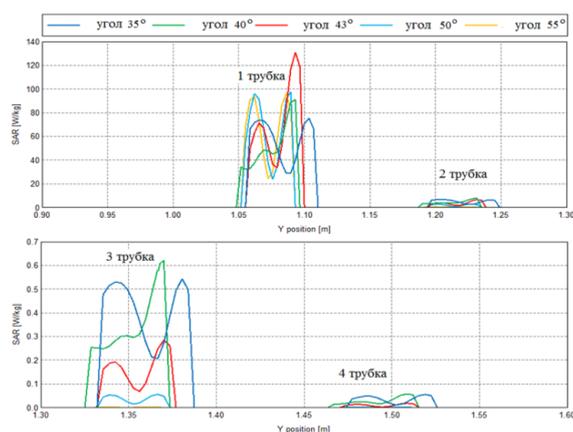


Рис. 5. Удельная поглощаемая мощность в каждой трубке

На рис. 6 показано распределение электрического поля вдоль волновода и удельной поглощаемой мощности в каждой трубке при разной величине диаметра трубок. Во всех случаях угол наклона равен 43° . Видно, что изменение диаметра на 10–15 % не оказывает существенного влияния на распределение электрического поля.

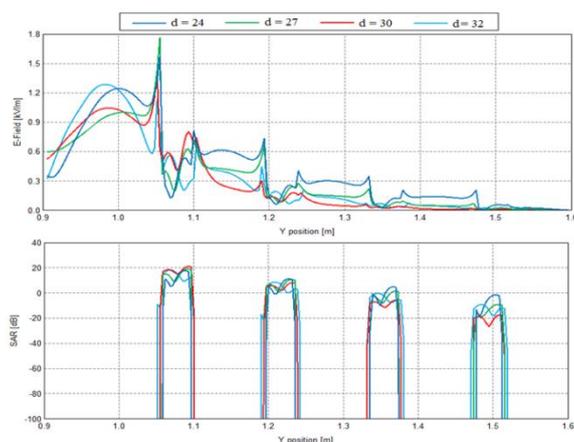


Рис. 6. Распределение электрического поля и удельная поглощаемая мощность в каждой трубке при разной величине диаметра трубок

Наиболее общим требованием к материалу, из которого изготавливаются трубки, является то, что материал должен быть прозрачен для СВЧ-энергии и непрозрачен для жидкости. Выполнено моделирование для трех значений диэлектрической проницаемости материала – $\epsilon = 1$ соответствует диэлектрической проницаемости свободного пространства, $\epsilon = 4$ соответствует кварцевому стеклу и $\epsilon = 9$ соответствует квадратному корню из диэлектрической проницаемости молока.

На рис. 7 показано распределение электрического поля вдоль волновода и удельной поглощаемой мощности в каждой трубке при разных значениях диэлектрической проницаемости материала трубок. При $\epsilon = 1$, что фактически равнозначно отсутствию ограничивающего жидкость материала, поле убывает с расстоянием наиболее сильно. Также видно, что результаты для $\epsilon = 4$ и $\epsilon = 9$ практически одинаковы. Это позволяет использовать в устройстве стандартные кварцевые трубки.

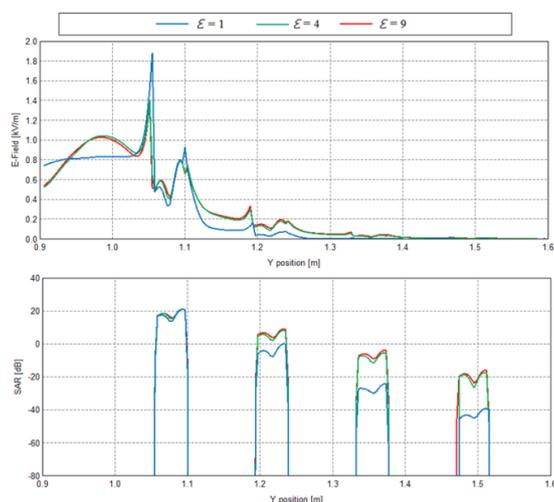


Рис. 7. Распределение электрического поля вдоль волновода и удельная поглощаемая мощность в каждой трубке при разных значениях диэлектрической проницаемости материала трубок

Для проверки точности полученных результатов были выполнены вычисления одних и тех же параметров при разных значениях меширования (разбиения на элементарные ячейки для расчета) модели устройства пастеризации. На рис. 8 показано распределение удельной поглощаемой мощности в двух сечениях волновода при трех разных значениях меширования.

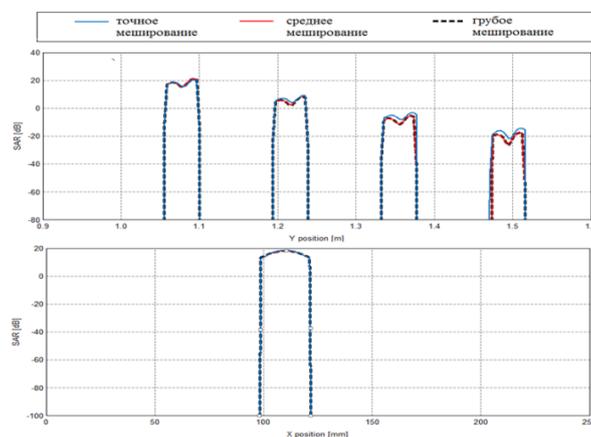


Рис. 8. Удельная поглощаемая мощность при разном мешировании

На рис. 9 изображено распределение напряженности электрического поля в тех же случаях.

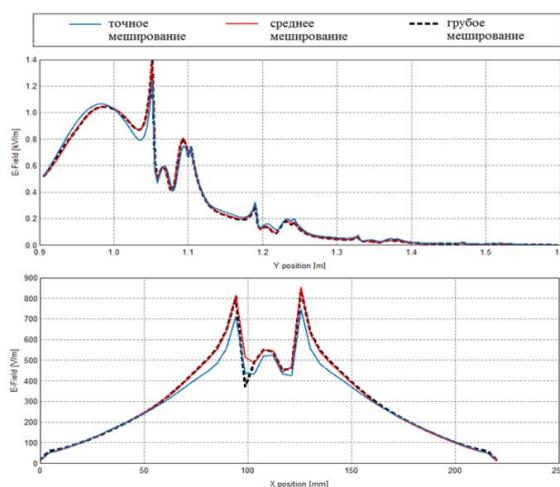


Рис. 9. Напряженность электрического поля при разном мешировании

Заключение. Данная работа посвящена проектированию устройства для пастеризации молока с помощью энергии электромагнитного поля СВЧ. С применением САПР ФЕКО построена 3D модель устройства и выполнено моделирование его работы. Проведено исследование влияние угла наклона кварцевых трубок на распределение электромагнитного поля в волноводе. Также рассмотрено влияние диаметра и материала трубок. Получены распределения электрического поля и удельной мощности, поглощенной на кг диэлектрика в волноводе. Выполнена оценка точности результатов.

Полученные результаты показывают, что большая часть мощности поглощается ближе к началу волновода, причем при увеличении угла наклона трубок это явление имеет более выраженный характер. Так при угле в 55° поглощение в четвертой трубке практически отсутствует, а в третьей – значительно ослабевает.

На основании проведенных расчетов является оптимальным угол наклона трубок равный 43° , поскольку он не слишком пологий, однако при этом в работе задействованы все четыре трубки. Тем не менее во всех случаях получить равномерное распределение поглощаемой мощности по трубкам не удастся, и уровень мощности в первой и последней трубках отличается примерно в 20 раз. Однако согласно описанию предлагаемой конструкции, жидкость протекает через эти трубки последовательно, а не параллельно, поэтому полученная неравномерность является приемлемой.

Возможными модификациями предлагаемой конструкции устройства пастеризации могут быть другие варианты расположения трубок с жидкостью, в частности, расположение их в шахматном порядке и расположение в виде двух параллельных рядов, что влечет за собой возможное изменение диаметра трубок. Также влияние на поглощаемую мощность может оказывать толщина стенок трубки. Кроме того, состав молока изменяет его электрофизические свойства, и соответственно также может повлиять на уровень поглощаемой мощности. Однако эти вопросы требуют дальнейшего исследования.

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. *Meredith R.* Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating, Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
2. *Kubo M.T.K., Curet S., Augusto P.E.D., Boillereaux L.* Multiphysics modeling of microwave processing for enzyme inactivation in fruit juices // *Journal of Food Engineering.* – 2019. – Vol. 263. – P. 366-379.
3. *Выков Y.V., Рыбаков K.I., Семенов V.E.* High-Temperature Microwave Processing of Materials // *Journal of Physics, D-Applied Physics.* – 2001. – Vol. 34 (13). – P. 55-75.
4. *Лапочкин M.C., Морозов O.G.* СВЧ устройства адаптивного типа для интенсификации процессов плавления снежно-ледяной массы // Сб. научных трудов II ВНТК молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «ВТСНТ-2013». – Томск, 2013. – Т. 2. – С. 234-238.
5. *Рыбков В.С., Коломейцев В.А., Евсейкин А.А.* Структура электрического поля в резонаторной камере СВЧ нагревательной установки при боковом четырехщелевом способе возбуждения // *Радиотехника и связь: Матер. Междунар. науч.-техн. конф.* – Саратов: СРГУ, 2008. – С. 147-153.
6. *Коломейцев В.А., Салахов Т.Р., Салимов И.И., Рыбков В.С.* Повышение равномерности нагрева полимерных материалов в прямоугольной резонаторной камере при термообработке в одномодовом режиме // *Электроника и вакуумная техника: Приборы и устройства. Технология. Материалы: Матер. науч.-техн. конф.* – Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 2007. – С. 191-197.
7. *Журавлев А.Н., Карнов Д.И., Салахов Т.Р.* Тепловые процессы в конвейерной СВЧ-установке поперечного типа на основе ПВТР // *Функциональные системы и устройства низких и сверхвысоких частот: Межвуз. науч. сб.* – Саратов: СГТУ, 2003. – С. 58-62.
8. *Карнов Д.И., Коломейцев В.А.* Патент на изобретение № 2329617 РФ. СВЧ-печь; Бюл. № 20. ФГУ ФИПС, 2008 г.
9. *Дрогайцева О.В., Карнов Д.И., Карнов И.А.* Исследование процесса выравнивания температуры нагрева материала в установках резонаторного типа // Сб. науч. тр. «Радиотехника и связь». – Саратов: СГТУ, 2009. – С. 409-415.

10. Дрогайцева О.В., Коломейцев В.А., Семенов А.Э. Оптимизация многоцелевой системы возбуждения электромагнитного поля в СВЧ нагревательных установках резонаторного типа // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 3. – С. 106-112.
11. Mamontov A.V., Nazarov I.V., Potapova T.A. Temperature Field Distribution in Sheet Materials in Microwave Heating Waveguide Devices // 2006 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, 12 February 2007, Saratov, Russia. – DOI: 10.1109/APEDE.2006.307416.
12. Nefedov V.N., Mamontov A.V., Chechetkin A.A. Heat treatment of sheet materials using slow-wave systems // 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22-23 Sept. 2016, Saratov, Russia. – DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879044.
13. Mamontov A.V., Nefedov V.N. Microwave method of even temperature distribution in the volumetric materials // 2013 23rd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", 8-14 Sept. 2013.
14. Nefedov V.N., Mamontov A.V., Saygin I.A. Heat treatment of a rod dielectric materials using microwave radiation // 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22-23 Sept. 2016. – DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879041.
15. Shatalov A.L. Performance in using electromagnetic field energy for heating insulating and semiconducting media // Chemical and Petroleum Engineering. – 2008. – Vol. 44, No. 11-12. – P. 704-708.
16. Шаталов А.Л. Физическая модель процесса нагрева жидких сред полем СВЧ // Сб. «Нетрадиционные и лазерные технологии»: Доклады Международной конференции ALT-92. – М., 1992. – С. 45-48.
17. Шаталов А.Л., Ардашев А.И., Чулков В.П. Основы расчета конвейерной СВЧ сушилки // Сб. «Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств». – М.: МИХМ, 1983. – С. 99-103.
18. Анфиногентов В.И. Численное моделирование сверхвысокочастотного электромагнитного нагрева несжимаемой вязкой жидкости, движущейся в цилиндрической трубе // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – Т. 11, № 2-3. – С. 3-9.
19. Анфиногентов В.И. Об оптимальном управлении СВЧ нагревом диэлектриков // Авиакосмические технологии и оборудование: Матер. Межд. науч.-практ. конф. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – С. 346-349.
20. Анфиногентов В.И., Галимов М.Р., Морозов Г.А., Морозов О.Г. Математическое моделирование микроволновой сепарации водонефтяной эмульсии // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ18: Сб. трудов XVIII Международ. науч. конф. В 10 т., Т. 3. – Казань: Изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. – С. 159-162.
21. Букреев В.Г., Еремин А.Д., Чекрыгина И.М. Патент на изобретение № 2101884 РФ от 10.01.1998. СВЧ-нагреватель жидкости.
22. Чекрыгина И.М., Еремин А.Д., Букреев В.Г., Ракитин А.Н. Патент на изобретение № 2171584 РФ от 10.08.2001. Способ пастеризации (стерилизации) жидких водосодержащих пищевых продуктов.

REFERENCES

1. Meredith R. Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating, Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
2. Kubo M.T.K., Curet S., Augusto P.E.D., Boillereaux L. Multiphysics modeling of microwave processing for enzyme inactivation in fruit juices, *Journal of Food Engineering*, 2019, Vol. 263, pp. 366-379.
3. Bykov Y.V., Rybakov K.I., Semenov V.E. High-Temperature Microwave Processing of Materials, *Journal of Physics, D-Applied Physics*, 2001, Vol. 34 (13), pp. 55-75.
4. Lapochkin M.S., Morozov O.G. SVCh ustroystva adaptivnogo tipa dlya intensivatsii protsessov plavleniya snezhno-ledyanoy massy [Microwave devices of adaptive type for intensification of melting processes of snow-ice mass], *Sb. nauchnykh trudov II VNTK molodykh uchennykh, aspirantov i studentov s mezhdunarodnym uchastiem «VTSNT-2013»* [Collection of scientific papers of the II vntc of young scientists, postgraduates and students with international participation "VTSNT-2013"]. Tomsk, 2013, Vol. 2, pp. 234-238.

5. Rybkov B.C., Kolomeytsev V.A., Evseykin A.A. Struktura elektricheskogo polya v rezonatornoi kamere SVCh nagrevatel'noy ustanovki pri bokovom chetyrekhshchelevom sposobe vzbuzhdeniya [Structure of the electric field in the resonator chamber of a microwave heating system with a lateral four-slit method of excitation], *Radiotekhnika i svyaz': Mater. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Radio engineering and communications: Proceedings of the International scientific and technical conference]. Saratov: SRGU, 2008, pp. 147-153.
6. Kolomeytsev V.A., Salakhov T.R., Salimov I.I., Rybkov B.C. Povyshenie ravnomernosti nagreva polimernykh materialov v pryamougol'noy rezonatornoy kamere pri termoobrabotke v odnomodovom rezhime [Increasing the uniformity of heating of polymer materials in a rectangular resonator chamber during heat treatment in single-mode mode], *Elektronika i vakuumnaya tekhnika: Pribory i ustroystva. Tekhnologiya. Materialy: Mater. nauch.-tekhn. konf.* [Electronics and vacuum technology: Devices and devices. Technology. Materials: Materials of the scientific and technical conference]. Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 2007, pp. 191-197.
7. Zhuravlev A.N., Karpov D.I., Salakhov T.R. Teplovyte protsessy v konveyernoy SVCh-ustanovke poperechnogo tipa na osnove PVTR [Thermal processes in a conveyor microwave installation of a transverse type based on PVTR], *Funktsional'nye sistemy i ustroystva nizkikh i sverkhvysokikh chastot: Mezhvuz. nauch. sb.* [Functional systems and devices of low and ultra-high frequencies: interuniversity scientific collection]. Saratov: SGTU, 2003, pp. 58-62.
8. Karpov D.I., Kolomeytsev V.A. Patent na izobretenie № 2329617 RF. SVCh-pech' [Patent for invention No. 2329617 of the Russian Federation. Microwave oven]; Bul. No. 20. FSU FIPS, 2008.
9. Drogaytseva O.V., Karpov D.I., Karpov I.A. Issledovanie protsessa vyravnivaniya temperatury nagreva materiala v ustanovkakh rezonatornogo tipa [Investigation of the process of equalizing the heating temperature of the material in resonator-type installations], *Sb. nauch. tr. «Radiotekhnika i svyaz'»* [Collection of scientific papers "radio engineering and communications"]. Saratov: SGTU, 2009, pp. 409-415.
10. Drogaytseva O.V., Kolomeytsev V.A., Semenov A.E. Optimizatsiya mnogoshchevovoy sistemy vzbuzhdeniya elektromagnitnogo polya v SVCh nagrevatel'nykh ustanovkakh rezonatornogo tipa [Optimization of the multi-slot system of electromagnetic field excitation in microwave heating installations of resonator type], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov state technical University], 2010, No. 3, pp. 106-112.
11. Mamontov A.V., Nazarov I.V., Potapova T.A. Temperature Field Distribution in Sheet Materials in Microwave Heating Waveguide Devices, *2006 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, 12 February 2007, Saratov, Russia*. DOI: 10.1109/APEDE.2006.307416.
12. Nefedov V.N., Mamontov A.V., Chechetkin A.A. Heat treatment of sheet materials using slow-wave systems, *2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22-23 Sept. 2016, Saratov, Russia*. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879044.
13. Mamontov A.V., Nefedov V.N. Microwave method of even temperature distribution in the volumetric materials, *2013 23rd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", 8-14 Sept. 2013*.
14. Nefedov V.N., Mamontov A.V., Saygin I.A. Heat treatment of a rod dielectric materials using microwave radiation, *2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22-23 Sept. 2016*. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879041.
15. Shatalov A.L. Performance in using electromagnetic field energy for heating insulating and semiconducting media, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2008, Vol. 44, No. 11-12, pp. 704-708.
16. Shatalov A.L. Fizicheskaya model' protsessa nagreva zhidkikh sred polem SVCh [The physical model of process of heating liquids microwave field], *Sb. "Netraditsionnye i lazernye tekhnologii": Doklady Mezhdunarodnoy konferentsii ALT-92* [Collection "Non-traditional and laser technology»: Reports of the ALT-92 International conference]. Moscow, 1992, pp. 45-48.
17. Shatalov A.L., Ardashev A.I. Chulkov V.P. Osnovy rascheta konveyernoy SVCh sushilki [Basics of calculating a conveyor microwave dryer], *Sb. "Raschet i konstruirovaniye mashin i apparatov khimicheskikh proizvodstv"* [Collection "Calculation and construction of machines and devices of chemical production"]. Moscow: MIKHM, 1983, pp. 99-103.

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 vodoneftyanoi 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