

Объемное моделирование СВЧ-нагревателя жидкости

Н.Н. Кисель¹, А.В. Ковалев²

¹Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета

²Инжиниринговый центр приборостроения, радио- и микроэлектроники Южного федерального университета

Аннотация: 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. Также рассмотрено влияние диаметра и материала трубок. Получены распределения электрического поля и удельной мощности, поглощенной на кг диэлектрика в волноводе. Выполнена оценка точности результатов.

Ключевые слова: пастеризация, СВЧ, термообработка диэлектриков.

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 проходят обработки различных диэлектрических материалов и при этом являются эффективными и экологически чистыми [1]. В работе [2] рассматривается возможность использования сверхвысокочастотных технологических комплексов (СВЧТК) для обработки твердых и жидких пищевых отходов, жидких сред, накопленных в хранилищах отходов.

В [3, 4] предложен способ повышения равномерности нагрева диэлектрических материалов и пищевых продуктов в СВЧ-резонаторных установках. Метод основан на распределении энергии микроволн по объему нагреваемого материала. Описана конструкция четырехзворной управляемой системы возбуждения электромагнитного поля, позволяющая реализовать предложенный метод. Работа [5] посвящена разработке СВЧ-устройств для равномерного нагрева диэлектрических материалов.

Рассмотрены волноводные и резонаторные устройства сложного сечения. Работы [6-8] посвящены разработке и исследованию СВЧ-устройств для термообработки диэлектрических материалов. Предложены волноводные устройства круглого и меандрового типов, позволяющие осуществлять равномерную обработку диэлектриков по его сечению в режиме бегущей волны. Работы [9, 10] посвящены математическому моделированию СВЧ-обработки диэлектриков, в том числе масляных.

Несмотря на множество разработок в области СВЧ-обработки материалов, создание универсального устройства, пригодного для термообработки любых материалов, затруднено из-за разнообразия их форм и размеров, а также существенного различия электрофизических свойств диэлектриков. Поэтому в каждом конкретном случае требуется создать оптимальную конструкцию устройства и выбрать вариант возбуждения электромагнитного поля.

Постановка задачи

В данной работе исследуется устройство для пастеризации жидкостей, конструкция которого предложена в [11]. Упрощенно конструкция устройства показана на рисунке 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 $\varepsilon = 80$. 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.

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

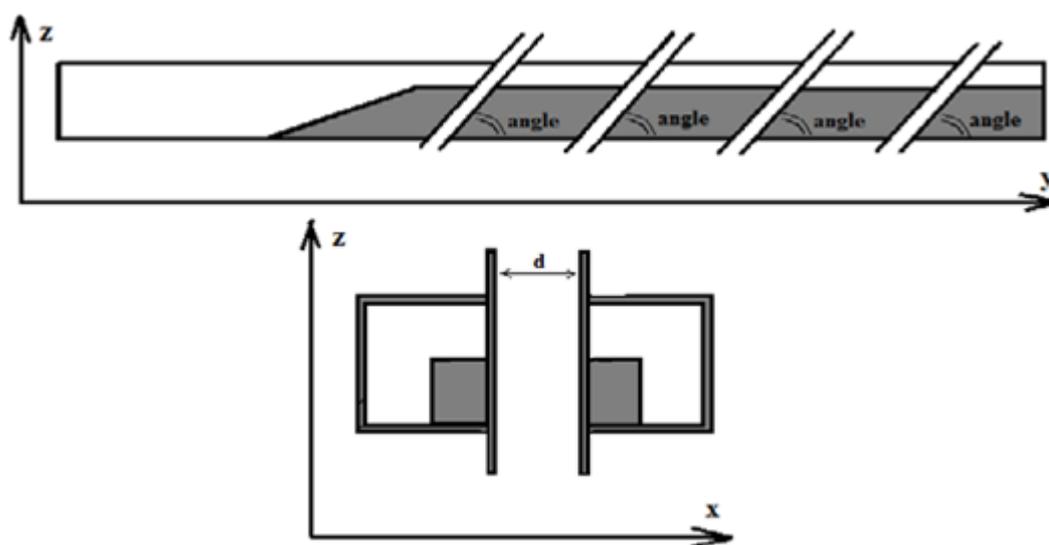


Рис. 1. – Конструкция устройства

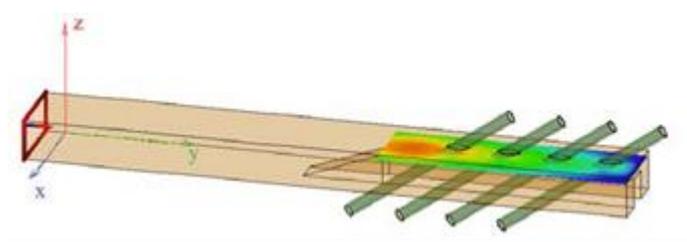


Рис. 2. – Модель устройства пастеризации в программе FEKO

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.

Выбор угла наклона

В данной работе проведено исследования влияние 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° ... 55° . Были рассчитаны распределения электрического поля (E) и удельной мощности (SAR), поглощенной на кг диэлектрика в волноводе.

На рисунке 3 показана рассчитанная величина удельной мощности, поглощаемой в объеме диэлектрика, при разных углах наклона трубок. Рисунок 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.

Рисунок 4 показывает распределение электрического поля (E) вдоль волновода и величину удельной поглощаемой мощности (SAR) в каждой трубке. Линии разного цвета соответствуют разным углам наклона.

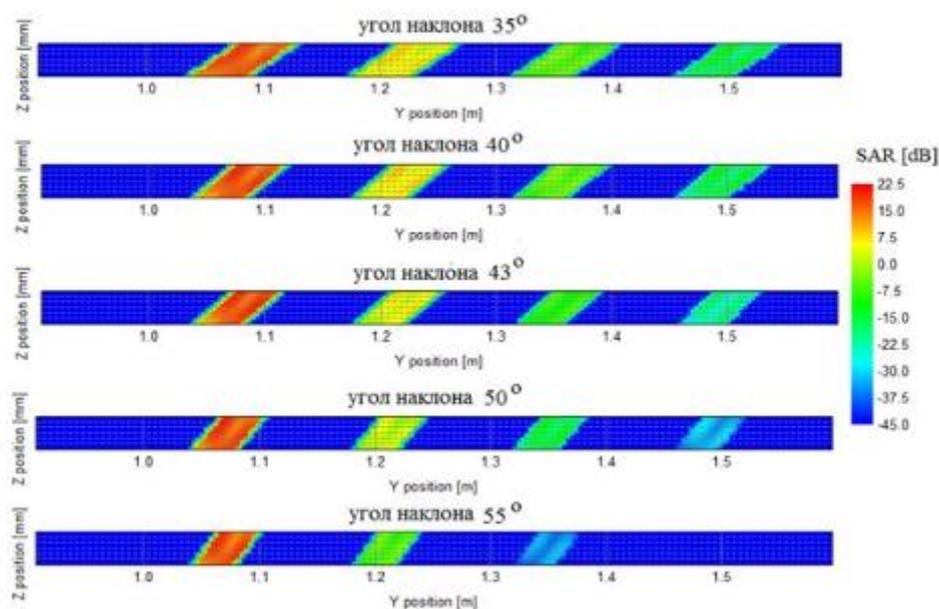


Рис. 3. – Рассчитанная величина удельной мощности, поглощаемой в объеме диэлектрика, при разных углах наклона трубок

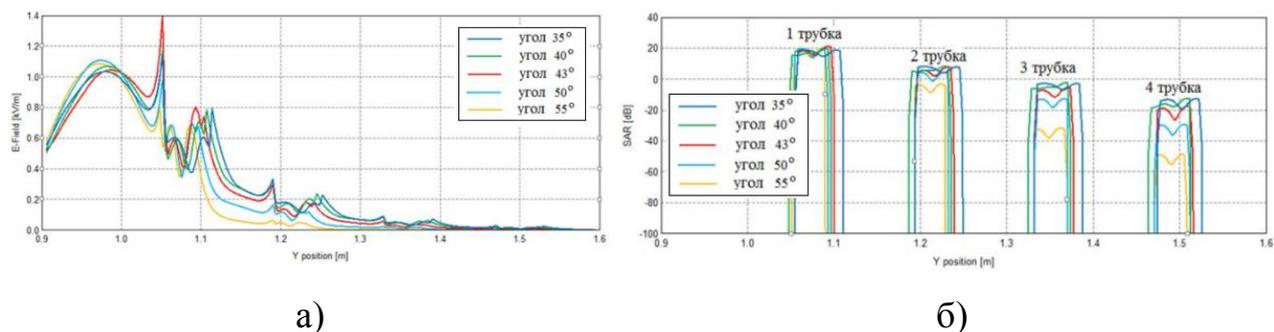


Рис. 4. – Распределение электрического поля вдоль волновода (а) и удельная поглощаемая мощность в каждой трубке (б) при разных углах наклона

Из рисунка 4 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.

На рисунке 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.

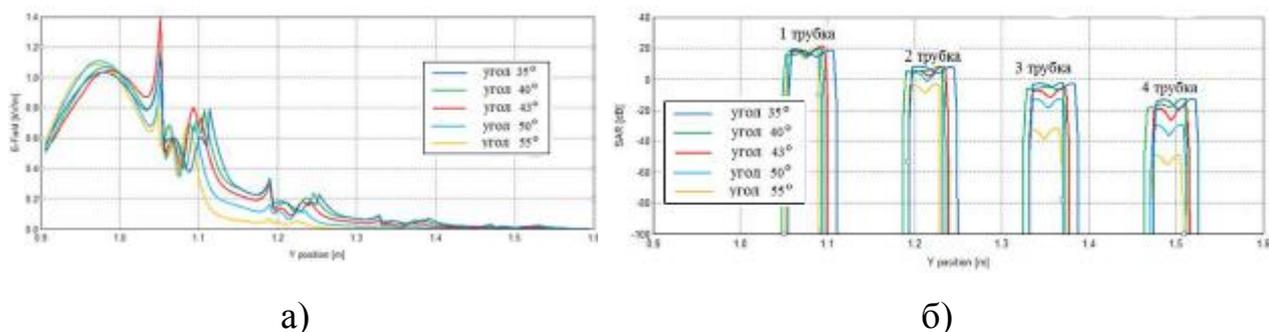


Рис. 5. – Удельная поглощаемая мощность в каждой трубке

На рисунке 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.

Влияние диаметра трубок

На рисунке 6 показано распределение электрического поля вдоль волновода и удельной поглощаемой мощности в каждой трубке при разной величине диаметра трубок.

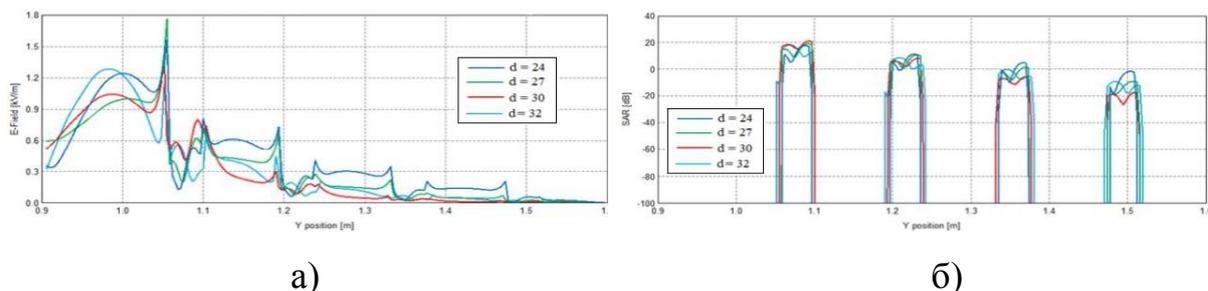


Рис. 6. – Распределение электрического поля вдоль волновода (а) и удельная поглощаемая мощность в каждой трубке (б) при разной величине диаметра трубок

Во всех случаях угол наклона равен 43° . Видно, что изменение диаметра на 10-15% не оказывает существенного влияния на распределение электрического поля.

Влияние материала 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 рисунке 7 показано распределение электрического поля вдоль волновода и удельной поглощаемой мощности в каждой трубке при разных значениях диэлектрической проницаемости материала трубок.

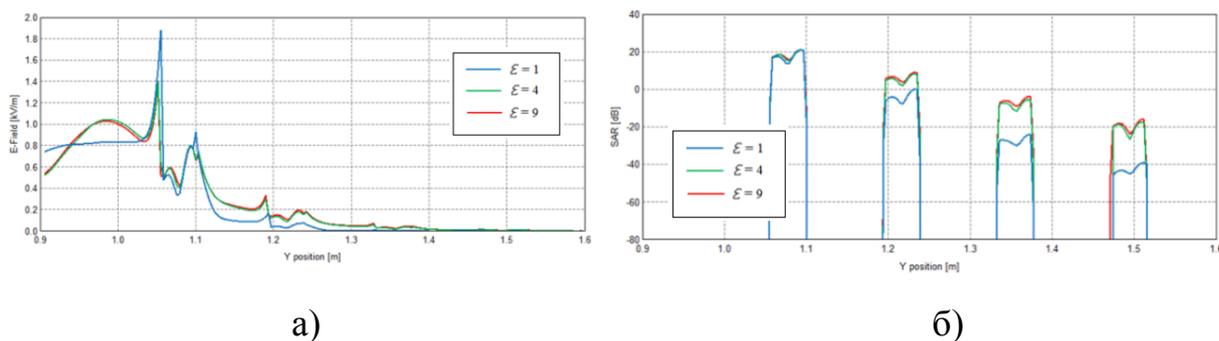


Рис. 7. – Распределение электрического поля вдоль волновода (а) и удельная поглощаемая мощность в каждой трубке (б) при разных значениях диэлектрической проницаемости материала трубок

При $\varepsilon = 1$, что фактически равнозначно отсутствию ограничивающего жидкость материала, поле убывает с расстоянием наиболее сильно. Также видно, что результаты для $\varepsilon = 4$ и $\varepsilon = 9$ практически одинаковы. Это позволяет использовать в устройстве стандартные кварцевые трубки.

Проверка точности вычислений

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 рисунке 8 показано распределение удельной поглощаемой мощности в двух сечениях волновода при трех разных значениях меширования. На рисунке 9 изображено распределение напряженности электрического поля в тех же случаях.

По приведенным графикам видно, что результаты, получаемые при разной величине меширования, отличаются незначительно, что свидетельствует о правильности расчета.

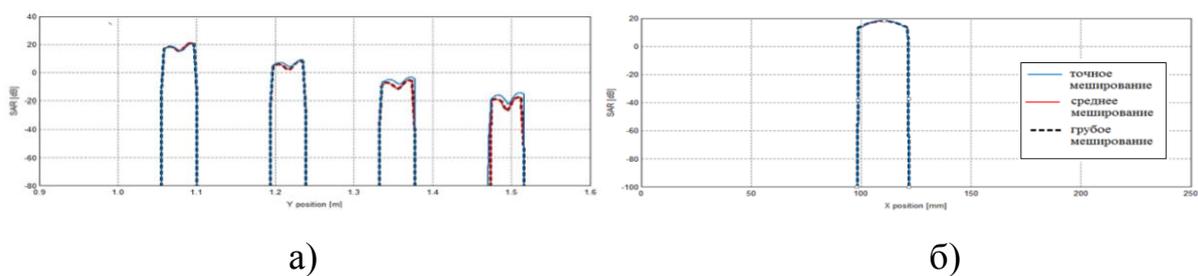


Рис. 8. – Удельная поглощаемая мощность при разных вариантах меширования

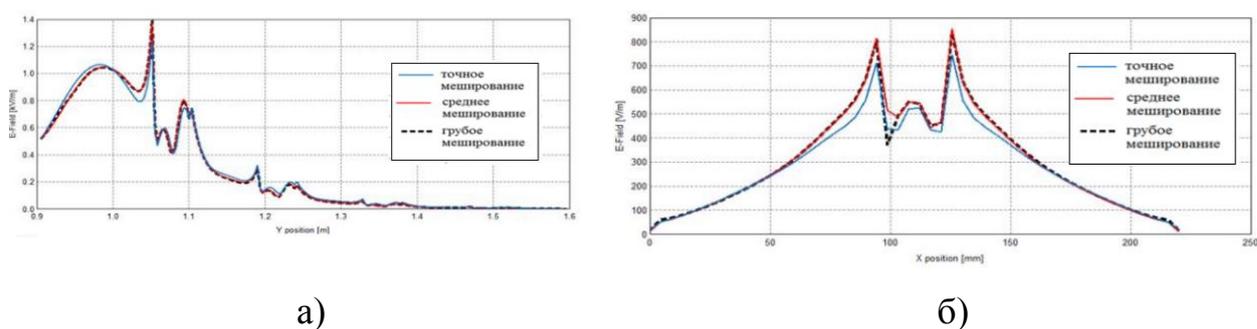


Рис. 9. – Напряженность электрического поля при разных вариантах меширования в плоскости yz (а) и xz (а)

Однако, затраты времени и вычислительных ресурсов компьютера при более точном и более грубом мешировании различаются в несколько раз, что делает использование более грубого меширования целесообразным.

Заключение

Данная работа посвящена проектированию устройства для пастеризации молока с помощью энергии электромагнитного поля СВЧ. 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. 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).

Литература

1. Шегельман И.Р., Васильев А.С., Суханов Ю.В. Анализ современных технологий использования вакуумного и микроволнового воздействия при обезвоживании пищевой продукции // Инженерный вестник Дона, 2018, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5168.

2. Смирнов С.В., Морозов Г.А., Морозов О.Г., Насыбуллин А.Р., Анфиногентов В.И., Фархутдинов Р.В. Исследование СВЧ технологических комплексов переработки твердых и жидких сред // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5311.

3. Салахов Т.Р., Журавлев А.С., Салахов Т.Р., Карпов Д.И. Тепловые процессы в конвейерной СВЧ установке поперечного типа на основе ПВТР // Функциональные устройства низких и сверхвысоких частот: межвуз. науч. сб. Саратов: О ТУ, 2003. С. 58–62.

4. Карпов Д.И., Коломейцев В.А. СВЧ-печь / Патент на изобретение РФ № RU 2329617 C1. Бюл. № 20. 2008. URL: patents.s3.yandex.net/RU2329617C1_20080720.pdf.

5. Дрогайцева О.В., Карпов Д.И., Карпов И.А. Исследование процесса выравнивания температуры нагрева материала в установках резонаторного типа // Сб. науч. тр. «Радиотехника и связь», Саратов: СГТУ, 2009, С. 409–415.

6. Nefedov V.N., Mamontov A.V., Chechetkin A.A. Heat treatment of sheet materials using slowwave systems // 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22-23 Sept. 2016, Saratov, Russia. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879044.

7. 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. Pp. 1008-1009.

8. 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.

9. Anfinogentov V.I., Mathematical modelling of dielectrics microwave heating // 12th International Conference Microwave and Telecommunication Technology, 9-13 Sept. 2002, Sevastopol, Ukraine, DOI: 10.1109/CRMICO.2002.1137361.

10. Morozov G., Anfinogentov V., Morozov O., Smirnov S., Ganieva S., Modeling and optimization of microwave heating in cylindrical volumes // 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), 24-27 May 2017, Kiev, Ukraine, DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972587.

11. Чекрыгина И.М., Еремин А.Д., Букреев В.Г., Ракитин А.Н. Способ пастеризации (стерилизации) жидких водосодержащих пищевых продуктов. Патент на изобретение РФ № 2171584 С2. 2001. URL: patents.s3.yandex.net/RU2171584C2_20010810.pdf.

References

1. Shegel'man I.R., Vasil'ev A.S., Sukhanov Yu.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5168.

2. Smirnov S.V., Morozov G.A., Morozov O.G., Nasybullin A.R., Anfinogentov V.I., Farkhutdinov R.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5311.

3. Salakhov T.R., Zhuravlev A.S., Salakhov T.R., Karpov D.I. Funktsional'nye ustroystva nizkikh i sverkhvysokikh chastot: mezhvuzovskiy nauchnyy sbornik «Teplovye protsessy v konveyernoy SVCh ustanovke poperechnogo tipa na osnove PVTR» [Functional devices of low and ultrahigh frequencies: interuniversity scientific collection «Thermal processes in a transverse conveyor microwave installation based on PVTR »]. Saratov, 2003. pp. 58–62.

4. Karpov D.I., Kolomejcev V.A. SVCh-pech'. Patent RF № RU 2329617 C1. [Microwave. Patent RF № RU 2329617 C1.]. B'ulleten'. № 20. 2008. URL: patents.s3.yandex.net/RU2329617C1_20080720.pdf.

5. Drogajceva O.V., Karpov D.I., Karpov I.A. Issledovanie processa vyravnivaniya temperatury nagreva materiala v ustanovkakh rezonatornogo tipa. Sbornik nauchnyh trudov «Radiotekhnika i svjaz'» [Investigation of the process of material heating temperature equalization in resonator-type devices. Collection of scientific papers "Radio engineering and communication"], Saratov: SGTU, 2009, pp. 409–415.

6. Nefedov V.N., Mamontov A.V., Chechetkin A.A. Heat treatment of sheet materials using slowwave systems. 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22-23 Sept. 2016, Saratov, Russia. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879044.

12. 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. P. 1008.

7. 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.

8. Anfinogentov V.I., Mathematical modelling of dielectrics microwave heating. 12th International Conference Microwave and Telecommunication Technology, 9-13 Sept. 2002, Sevastopol, Ukraine, DOI: 10.1109/CRMICO.2002.1137361.

9. Morozov G., Anfinogentov V., Morozov O., Smirnov S., Ganieva S., Modeling and optimization of microwave heating in cylindrical volumes. 2017 XI



International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), 24-27 May 2017, Kiev, Ukraine, DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972587.

10. Chekrygina I.M., Eremin A.D., Bukreev V.G., Rakitin A.N. Sposob pasterizacii (sterilizacii) zhidkih vodosoderzhashhih pishhevyh produktov. Patent na izobretenie RF № 2171584 C2. [Invention patent № 2171584 RF “Method for pasteurization (sterilization) of liquid water-containing food products”]. 2001. URL: patents.s3.yandex.net/RU2171584C2_20010810.pdf.