

УДК 664.13

ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

*А. Н. Васильев, А. Б. Оспанов, Д. А. Будников,
А. А. Васильев, Д. А. Карманов, Д. Б. Шалгинбаев*

Приведены результаты программного проектирования зоны СВЧ обработки и моделирования распределения напряженности электромагнитного поля в зоне СВЧ воздействия на зерновой материал. Предложена схема подвода мощности электромагнитного поля (ЭМП), на основе волновых характеристик распределения ЭМП, для разработки устройства для электрофизической сушки и обеззараживания зерна.

Введение

Процессы нагрева в СВЧ-параметрах описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из уравнений Максвелла и, при отсутствии массопереноса, уравнения теплопроводности:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial \tau}, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial \tau}, \quad \operatorname{div} \vec{D} = 0, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0, \\ \vec{D} &= \varepsilon(\Theta) \cdot \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu(\Theta) \cdot \vec{H}, \quad \vec{j} = \sigma(\Theta) \cdot \vec{E}. \\ \frac{\partial}{\partial \tau} (c(\Theta) \cdot \rho(\Theta) \cdot \Theta) + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla} \Theta) &= \operatorname{div} (\lambda(\Theta) \cdot \vec{\nabla} \Theta) + P(\Theta, \vec{E}). \end{aligned}$$

Для ведения расчета по данным уравнениям использовали программный продукт CST Microwave Studio, результаты которого основаны на методе конечного интегрирования (Finite Integration Technique, FIT). Получаемые матричные уравнения дискретизированных полей могут быть использованы для численного моделирования. Кроме того, алгебраические свойства этой теории дискретного электромагнитного поля позволяют аналитически и алгебраически использовать законы сохранения энергии и заряда для дискретной формулировки и дают стабильный алгоритм расчета численным методом во временной области [1].

Используя данные литературных источников [2–3] в программном комплексе CST Studio, была спроектирована зона СВЧ-обработки зернового материала (рисунок 1). От источника по волноводу 2 распространяется электромагнитная волна. На выходе волновода расположен фторопластовый экран, предотвращающий попадание обрабатываемого материала в волновод. По продуктопроводу 1 вертикально вниз движется зерно. В нашем случае продуктопровод полностью заполнен.

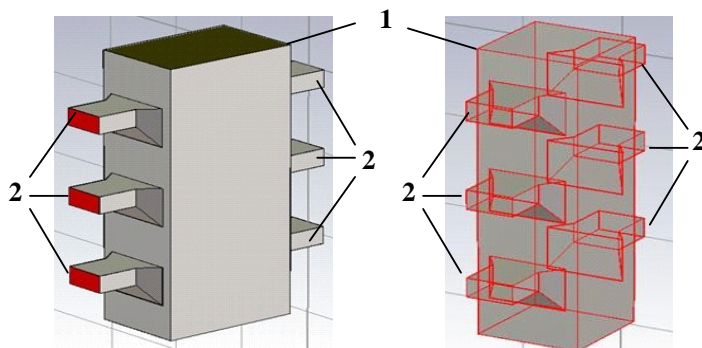
Цель работы – моделирование распределения напряженности электромагнитного поля в зоне СВЧ воздействия на зерновой материал.

Результаты исследований и их обсуждение

Пример результатов моделирования распределения напряженности электромагнитного поля в зоне СВЧ-воздействия приведен на рисунке 2. Следует отметить, что моделирование производилось при условии полного заполнения области электромагнитного воздействия обрабатываемым материалом. Видна крайняя неравномерность распределения поля по объему камеры, что необходимо учитывать при построении оборудования для микроволновой обработки материалов. Кроме графического отображения результатов моделирования были полученные численные характеристики напряженности поля, которые записывались в отдельный файл и были использованы в дальнейшей работе.

На рисунке 3 приведены зависимости, отображающие соответствие результатов расчет-

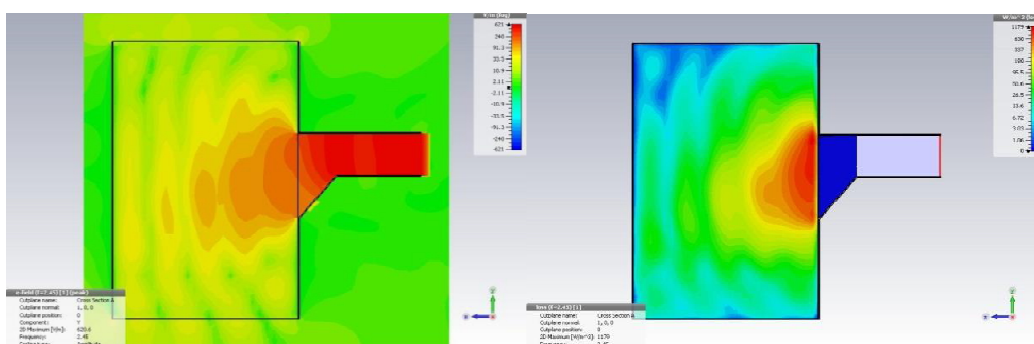
ных и экспериментальных данных по распространению электромагнитного поля. Кривая 1 характеризует экспоненциальный закон затухания электромагнитной волны в материале, получена из зависимости $E=E_0 \cdot e^{-kx}$, где E_0 – амплитуда поля на выходе волновода; k – коэффициент затухания, обусловленный диэлектрическими свойствами; x – координата.



1 – продуктопровод;

2 – источники микроволнового поля с волноводами

Рисунок 1 – Трехмерная модель зоны микроволнового воздействия

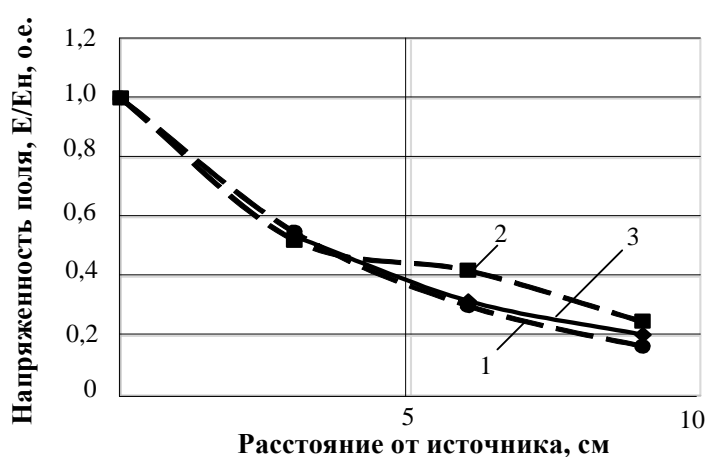


a)

b)

a – напряженность поля; b – мощность, поглощенная материалом

Рисунок 2 – Результаты моделирования для ячменя влажностью 17,6 %



1 – экспоненциальный закон распределения (расчетный);

2 – расчетные значения по модели, разработанной в CST Studio;

3 – по экспериментальным данным.

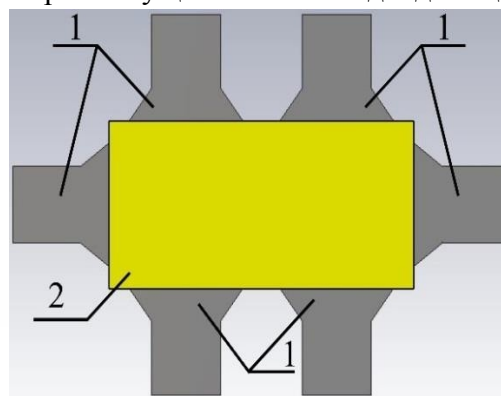
Рисунок 3 – Распределение напряженности поля в направлении от источника

Кривая 2 показывает числовые значения, полученные в программном комплексе CST Studio, для зоны, содержащей 1 магнетрон. Вид кривой 2 обусловлен волновым характером распределения поля. Кривая 3 отображает данные, полученные при экспериментальном измерении. Все кривые приведены в относительных единицах для того, чтобы исключить влияние КПД источника и отобразить соответствие характера полученных экспериментальных и теоретических зависимостей.

В некоторых случаях отклонения данных, полученных с помощью модели, разработанной в CST Studio, и экспериментальных данных отличаются на 30 %, что обусловлено, как уже говорилось, волновым распределением поля. При этом отклонения экспериментальных данных и данных, описываемых экспоненциальной зависимостью, на расстоянии равном глубине проникновения поля в зерновой слой, находятся в пределах 10 %. Отклонения данных, полученных при моделировании и экспериментальным способом относительно экспоненциального закона, обусловлены различными причинами, такими как учет волнового характера распространения поля, тепловыми потерями в окружающую среду при экспериментальном измерении, а также точностью воспринимающей части датчика.

В качестве источников ЭМП (электромагнитного поля) в установках для обработки зерна могут быть использованы магнетроны различной мощности и частоты поля. По выбираемой мощности можно рассматривать несколько вариантов установки. При применении источников большой мощности (несколько десятков киловатт) подвод может быть осуществлен навстречу движению потока материала [4]. При такой конструкции зона СВЧ-воздействия представляет собой цилиндрическую камеру, соосно которой проходит продуктопровод. Таким образом, материал по мере прохождения от загрузочной зоны к источнику и выгрузке подвергается нарастающему воздействию ЭМП. Такая реализация позволяет обеспечить требуемую равномерность нагрева зерна, однако, в случае высокой начальной влажности, скорость нагрева слишком велика, что приводит к повреждению оболочки и микронизации зерна.

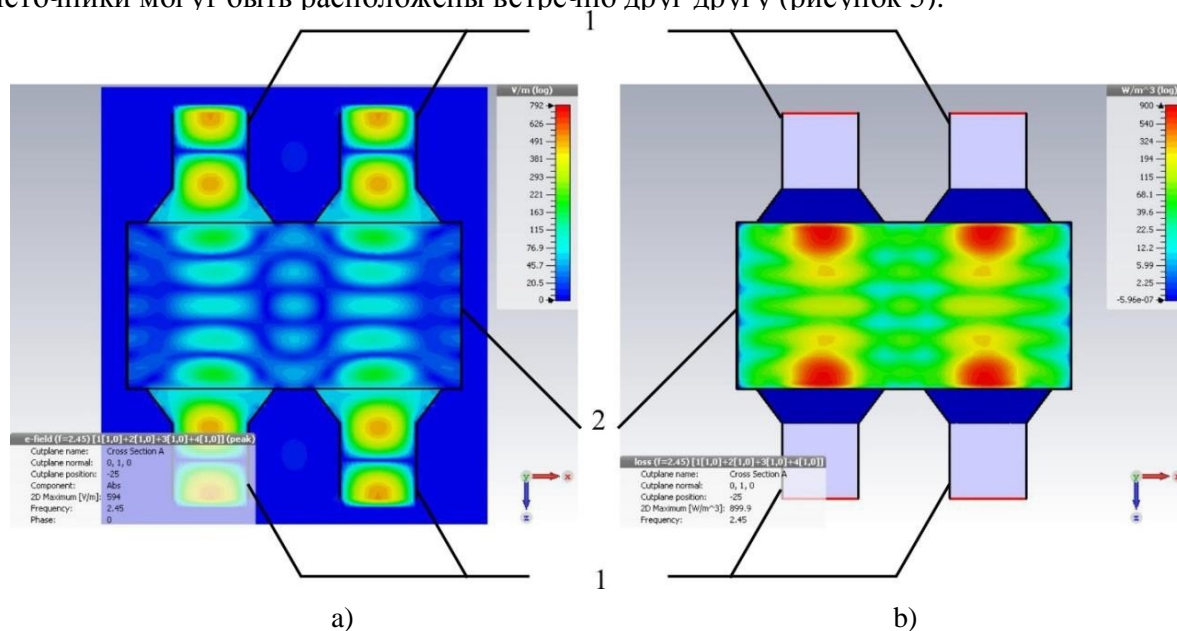
Другим вариантом применяемых источников могут выступать магнетроны мощностью $0,5 \div 3$ кВт с частотой поля 915 МГц либо 2,45 ГГц [1–4]. Такие источники более доступны по цене, менее требовательны с точки зрения эксплуатации. Зачастую не требуют водяного охлаждения. В данном случае подвод СВЧ-энергии к продуктопроводу может осуществляться либо над конвейерной линией, по которой движется зерно, либо, в случае вертикального движения материала в плотном слое, через волноводы, встроенные в боковые стенки [3]. Так, на рисунке 4 представлен вид сверху зон СВЧ-воздействия с изображением волноводов, по которым осуществляется подвод мощности ЭМП.



1 – источники микроволнового поля; 2 – продуктопровод.

Рисунок 4 – Зона микроволновой обработки (вид сверху)

Ограничивающим фактором при таком варианте реализации выступает глубина проникновения электромагнитной волны в материал. При этом глубиной проникновения считается толщина слоя, на которой поле ослабевает в e раз. Для обеспечения равномерности поля источники могут быть расположены встречно друг другу (рисунок 5).



а – напряженность поля; б – удельная мощность

1 – источники микроволнового поля с волноводами,
2 – зона СВЧ обработки (продуктопровод)

Рисунок 5 – Распределение энергии электромагнитной волны в слое диэлектрика с высоким коэффициентом диэлектрических потерь

Заключение

Таким образом, для разработки оборудования электрофизической сушки и обеззараживания зерновых продуктов необходимо ориентироваться на равномерность нагрева обрабатываемого материала, что можно обеспечить за счет равномерности распределения электромагнитного поля, которое, в свою очередь, можно обеспечить формой волновода, формой камеры СВЧ-обработки и схемой расположения источников.

Литература

- 1 Goronovskij, I.T. Kratkij spravocnik po himii [Short Guide to Chemistry– Kiev.: Naukova dumka, 1987. – 837 p.
- 2 Vankatesh, M.S. An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials. Biosystems Engineering (2004) 88(1), 1–18 doi: 10.1016/j.biosystemseng.2004.01.007.
- 3 Baptista, F. Energy Efficiency in Agriculture // F. Baptista, L.L. Silva, C. de Visser/ 5th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management. Lisbon, Portugal 2013.
- 4 Yunyang, Wang Review of dielectric drying of foods and agricultural products / Yunyang Wang, Yuanrui Li, Shaojin Wang, Li Zhang, Mengxiang Gao, Juming Tang. Int J Agric & Biol Eng. – Access: <http://www.ijabe.org> Vol. 4 No.1.

Поступила в редакцию 15.05.2017