

Литература

1. Аутко, А.А. В мире тепличного производства : 2-е издание / А.А. Аутко, Д.Л. Вольфсон. – Минск : Колорград, 2017. – 449 с.
2. Теплицы 5-го поколения Active Climate [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nivagreenhouse.ru/%D1%80%D1%83%D1%81%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9/%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%B8%D1%86%D1%8B-5-%D0%B3%D0%BE-%D0%BF%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F-active-climate/>. – Дата доступа: 20.01.2024.

УДК 004.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СВЧ-КАМЕРАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ СУШКИ МАТЕРИАЛОВ

Матвеев¹ В.В., к.ф.-м.н., доцент, **Матвеев² И.П.**, к.т.н., доцент

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,

²Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск

Энергия электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ) позволяет ускорить процессы сушки различных материалов. Это связано с тем, что СВЧ-энергию можно подвести непосредственно внутрь высушиваемого материала. Градиент давления пара, который создается внутри материала, резко ускоряет процесс сушки за счет выдавливания влаги из внутренних областей материала на его поверхность к границе, где наиболее эффективны конвективные процессы сушки.

Использование СВЧ-поля позволяет, по сравнению с классическими вариантами, увеличить производительность сушки (зерна, древесины и т.д.), получить более равномерную просушку по всей толщине слоя, а также уменьшить энергозатраты.

Основные полезные особенности СВЧ-нагрева – высокая степень поглощения энергии влажных материалов и соответственно скорость роста температуры, бесконтактный избирательный нагрев неоднородных материалов (по мере высушивания определенных участков нагрев в них автоматически уменьшается), большой КПД, отсутствие инерции в подводе мощности и простота автоматизации процесса. Эти преимущества предопределяют необходимость создания промышленных установок для СВЧ-обработки и сушки материалов.

При этом важно не только выявить оптимальную конструкцию СВЧ-камеры, но и оптимальные параметры электромагнитного поля.

Расчеты проводились путем математического моделирования с использованием пакета PDE Modeler.

Было исследовано три варианта конструкций СВЧ-камер:

- вариант 1: рупор, излучающий в свободное пространство;
- вариант 2: рупор нагружен на поглощающий диэлектрик;
- вариант 3: резонансная камера с диэлектрической поглощающей вставкой.

Уравнения для расчетной области представлены уравнением Максвелла в виде [1]:

$$\nabla \times \vec{H} = J + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$

Учитывая соотношения $\vec{D} = \epsilon_a \vec{E}$, $\vec{B} = \mu_a \vec{H}$ и $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ получим:

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon_a \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}; \nabla \times \vec{E} = -\mu_a \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}.$$

Моделирование показало, что в первом варианте из-за возбуждения высших мод интенсивность ВЧ-поля на краях вдвое превосходит интенсивность в средней области.

Во втором варианте обеспечение равномерного прогрева возможно в конвейерном варианте конструкции технологической установки.

В третьем варианте СВЧ волна не проникает через диэлектрик, начинает отражаться от диэлектрического материала, эффективность поглощения снижается. Это указывает на то, что слишком влажный материал неэффективно сушить энергией СВЧ.

Поскольку каждый вариант конструкции имеет свои особенности, необходимо получить оптимальные параметры электромагнитного поля для создания равномерной интенсивности в камере определенной конструкции.

Проблема в том, что сложная форма камер и расположение материала, который подвергается сушке в них, не позволяет найти точное распределение СВЧ-полей внутри нагреваемого материала с заданной интенсивностью.

Для решения этой задачи воспользуемся эллиптическим уравнением в частных производных для магнитного потенциала Герца Π_z^m .

При этом необходимо учитывать сложные граничные условия по всему контуру конструкции. Для этого сначала надо установить связь между электромагнитными волнами и потенциалом Герца:

$$\vec{H} = -\varepsilon_a \mu_a \frac{\partial^2 \vec{\Pi}^m}{\partial t^2} + \text{grad div } \vec{\Pi}^m.$$

Граничные условия для магнитного потенциала Герца находим из граничных условий для нормальной составляющей волны на идеально проводящей поверхности:

$$H_{q_1|Q_1} = 0, H_{q_2|Q_2} = 0, H_{z|Q_3} = 0.$$

Для составляющей H_z имеем $H_{z|Q_3} = \left(k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \vec{\Pi}^m = 0$ или $\Pi_{z|Q_3}^m = 0$. (1)

Для составляющих H_{q_1} H_{q_2} соответствует $\frac{\partial \Pi_z^m}{\partial \vec{n}} \Big|_{S_{бок}} = 0$. (2)

Получаем граничные условия для боковой поверхности, соответствующей граничным условиям Неймана.

Граничные условия (1), (2) вместе с уравнениями $\Delta \vec{\Pi}^m - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{\Pi}^m}{\partial t^2} = -\frac{\vec{J}_{cm}}{\mu_0}$,

формулируют краевую задачу для определения электромагнитного поля в волноводах и резонаторах.

Используя указанное выше и перейдя к комплексному виду, получим решение эллиптического уравнения с частными производными $\Delta \vec{\Pi}^m - \omega^2 \vec{\Pi}^m = 0$, на заданной частоте для волны H_{10} с граничными условиями $\Pi_{z|Q_3}^m = 0$ на входе и выходе сигнала и

граничными условиями для боковых стенок $\frac{\partial \Pi_z^m}{\partial \vec{n}} \Big|_{S_{бок}} = 0$.

В результате исследования различных форм конструкций камер получено равномерное распределение электромагнитного поля по интенсивности в камере, что повышает качество сушки материалов.

Литература

1. Кураев, А.А. Электродинамика и распространение радиоволн / А.А.Кураев, Т.Л. Попкова, А.К. Сеницын. – Минск: Инфра-М, 2012. – 424с.
2. Кураев, А.А. Мощные электронные приборы СВЧ и КВЧ со специальными видами взаимодействия / А.А.Кураев, В.В.Матвеев. – Минск: Бестпринт, 2022. – 216с.