

4. Романенков В.А., Павлова В.Н., Беличенко М.В. Оценка климатических рисков при возделывании зерновых культур на основе региональных данных и результатов длительных опытов Геосети // *Агрехимия*. – 2018. – №1. – С. 77–86. – DOI:10.7868/S0002188118010088.

5. Li P., Zwang D.D., Wang X.J., Cui Z.J. Surviva land performance of two cellulose-degrading microbial systems inoculated into wheat straw-amended soil // *Microbiol. Biotechnol.* – 2012 – Vol. 22, P. 126–132.

#### УДК 004.4

**В.В. Матвеев**, канд. физ.-мат. наук, доцент,  
*Учреждение образования «Белорусский государственный институт информатики и радиоэлектроники», г. Минск,*  
**И.П. Матвеев**, канд. техн. наук, доцент,  
*Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск*

### СИНТЕЗ СВЧ-КАМЕР ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ СУШКИ И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

**Ключевые слова:** СВЧ-камера, электродинамические процессы, электромагнитное поле, математическая модель, компьютерное моделирование, синтез.

**Key words:** microwave chamber, electrodynamic processes, electromagnetic field, mathematical model, computer modeling, synthesis.

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы исследования различных конструкций камер для синтезирования требуемой конструкции СВЧ-камеры энергетических установок, обеспечивающей заданный температурный режим.

**Abstract.** The article discusses the issues of studying various chamber designs for synthesizing the design of a microwave chamber for power plants, providing temperature conditions.

Благодаря возможности подвести СВЧ-энергию непосредственно внутрь высушиваемого материала удастся полезно использовать открытую закономерность процесса сушки – «диффузионное движение влаги происходит навстречу направлению градиента температуры в высушиваемом материале». При больших температурах создаваемый градиент давления пара внутри материала резко интенсифицирует процесс сушки за

счет включения механизма фильтрации влаги и пара через поры из внутренних областей материала на его поверхность к границе, где традиционные конвективные процессы сушки более эффективны.

Быстрый разогрев в СВЧ-поле также полезно используется для дезинсекции почвы, стерилизации порошковых пищевых и сырьевых фармацевтических материалов, размягчения остатков мазута в цистернах. 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.

Наибольший интерес для промышленного использования представляют СВЧ-камеры с размером рупора  $L$ , значительно превосходящим рабочую длину волны  $\lambda$ , в которых реализуется многомодовый режим возбуждения СВЧ-электромагнитных полей. Проблема конструирования таких установок состоит в том, что сложная форма многомодовых камер и расположение обрабатываемого материала в них не позволяет найти точное распределение ВЧ-полей внутри нагреваемого материала.

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:

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

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_a \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

На проводящих стенках заданы условия идеального проводника:

$$\vec{n} \times \dot{\vec{E}} = 0$$

Для исследования прохождения волны в раскрыве рупора, излучающего в свободное пространство, ставилось условие малого отражения в виде:

$$\mu^{1/2} \vec{n} \times \dot{\vec{H}} + \varepsilon_a^{1/2} \vec{n} \times (\dot{\vec{E}} \times \vec{n}) = 0 \quad (1)$$

Для моделирования влияния диэлектрика, помещенного в раскрыв рупора, использовано условие импедансной нагрузки:

$$\mu^{1/2} \vec{n} \times \dot{\vec{H}} + (\varepsilon'_a - \varepsilon''_a)^{1/2} \vec{n} \times (\dot{\vec{E}} \times \vec{n}) = 0 \quad (2)$$

Расчеты проводились путем математического моделирования с использованием пакета PDE Modeler.

В первом варианте было поставлено условие малого отражения (1), что соответствует ненагруженному рупору (диэлектрическое наполнение отсутствует). Анализ показал, что из-за возбуждения высших мод интенсивность ВЧ-поля на краях вдвое превосходит интенсивность в средней области.

Во втором варианте диэлектрик заполняет всю область рупора. В этом случае можно воспользоваться на границе приближенным условием импедансной нагрузки (2). Тогда из-за имеющегося отражения от границы диэлектрика возбуждаемые высшие моды перераспределяются. Ясно, что обеспечение равномерного прогрева возможно в конвейерном варианте конструкции технологической установки.

В третьем варианте вся мощность (1 кВт) поглощается в материале. 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.

Таким образом, выполненное моделирование показало, что для получения равномерной интенсивности сушки в камере определенной конструкции, необходимо провести оптимизацию параметров электромагнитного поля [1, 2]. В работе были исследованы различные конструкции камер, синтезирована конструкция СВЧ-камеры, представляющая собой пирамидальную камеру с диэлектрической нагрузкой, обеспечивающая требуемый температурный режим.

### Список использованной литературы

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.Матвеевко. – Минск: Бестпринт, 2022. – 216с.