Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С \_ \_ - \_ \_.

Energy and resource saving XXI century. 2023. P. \_ \_ - \_ \_.

Энергосберегающие электротехнологические процессы и установки в машиностроении и металлургии

Научная статья

УДК 674.047.3-047.58

**Численный анализ математической модели кинетики процесса вакуумно-высокочастотной сушки**

**Дмитрий Андреевич Коренков**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

[dimas.corenkov@yandex.ru](mailto:dimas.corenkov@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0221-1963>

***Аннотация.*** В статье рассмотрен один из вариантов анализа математической модели, описывающей кинетику процесса вакуумно-высокочастотной сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов на примере древесины. Для анализа модели использованы численные методы в программной среде Mathcad.

***Ключевые слова:***вакуумно-высокочастотная сушка, кинетика сушки, численное моделирование.

***Для цитирования:*** Коренков Д.А. Численный анализ математической модели кинетики процесса вакуумно-высокочастотной сушки // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. \_ \_ - \_ \_.

Energy-saving electrical processes and installations in mechanical engineering and metallurgy.

Original article

**Numerical analysis of mathematical model of vacuum-high-frequency drying process kinetics**

**Dmitry AndreevichKorenkov**

Oryol state university of I.S. Turgenev, Oryol, Russia

[dimas.corenkov@yandex.ru](mailto:dimas.corenkov@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0221-1963>

***Abstract.***The article considers one of the options for analyzing a mathematical model describing the kinetics of the vacuum-high-frequency drying process of capillary-porous colloidal materials using wood as an example. You use numerical methods in Mathcad to analyze your model.

***Keywords:*** vacuum high-frequency drying, drying kinetics, numerical modeling.

***For citation:*** Korenkov D.A. Analysis of possible configurations of working chambers during high frequency drying of wooden support blanks // Energy and resource saving XXI century. 2023. P. \_ \_ - \_ \_.

В настоящее время вопросы эффективного контроля и управления различными электротехнологическими процессами не теряют своей актуальности, поскольку их решение позволяет достигнуть роста качества выпускаемой продукции при одновременном сокращении издержек производства. К таким процессам, требующим совершенствования методов автоматического регулирования, можно отнести ваккумно-высокочастотную сушку различных капиллярно-пористых коллоидных материалов, в том числе и древесины [1].

Для решения задачи разработки эффективных методов управления процессом удаления влаги из материалов необходимы математические модели, адекватно описывающие явления тепломассопереноса и тепломассобмена. Предыдущие исследования позволили получить математическое описание динамики изменения полей температуры и влагосодержания с учетом изменения параметров внешней среды [2, 3]. Однако для построения системы управления более удобным является применение модели в кинетической постановке в виде

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

© Коренков Д.А., 2023

системы уравнений относительно средних значений температуры *Tср* и влагосодержания материала *uср* с учетом удельной мощности внутренних источников теплоты *Qv*:

 (1)

 ; (2)

, (3)

где – плотность материала в сухом состоянии; – удельная теплота парообразования, – критерий фазового превращения,  - теплоемкость материала, *f* – рабочая частота ВЧ генератора, ε и tgδ – диэлектрические свойства материала. Более подробное описание приведенной математической модели, а также допущения, сделанные при её составлении, приведены в работе [4].

Совместное решение системы уравнений (1) - (3) ввиду нелинейности зависимостей теплофизических и диэлектрических свойств от температуры и влагосодержания для большинства материалов возможно численными методами. В простейшем случае аппроксимация производных в (1) и (2) конечно-разностными аналогами позволит вычислить значения сеточных функций температуры и влагосодержания в узлах сетки. При этом сначала необходимо вычислить температуру на текущем шаге по времени, а затем использовать это значение для коррекции свойств материала при определении значения влагосодержания на том же шаге:

, (4)

, (5)

где Δ*t –* шаг по времени.

С учетом промежуточной коррекции свойств материала алгоритм расчета будет иметь вид, представленный на рисунке 1.

Алгоритм был реализован в математической среде Mathcad. Расчеты проводились для древесины хвойной породы с начальным влагосодержанием 0,58 кг/кг при начальной температуре 20 °С. Параметры источника: частота  *f* = 27 МГц, напряжение рабочего конденсатора 130 В при межэлектродном расстоянии 5 см. Время сушки задавалось равным 4 ч. Результаты численного анализа модели (1) - (3) показаны на рисунке 2.

Полученные результаты в целом соответствуют усредненным значениям полей температуры и влагосодержания, вычисленным для соответствующих моментов времени с помощью более совершенных моделей, учитывающих пространственные волновые эффекты, а также результатам экспериментальных исследований [5]. Следовательно, система уравнений (1)-(3) может быть использована для дальнейших исследований, направленных на поиск эффективных алгоритмов управления процессами высокочастотной и вакуумно-высокочастотной сушки различных материалов и построение соответствующих оптимальных регуляторов.

Начало

Ввод , свойств материала

и параметров источника и *tmax*

Построение сетки конечных

разностей 

*i* =1, 2... 

Расчет

Расчет 

Расчет 

Коррекция свойств материала , ;

определение

Вывод , 

Конец

Коррекция свойств материала , ;

определение

***Рисунок 1 – Алгоритм численного анализа математической модели (1)-(3)***

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| ***Рисунок 2 – Результаты численного анализа математической модели (1)-(3)*** | |

**Список источников**

1. Качанов А.Н., Королева Т.Г., Щербаков А.В. Проблемы энергосбережения при вакуумно-диэлектрическом способе сушки древесины на деревообрабатывающих предприятиях // Энергоэффективность и энергобезопасность на промышленных предприятиях промышленности и жилищно-коммунального хозяйства: Труды всероссийского научно-практического семинара 24-25 марта 2010 г., г. Салават. Уфа: АНРБ, Гилем. 2010. С. 133-137.

2. Kachanov A.N., Korenkov D.A., Revkov A.A., Vorkunov O.V., Maksimov V.V. High-frequency drying processes simulation of wooden tangent towers in a vacuum chamber. International Conference on Efficient Production and Processing ICEPP 2021: Proceedings of ICEPP, 2021. pp. 11-20. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86047-9\_2.

3. Качанов А.Н., Коренков Д.А. Математическая модель для исследования процессов вакуумно-высокочастотной сушки древесины // Промышленная энергетика. 2020. № 9. С. 33-38.

4. Коренков Д.А., Ревякин В.О. Подход к моделированию кинетики вакуумно-высокочастотной сушки // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 12-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. С. 470-473.

5. Liu H.H., Yang L., Cai Y., Hayashi K., Li K. Distribution and variation of pressure and temperature in wood cross section during radio-frequency vacuum (RF/V) drying // BioResources. 2014. Vol. 9. № 2. P. 3064-3076.

**Коренков Дмитрий Андреевич**, к.т.н., доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»; 302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95; e-mail: dimas.corenkov@yandex.ru.

**References**

1. Kachanov A.N., Koroleva T.G., Shcherbakov A.V. Problems of energy saving in the vacuum-dielectric method of drying wood at woodworking enterprises // Energy efficiency and energy security at industrial enterprises of industry and housing and communal services: Proceedings of the All-Russian scientific and practical seminar March 24-25, 2010, Salavat. Ufa: ANRB, Gilem. 2010. P. 133-137.

2. Kachanov A.N., Korenkov D.A., Revkov A.A., Vorkunov O.V., Maksimov V.V. High-frequency drying processes simulation of wooden tangent towers in a vacuum chamber. International Conference on Efficient Production and Processing ICEPP 2021: Proceedings of ICEPP, 2021. pp. 11-20. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86047-9\_2.

3. Kachanov A.N., Korenkov D.A. Mathematical model for the study of vacuum-high-frequency wood drying processes/Industrial energy. 2020. № 9. P. 33-38.

4. Korenkov D.A., Revyakin V.O. Approach to modeling the kinetics of vacuum-high-frequency drying//Information technologies in electrical engineering and the electric power industry: materials of the 12th All-Union. scientific-technical conf. - Cheboksary: Publishing House Chuvash. un-ta, 2020. P. 470-473.

5. Liu H.H., Yang L., Cai Y., Hayashi K., Li K. Distribution and variation of pressure and temperature in wood cross section during radio-frequency vacuum (RF/V) drying // BioResources. 2014. Vol. 9. № 2. P. 3064-3076.

**Информация об авторах**

Д.А. Коренков **–** канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения.

**Information about the authors**

D. A. Korenkov – сandidate of sciences in technology, docent of Electric equipment and energy saving department.

Статья поступила в редакцию \_\_\_.\_\_\_.2023; одобрена после рецензирования \_\_\_.\_\_\_.2023; принята к публикации \_\_\_.\_\_\_.2023.

The article was submitted \_\_\_.\_\_\_.2023; approved after reviewing \_\_\_.\_\_\_.2023; accepted for publication \_\_\_.\_\_\_.2023.