



МЛНЧ-2015

Международные Лыковские научные чтения



ВЕБ-КОНФЕРЕНЦИЯ

**Первые Международные Лыковские научные чтения,
посвящённые 105-летию академика А.В. Лыкова**

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СУШКИ
И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ**

22 - 23 СЕНТЯБРЯ 2015 ГОДА

*Веб-конференция «Первые Международные Лыковские научные чтения,
посвящённые 105-летию академика А.В. Лыкова – МЛНЧ-2015» прово-
дится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных
исследований - проект № 15-08-20703-г*

Москва 2015

УДК 687
ББК 37.23
А43

Председатель Оргкомитета
Председатель Комитета РосСНИО
по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов,
д.т.н., профессор Рудобащта Станислав Павлович

Заместители Председателя Оргкомитета
член-корр. НАН Р. Беларусь, д.т.н., профессор
Павлюкевич Николай Владимирович,
академик РААСН, д.т.н., профессор
Федосов Сергей Викторович

Учёный секретарь Оргкомитета
учёный секретарь Комитета РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обра-
ботки материалов, к.т.н., профессор Кошелева Мария Константиновна

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТ-
КИ МАТЕРИАЛОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И АГ-
РОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ** [Текст]: сборник научных статей Первых
Международных Лыковских научных чтений (22-23 сентября 2015 года) / РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, ЗАО «Университетская книга», Курск, 2015., 485 с.

ISBN 978-5-9907009-4-9

В сборник включены научные статьи российских и зарубежных учёных, представ-
ленные на вебинаре, в которых рассматриваются вопросы теории и математического
моделирования процессов сушки и термовлажностной обработки различных материа-
лов, проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в химической, пище-
вой, текстильной и лёгкой промышленности, в строительной индустрии, древесины,
вопросы экологической и производственной безопасности при проведении рассматри-
ваемых процессов, методы и средства контроля и управления данными процессами.

Материалы сборника предназначены для преподавателей вузов, аспирантов, научно-
технических и инженерно-технических работников различных отраслей промышленно-
сти и агропромышленного комплекса.

ISBN 978-5-9907009-4-9

УДК 687
ББК 37.23

© Российский государственный
аграрный университет – МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2015
© ЗАО «Университетская книга», 2015
© Авторы статей, 2015

УДК 536.2

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ
В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ
МИКРОВОЛНОВОГО ПОЛЯ**

И.Л. Бошкова*, Н.В. Волгушева
I.L. Boshkova*, N.V. Volgusheva****

*Одесская национальная академия пищевых технологий
(e-mail: ira_boshkova@mail.ru)

** Одесская национальная академия пищевых технологий
(e-mail: n-volgusheva@mail.ru)

Odessa National Academy of Food Technologies

Аннотация: Анализируется возможность применения существующих аналитических моделей теплопроводности в теле при действии внутренних источников теплоты к решению задач нагрева в микроволновом поле. Исследована математическая модель, описывающая температурное поле полуграниченного массива в условиях микроволнового нагрева.

Ключевые слова: внутренние источники теплоты; математическая модель; нагрев; сушка; температурное поле; глубина проникновения.

Abstract: Applicability of existing analytical models of thermal conductivity in a body under action of internal heat sources for problems of microwave heating is analysed. Mathematical model describing temperature field of a half-limited massive under microwave heating has been investigated.

Key words: internal heat sources, mathematical model, heating, drying, temperature field, penetration depth.

Метод нагрева материалов в микроволновом электромагнитном поле зарекомендовал себя как высокоэффективный в отношении скорости, энергозатрат и качества конечной продукции в процессах нагрева и сушки, о чем свидетельствуют результаты анализа экспериментальных данных. Дальнейшее изучение процесса микроволнового

нагрева целесообразно дополнить аналитическими исследованиями, среди которых наиболее важны данные по температуре материала, являющиеся базовыми для оценки эффективности действия микроволнового поля и влияния входных характеристик на технологический процесс. Составление математических моделей, адекватно отражающих физическую сущность протекающих явлений под действием микроволнового поля, сопряжено с определенными трудностями, связанными с многофакторностью взаимодействия электромагнитного поля с полярными диэлектриками и необходимостью при переходе к тепловой схеме исключения вторичных элементов. Анализ подходов к составлению моделей взаимодействия микроволнового поля с материалом показал, что корректные математические модели теплопроводности для рассматриваемой области исследований, можно получить, основываясь на моделях А.В. Лыкова, приведенных в [1], в основе которых лежит уравнение теплопроводности с учетом внутренних источников теплоты, которые могут быть как положительными, так и отрицательными. Объемный характер нагрева материала в микроволновом поле позволяет рассматривать материал как среду, в которой действуют внутренние положительные источники теплоты. Следует отметить, что решения, приведенные в [1], справедливы для условия, когда температура окружающей среды (при граничном условии III рода) или температура поверхности (при граничном условии I рода) больше температуры материала: $t_c > t_0$. Предварительно проведенный переход к безразмерным избыточным температурам путем замены переменной с целью приведения к форме, соответствующей задаче охлаждения при условии $t_c < t_0$, не привел к получению данных, адекватно отражающих процесс нагрева от действия внутренних источников, при котором температура окружающей среды не превышает температуру материала. Именно такие условия реализуются при нагреве материала в микроволновом поле.

Таким образом, для аналитического исследования температурного поля в условиях микроволнового нагрева и изменений температуры материала при условии $t_c < t_0$ необходимы соответствующие математические модели. Для полуграниченного массива с учетом действия положительного (микроволновое поле) и отрицательного (определяемого потоком испарившейся влаги) получена зависимость при ГУ I рода [2]:

$$\begin{aligned}
 t(x, \tau) = & (1 - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}})t_0 + \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \cdot t_{нов} - \\
 & - \frac{q_{v10}}{c\rho a \gamma^2} \left[e^{-\gamma x} - \frac{1}{2} e^{\gamma^2 a \tau - \gamma x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \gamma \sqrt{a\tau} \right) + \frac{1}{2} e^{\gamma^2 a \tau + \gamma x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \gamma \sqrt{a\tau} \right) - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right] - \\
 & - \frac{q_{v20}}{c\rho a \beta^2} \left[e^{-\beta x} - \frac{1}{2} e^{\beta^2 a \tau - \beta x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \beta \sqrt{a\tau} \right) + \frac{1}{2} e^{\beta^2 a \tau + \beta x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \beta \sqrt{a\tau} \right) - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right]
 \end{aligned} \quad (1)$$

где a - коэффициент температуропроводности, γ - коэффициент поглощения (электромагнитной энергии), β - коэффициент затухания отрицательного внутреннего источника, обусловленного испарением влаги, нижний индекс 0 при удельных мощностях показывает, что величина относится к максимальному значению. На рис. 1 приведены кривые, полученные по результатам расчетов температуры с помощью зависимости (1) при $q_{v20} = 0$ (период прогрева). Материал - зерно пшеницы и вода. Исходные данные для расчета следующие: начальные температуры материала и среды равны: $t_c = t_0 = 20^\circ\text{C}$, коэффициент поглощения воды $\gamma_e = 125 \text{ м}^{-1}$, коэффициент поглощения зерна $\gamma_z = 30 \text{ м}^{-1}$.

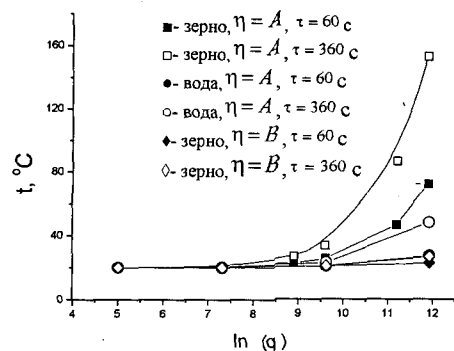


Рис. 1 – Изменение температуры материала в зависимости от удельной мощности внутренних источников и вида материала

Расчет для воды и зерна при одинаковой эффективности преобразования микроволновой энергии во внутреннюю энергию тела ($\eta \equiv A = 1$) показал, что температурные кривые для воды располагаются ниже кривых для зерна. Это объясняется тем, что для корректного сопоставления температур следует учитывать значение диэлектрических характеристик материала (так, для воды при 20°C $\epsilon'' = 82$, для зерна $\epsilon'' = 2,6$). С этой целью целесообразно использовать данные по КПД микроволновой камеры η . Экспериментальные зависимости, полученные для определения КПД камеры при ее загрузке зерном, приведены в [2]. Расчет температур зерна, проведенный при $\eta \equiv B = 0,47$ Вт/м³, привел к верному распределению температурных кривых. В этом случае температура зерна ниже, чем температура воды, и их значения коррелируются с экспериментальными. Расчет изменения температуры по глубине массива также показал соответствие аналитической модели реальному физическому процессу, что доказывает возможность описания нагрева материалов в микроволновом поле точными аналитическими методами.

Список литературы

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., 1967. 559 с.
2. Волгушева, Н. В. Кинетика сушки плотного слоя дисперсного материала (на примере гречихи) при различных способах подвода теплоты: дисс... канд. техн. наук: 05.14.05. Одесса, 2005. 225 с.