

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

**АЛМАТЫ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
АЛМАТИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ALMATY TECHNOLOGICAL UNIVERSITY**

**ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТОҢАЗЫТУ АКАДЕМИЯСЫ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА
INTERNATIONAL ACADEMY OF REFRIGERATION**



**VII ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ҚАЗАҚСТАН-ТОҢАЗЫТУ 2017»**

**VII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«КАЗАХСТАН-ХОЛОД 2017»**

**VII INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE
«KAZAKHSTAN-REFRIGERATION 2017»**

**Конференция баяндамаларының жинағы
15-16 наурыз, 2017 ж.**

**Сборник докладов конференции
15-16 марта 2017 г.**

**Proceedings of the Conference
March 15-16, 2017**

Алматы, 2017

УДК 621.56/59(063)

ББК 31.392

К14

Сборник докладов подготовлен под редакцией
доктора технических наук, академика **Кулажанова Т.К.**

Редакционная коллегия:

Цой А.П., Бараненко А.В., Кантарбаев Р.А.,
Шлейкин А.Г., Андреева В.И. (ответ.секретарь)

К14 Казахстан-Холод 2017: Сб. докл. межд.науч.-техн. конф. (15-16 марта
2017 г.) – Алматы: АТУ, 2017. – 285 с.

ISBN 978-601-263-389-4

В докладах представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в Казахстане, Германии, России, Японии и Украине по следующим направлениям: холодильная техника и компрессоростроение, теплохладоснабжение, системы кондиционирования воздуха и жизнеобеспечения, экология в холодильной промышленности, холодильная и пищевая технология. Сборник рассчитан на специалистов и ученых, работающих в областях холодильной, пищевой, химической, нефтеперерабатывающей промышленности, а также на специалистов по системам кондиционирования воздуха и жизнеобеспечения жилых, коммерческих зданий и спортивных комплексов.

УДК 621.56/59(063)

ББК 31.392

ISBN 978-601-263-389-4

© АТУ, 2017

УДК 536.2

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В
МАТЕРИАЛЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ МИКРОВОЛНОВОГО ПОЛЯ**

Волгушева Н.В.¹, к.т.н., Бошкова И.Л.¹, д.т.н., Жарикова Л.А.², д.ф.-м.н

Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина

*Институт физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального
университета им. И. Канта Россия*

E-mail: n-volgusheva@mail.ru, ira_boshkova@mail.ru, l_zharikova@mail.ru

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 [1-4]. 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 [5], 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 [5], 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. В то же время именно такие условия реализуются при нагреве материала в микроволновом поле.

Целью работы является определение условий применимости математических моделей теплопроводности при нагреве в микроволновом поле материалов, обладающих свойствами полярных диэлектриков.

Объектом исследования является нестационарная теплопроводность в теле при наличии внутренних источников теплоты, возникающих при взаимодействии материала с микроволновым электромагнитным полем. Для проверки соответствия решения физической модели нагрева в микроволновом поле проведены вычисления по зависимости (1), полученной для средней температуры шара в условиях, соответствующих режимам микроволнового нагрева в реальных объектах:

$$\bar{\Theta} = \frac{t(\tau) - t_0}{t_c - t_0} = 1 + \frac{1}{15} P_0 \left(1 + \frac{5}{Bi} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{P_0}{\mu_n^2} \right) B_n \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (1)$$

где: $P_0 = \frac{q_{v1} R^2}{\lambda(t_c - t_0)}$ - критерий Померанцева, q_{v1} - удельная мощность внутренних источников

теплоты, Вт/м³, t_0 - начальная температура материала, t_c - температура окружающей среды. Решение (1) получено при ГУ III рода. Результаты расчетов свидетельствуют, что верные данные получаются при выполнении условия $t_c > t_0$. Для аналитического исследования температурного поля в условиях микроволнового нагрева и изменений температуры материала при условии $t_c < t_0$ необходимы соответствующие математические модели. Для полуограниченного массива с учетом действия положительного (микроволновое поле) и отрицательного (определяемого потоком испарившейся влаги) получена зависимость при ГУ I рода [6]:

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

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.

Нахождение решений прямых задач нестационарной теплопроводности, основываясь на информации о начальном тепловом состоянии, которое определяется температурным полем исследуемого объекта; определение влияния характеристик теплообменного процесса в теле: граничные условия и их параметры, начальные условия, теплофизические свойства, внутренние источники тепла и проводимости, а также геометрические характеристики тела или системы необходимы для определения оптимальных параметров настроек теплового режима и для получения данных о температурном поле материала в процессе нестационарной теплопроводности.

Для проведения расчетов были выбраны два вида материалов: зерно пшеницы и вода. Этот выбор объясняется производственной необходимостью оценки режимных параметров термообработки в ряде технологий, к примеру, при сушке зерновых в СВ поле или при биостимуляции семян. Полученные результаты исследования аналитических моделей предполагается использовать при изучении нестационарной теплопроводности других возможных видов диэлектрических материалов.

Для оценки применимости точных аналитических решений к моделированию развития температуры при действии внутренних источников возникла необходимость проверки соответствия расчетных значений температур физическим явлениям, наблюдаемым при изменении направления теплового потока. Необходимость проверки соответствия вызвана тем, что для всех решений [1], описывающих температурное поле при действии внутренних источников теплоты, отмечалось условие $t_c > t_0$. Расчетные кривые, отражающие изменение температуры материала, приведены на рис. 1.

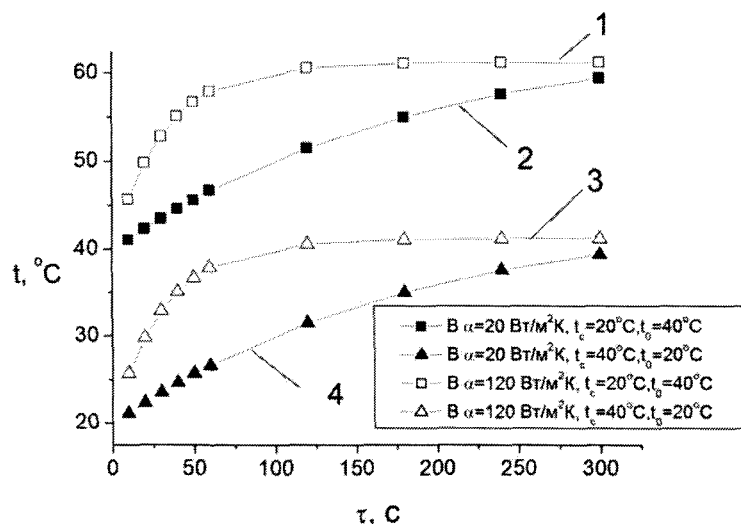


Рисунок 1 – Температура материала (вода) при нагреве в микроволновом поле. $q_{v1} = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м³, $R = 0,0025$ м. Кривые 1,3 – $\alpha = 120$ Вт/(м²К), кривые 2,4 – $\alpha = 20$ Вт/(м²К)

Кривые 1 и 2 получены для условия $t_c < t_0$: $t_c = 20^\circ\text{C}$, $t_0 = 40^\circ\text{C}$. Расчеты проведены для двух значений коэффициентов теплоотдачи: $\alpha = 20$ Вт/(м²К) и $\alpha = 120$ Вт/(м²К). Увеличение α приводит к увеличению температуры воды на одинаковых отрезках времени, что не соответствует реальному процессу. Кривые 3 и 4 получены для условия $t_c > t_0$: в этом случае увеличение коэффициента теплоотдачи, соответственно, увеличение теплового потока от окружающей среды к материалу, приводит к увеличению температуры, что правильно отражает физическую картину зависимости температуры от направлений теплового потока. Следует отметить, что при получении расчетных данных для случая теплоотдачи от материала в окружающую среду (кривые 1,2), что характерно для нагрева в СВ поле, безразмерные избыточные температуры путем замены переменной были приведены к форме, соответствующей задаче охлаждения. Полученные результаты позволяют заключить, что нагрев от внутренних источников с одновременным стоком теплоты в окружающую среду не может быть рассчитан по имеющимся зависимостям [5]. Таким образом, для

аналитического исследования температурного поля и изменений средней температуры материала при условии $t_c < t_0$ необходимы соответствующие математические модели.

На рис. 2 приведены кривые, полученные по результатам расчетов температуры с помощью зависимости (2) 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 $\gamma_v = 125 \text{ м}^{-1}$, коэффициент поглощения зерна $\gamma_z = 30 \text{ м}^{-1}$. 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 несоответствие физическим явлениям 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 [6]. Расчет температур зерна, проведенный при $\eta \equiv B = 0,47 \text{ Вт/м}^3$, привел к верному распределению температурных кривых. В этом случае температура зерна ниже, чем температура воды, и их значения удовлетворительно коррелируются с экспериментальными.

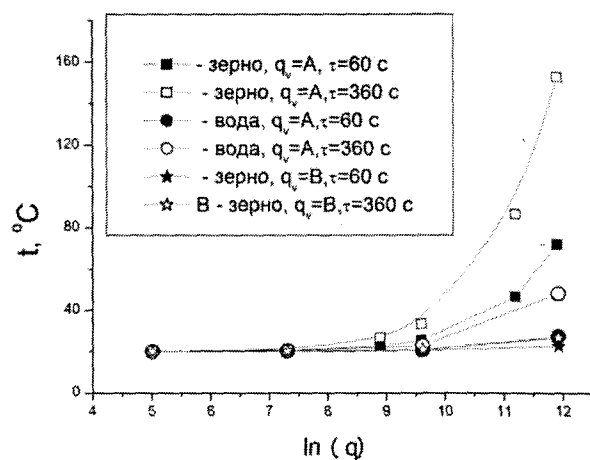


Рисунок 2 – Изменение температуры материала в зависимости от удельной мощности внутренних источников и вида материала

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. На рис. 3 приведены результаты расчета температуры материала в зависимости от координаты, отсчитываемой от поверхности массива, выполненные по зависимости (2). Материал – вода и зерно пшеницы, начальная температура равна начальной температуре материала: $t_c = t_0 = 20^\circ\text{C}$. Линии 1,2 получены для $\tau = 60$ с, линии 3,4 – для $\tau = 360$ с, линии 5,6 – для $\tau = 600$ с. Вследствие низких значений диэлектрических характеристик зерна в сравнении с водой, скорость нагрева воды выше. На начальном этапе нагрева из-за большого коэффициента поглощения температура изменяется не на всех координатных точках, а на определенном расстоянии от начала координат, за пределами которого температура остается постоянной. При увеличении экспозиции изменение температурного поля охватывает последующие слои, что связано с переносом теплоты теплопроводностью.

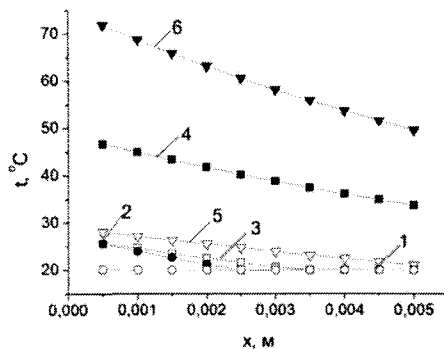


Рисунок 3 – Температура массива в зависимости от координаты при различной экспозиции в МВ поле. Линии 1,3,5 – зерно; 2,4,6 – вода.

Для граничных условий III рода в настоящее время существуют аналитические решения, позволяющие рассчитать локальные температуры при наличии одного положительного источника теплоты [7] и при наличии двух источников теплоты [8], положительного и отрицательного.

1. Для получения достоверных данных по температурам материала по аналитическим зависимостям, полученным для безразмерной избыточной температуры, требуется выполнение условия $t_c > t_0$ (температура среды выше температуры материала).

2. Расчет локальных и средних температур по разработанным математическим моделям с учетом двух внутренних источников теплоты, положительном и отрицательном, позволяет получать удовлетворительные данные также при условии $t_c = t_0$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьянчук, Б. А. Принципы и применения микроволнового нагрева [Текст] / Б.А. Демьянчук. – О.: Черноморье, 2004. – 520 с.
2. Campanone, L.A. Mathematical analysis of microwave heating process [Text] / L.A. Campanone, N.E. Zaritzky // Journal of Food Engineering, 2005. – No. 69. – P. 359- 368.
3. Thostenson, E.T. Microwave processing: fundamentals and applications [Text] / E.T. Thostenson, T.W. Chou // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999. – Vol. 30, № 9. – P. 1055-1071.
4. Nelson, S. O. Dielectric Properties of Agricultural Products and Some Applications [Text] / S.O. Nelson // J. of Res. Agr. ENG, 2008. – Vol. 54, №2. – P. 102-112.
5. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: 1967. – 559 с.
6. Волгушева, Н. В. Кинетика сушки плотного слоя дисперсного материала (на примере гречихи) при различных способах подвода теплоты : дисс... канд. техн. наук : 05.14.05 / Н.В. Волгушева. – О.: 2005. – 225 с.
7. N. Kolesnychenko, N. Volgusheva, I. Boshkova. Analytical study of the processes of thermal conductivity at high intensity heating [Text] // EAST-EUROPEAN JOURNAL OF ENTERPRISE TECHNOLOGY: Energy-saving technologies and equipment. VOL 5, NO. 8 (83) (2016). – P. 26-31.
8. Дементьева, Т.Ю. Интенсификация процессов теплового переноса при сушке зернового материала с применением микроволнового электромагнитного поля.: дис. канд. техн. наук : 05.14.05 / Т.Ю. Дементьева. – 2013. – 137 с.

УДК 536.423:536.71

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМЕСЕЙ ХЛАДАГЕНТОВ

Волчок В.А., к.т.н.

Одесская национальная Академия пищевых технологий Украина
E-mail: recvic@fe.net.ua

По теплофизическим свойствам чистых хладагентов накоплен достаточно большой материал. Существуют банки данных о свойствах веществ, на основе которых можно рассчитать равновесные и