

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА  
МИКОЛАЇВСЬКА ОБЛАСНА ДЕРЖАВНА АДМІНІСТРАЦІЯ  
ПІВДЕННИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР НАН УКРАЇНИ  
ГОЛОВНЕ УПРАВЛІННЯ ДЕРЖАВНОЇ СЛУЖБИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ УКРАЇНИ  
У МИКОЛАЇВСЬКІЙ ОБЛАСТІ  
ДП «ДОСЛІДНО-ПРОЕКТНИЙ ЦЕНТР КОРАБЛЕБУДУВАННЯ»  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ»  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ХАРБІНСЬКИЙ ІНЖЕНЕРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (КИТАЙ)  
УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ ЦЗЯНСУ (КИТАЙ)  
ГДАНСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (ПОЛЬЩА)  
ЗАХІДНО-ПОМЕРАНСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (ПОЛЬЩА)  
КОШАЛІНСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (ПОЛЬЩА)  
БАТУМСЬКИЙ НАВЧАЛЬНО-НАВІГАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (ГРУЗІЯ)  
МОРСЬКЕ ІНЖЕНЕРНЕ БЮРО  
АТ «ЗАВОД «ЕКВАТОР»  
КОМПАНІЯ «АМІКО ГРУПП»  
ДП «ДЕЛЬТА-ЛОЦМАН»  
ТОВ "ЮСК СЕРВИС"  
ТОВ «ЕВЕРІ»

# ІННОВАЦІЇ В СУДНОБУДУВАННІ ТА ОКЕАНОТЕХНІЦІ

## МАТЕРІАЛИ

X міжнародної науково-технічної конференції

Том 2.

26 – 28 вересня 2019 р.

*Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
просп. Героїв України, 9 м. Миколаїв*

УДК 001.895:629.5  
И66

## ОРГАНІЗАТОРИ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА  
МИКОЛАЇВСЬКА ОБЛАСНА ДЕРЖАВНА АДМІНІСТРАЦІЯ  
ПІВДЕННИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР НАН УКРАЇНИ  
ГОЛОВНЕ УПРАВЛІННЯ ДЕРЖАВНОЇ СЛУЖБИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ УКРАЇНИ  
У МИКОЛАЇВСЬКІЙ ОБЛАСТІ  
ДП «ДОСЛІДНО-ПРОЕКТНИЙ ЦЕНТР КОРАБЛЕБУДУВАННЯ»  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ»  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ХАРБІНСЬКИЙ ІНЖЕНЕРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (КИТАЙ)  
УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ ЦЗЯНСУ (КИТАЙ)  
ГДАНСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (ПОЛЬЩА)  
ЗАХІДНО-ПОМЕРАНСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (ПОЛЬЩА)  
КОШАЛІНСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (ПОЛЬЩА)  
БАТУМСЬКИЙ НАВЧАЛЬНО-НАВІГАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (ГРУЗІЯ)  
МОРСЬКЕ ІНЖЕНЕРНЕ БЮРО  
АТ «ЗАВОД «ЕКВАТОР»  
КОМПАНІЯ «АМІКО ГРУПП»  
ДП «ДЕЛЬТА-ЛОЦМАН»  
ТОВ "ЮСК СЕРВИС"  
ТОВ «ЕВЕРІ»

**Матеріали публікуються за оригіналами, наданими авторами.  
Претензії до організаторів не приймаються.**

**Відповідальний за випуск:**  
Блінцов Володимир Степанович

**И66** **Інновації** в судобудуванні та океанотехніці : Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції. у 2 томах. Т. 2. — Миколаїв : НУК, 2019. — 448 с.

**ISBN 978-966-321-370-5**

У збірнику наведені матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в судобудуванні та океанотехніці». Збірник становить інтерес для наукових працівників, викладачів, інженерів та студентів.

**УДК 001.895:629.5**

ISBN 978-966-321-370-5

© Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова, 2019

**Текст аннотації.** *Рассматривается качество обучения учащихся преподавателем. Используется натурный метод исследования. В качестве нового критерия для оценки качества обучения рассматривается темпоральность. Из группы учащихся выделяют способных к творчеству и перспективных, на которых сосредотачивают педагогические и научные усилия. Рекомендованы два направления практического приложения оценки качества обучения.*

**Ключевые слова:** *темпоральность, критерий обучения, творчество, личность*

УДК 536.2:519.876

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ МИКРОВОЛНОВОМ НАГРЕВЕ

**Бошкова И.Л.<sup>1</sup>, Колесниченко Н.А.<sup>2</sup>,  
Волгушева Н.В.<sup>1</sup>, Паскаль А.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Одесская национальная академия пищевых технологий;*

<sup>2</sup> *Военная академия, Украина, Одесса*

<sup>1</sup> E-mail: boshkova.irina@gmail.com,

<sup>2</sup> E-mail: kolesnychenko.natalia@gmail.com

*На основе уравнения теплопроводности с внутренними источниками теплоты при учете теплообмена с окружающей средой получено аналитическое решение, позволяющее рассчитать температуру в произвольной точке полуограниченного массива в условиях нагрева в микроволновом поле. Результаты вычислительного эксперимента свидетельствуют о корректности полученной зависимости.*

**Ключевые слова:** *математическая модель, полуограниченный массив, температура, граничные условия, внутренние источники, теплота*

Применение методов высокоэнергетического воздействия и их комбинирование с традиционными технологиями термической обработки технических материалов, к примеру, на основе керамики, ставит своей целью получение заданных рабочих свойств и характеристик: степень устойчивости к износу и растрескиванию, устойчивость к воздействию высоких температур, требуемая механическая и физическая внутренняя структура. Такие материалы находят свое применение в машиностроении, микроэлектронике, биомеханике, энергетике, в аэрокосмической и транспортной промышленности, их применение дает возможность значительно улучшить срок службы и надежность теплозащитных покрытий газовых турбин [1 – 3]. К интенсивным технологиям нагрева относят нагрев в микроволновом (МВ) поле [4]. Применение микроволнового нагрева открывает возможности разработки принципиально новых технологий создания перспективных керамических, композиционных и полупроводниковых материалов [5]. Эффективность применения микроволнового нагрева для указанных материалов зависит от особенностей формирования температурного поля в теле, для чего необходимы надежные математические модели. Решения прямых задач нестационарной теплопроводности при микроволновом нагреве тел необходимы для получения информации о тепловом состоянии тела и определения характеристик теплообменного процесса. Аналитические зависимости позволяют проводить вычислительные эксперименты и в результате получать новые знания о влиянии широкого спектра параметров процесса на тепловое состояние тела.

*Цель исследования* – получение надежных математических моделей, позволяющих определять тепловое состояние тела в условиях действия внутренних источников теплоты, к примеру, микроволнового нагрева.

### **I Математическая модель нестационарной теплопроводности с внутренними источниками теплоты**

Существуют сложности получения аналитических решений уравнений теплопроводности вследствие необходимости учитывать внутренние источники теплоты и особенности преобразования электромагнитной энергии во внутреннюю. Решения [6] ограничены условием, при котором температура окружающей среды должна быть выше температуры материала, что редко реализуется при микроволновом нагреве. Получено решение для неограниченной пластины при ГУ III рода [7], однако для тел другой формы подобных аналитических зависимостей найдено не было. Это привело к необходимости поиска аналитического решения

для полуограниченного массива при ГУ III рода.

В работе слой материала рассматривается как полуограниченный массив с тепловой изоляцией боковой поверхности при начальной температуре  $t_0$ . Внутри стержня действует положительный источник тепла, обусловленный действием микроволнового поля, и удельная мощность которого  $q_v$ , Вт/м<sup>3</sup>. Теплообмен с окружающей средой протекает по закону Ньютона-Рихмана (граничное условие третьего рода). Требуется найти распределение температуры по длине массива в произвольный момент времени. Математическая запись данной задачи представляется следующим образом:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v}{c \cdot \rho} \quad (1)$$

Начальные и граничные условия:

$$t(x, 0) = t_0 \quad (2) \quad \frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\alpha(t(0, \tau) - t_{\text{ср}}) = -\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} \quad (4)$$

Здесь  $t$  - температура,  $x$  - текущая координата,  $\tau$  - время,  $a$ ,  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  - соответственно коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность слоя материала;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи,  $q_v$  - положительный источник теплоты.

Принято, что внутренние источники тепла являются экспоненциальной функцией координаты:  $q_v = q_{v0} \cdot e^{-\beta \cdot x}$ . Здесь  $q_{v0}$  - максимальная удельная мощность положительного источника  $\gamma$  - коэффициент ослабления электромагнитной энергии в слое, м<sup>-1</sup>.

Применив преобразование Лапласа, получено решение (1) для условий (2) - (4):

$$T(x, \tau) = \left( \frac{T_{\text{ср}} - T_0}{\lambda / \gamma} + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a} \right) \cdot \left( -\frac{\lambda}{\alpha} \cdot \text{Erfc} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) + \frac{\lambda}{\alpha} \cdot e^{-\frac{\gamma \sqrt{a} \left( -\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \right) \cdot \text{Erfc} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot \tau} \right) + \frac{q_{v0} \cdot (\alpha - \lambda \cdot \gamma)}{c \cdot \rho \cdot a} \cdot \frac{1}{2 \cdot \gamma^2 \cdot \lambda} \cdot \left\{ \frac{1}{\gamma - \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \left( -\text{Erfc} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) + e^{-\gamma \sqrt{a} \left( -\gamma \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \right) \right. \quad (5)$$

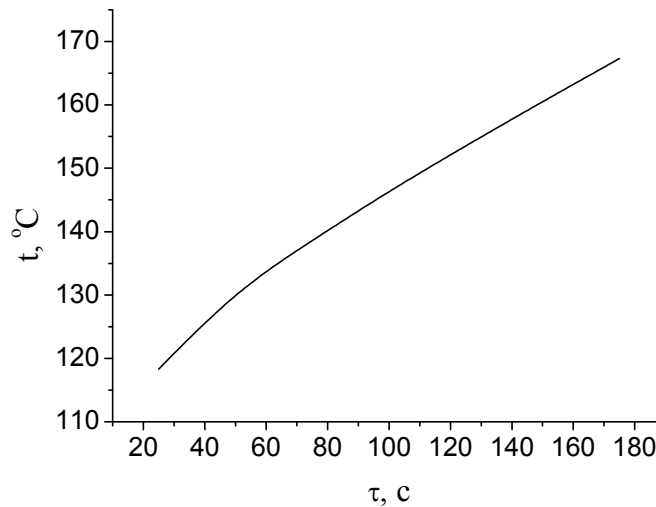
$$\left. \cdot \text{Erfc} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - (\gamma \cdot \sqrt{a \cdot \tau}) \right) + \frac{1}{\gamma \cdot \left( \gamma + \frac{\alpha}{\lambda} \right)} \cdot \left( \text{Erfc} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) + e^{\gamma \sqrt{a} \left( \gamma \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \cdot \text{Erfc} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} + \gamma \cdot \sqrt{a \cdot \tau} \right) \right) \right\} +$$

$$+ \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a \cdot \gamma^2} \cdot (e^{a \cdot \gamma^2 \cdot \tau} - 1) \cdot e^{-\gamma \cdot x} + T_0$$

Полученная зависимость позволяет рассчитать температуру для произвольного момента времени в любой точке полубесконечного массива при различных геометрических и физических условиях, характеризующих среду и материал.

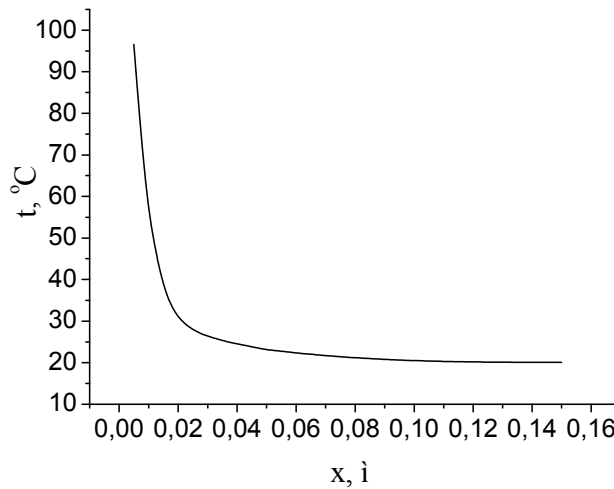
II Результаты аналитического исследования температурного поля полуограниченного массива и их обсуждение

На рис. 1 приведен график изменения температуры во времени, полученный для следующих условий:  $\alpha=20$  Вт/(м<sup>2</sup>К),  $x=0,001$  м,  $q_{v0}=3 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>3</sup>,  $\gamma=35$  м<sup>-1</sup>,  $t_0=20$  °С,  $t_6=20$  °С.



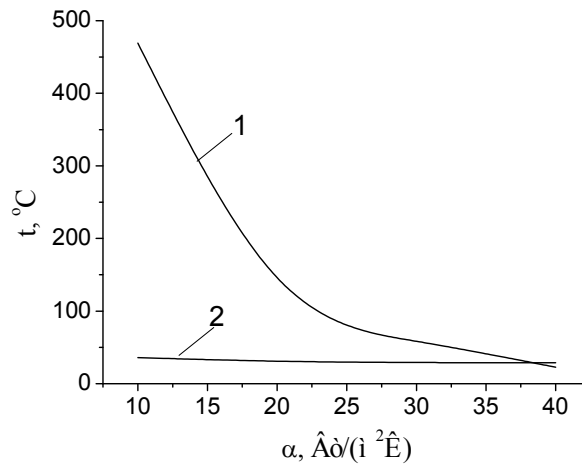
**Рис. 1.** Изменение температуры полуограниченного массива  $t$  по времени:  $x=0,001$  м

Характер изменения температуры соответствует реальной физической картине. Рис. 2 демонстрирует изменение температуры по глубине материала. Видно, что на некотором расстоянии от поверхности интенсивность роста температуры значительно ниже, чем в слоях, близких к поверхности, что связано с затуханием электромагнитной энергии по глубине.



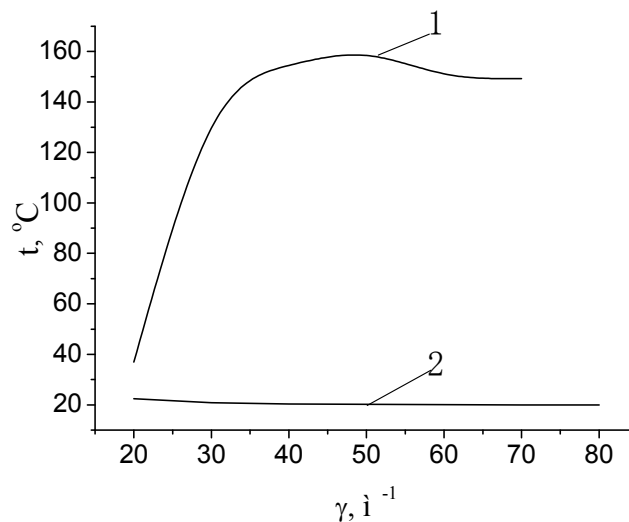
**Рис. 2.** Изменение температуры материала  $t$  по глубине  $x$ :  $t=100$  с

Влияние коэффициента теплоотдачи на распределение температур в материале демонстрируется рис. 3. Видно, что коэффициент теплоотдачи оказывает существенное влияние в слоях, близких к поверхности. Низкие значения  $\alpha$  приводят к тому, что в слоях, близких к поверхности, в которых затухание электромагнитной энергии незначительно, температура существенно возрастает. Коэффициент поглощения  $\gamma$  существенным образом влияет на температуру материала. Ход кривых демонстрируется рис. 4.



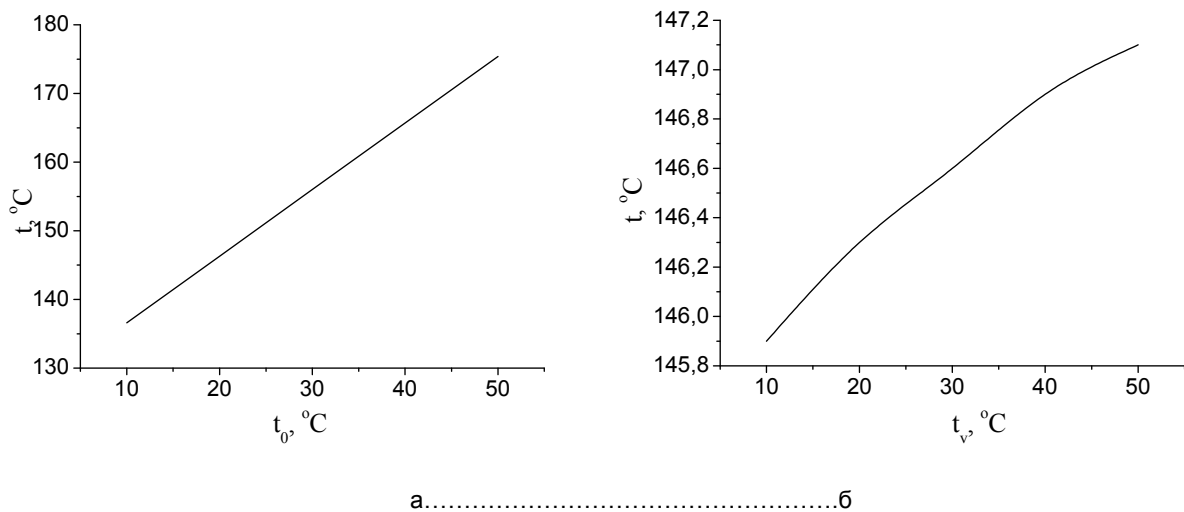
**Рис. 3.** Влияние коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  на температуру материала  $t$ :  $t=100$  с  
1 –  $x=0,01$  м, 2-  $x=0,021$  м.

Расчет показывает, что в непосредственной близости к поверхности при значениях  $\gamma \leq 50 \text{ м}^{-1}$  температура материала растет с увеличением  $\gamma$ , причем этот рост замедляется. При  $\gamma > 50 \text{ м}^{-1}$  наблюдается падение температуры. На большей глубине массива увеличение  $\gamma$  приводит к монотонному снижению температуры. Это можно объяснить тем, что при малых  $\gamma$  влияние внутренних источников теплоты более существенно, чем теплоотдача от поверхности.



**Рис. 4.** Влияние коэффициента поглощения  $\gamma$  на температуру материала.  $t=100$  с

Влияние начальной температуры материала и температуры воздуха на изменение температуры массива показано на рис. 5. Характер изменения температуры тела верно отражает влияние варьируемых параметров.



а.....б  
**Рис. 5.** Изменение температуры  $t$  массива в зависимости от определяющих температур: а – влияние начальной температуры массива  $t_0$ , б – влияние температуры воздуха  $t_v$   
 $\tau=100$  с,  $x=0,001$  м

При составлении модели принимались допущения, что температура окружающей среды, теплофизические и электрофизические свойства (которые выражаются значением коэффициента поглощения  $\gamma$ ) оставались неизменными, начальная температура массива во всех точках одинакова. Для уточнения результатов расчета следует установить зависимость коэффициента поглощения от температуры материала и его структурных характеристик, которые меняются в процессе нагрева. Кроме того, сами данные по коэффициентам поглощения электромагнитной энергии очень ограничены, что не позволяет проводить точные расчеты для широкого класса материалов. Получение этих данных требует проведения отдельных экспериментальных исследований. Тем не менее, основной результат проведенной работы состоит в том, что получена зависимость, которая позволяет получить информацию о тепловом состоянии тела при его нагреве в микроволновом поле и определить влияние на теплообменный процесс определяющих режимных параметров.

#### Выводы

1. Полученное с помощью операционного метода решение математической модели нагрева полуограниченного массива при граничных условиях III рода адекватно отражает влияние начальных условий и режимных параметров на изменение температуры тела.

2. Анализ результатов расчетов позволяет сделать вывод, что представленная аналитическая зависимость может быть рекомендована для расчета температурного поля диэлектрического материала, в частности, для производства технической керамики, при действии положительных внутренних источников теплоты, к примеру, от микроволнового электромагнитного поля.

#### Список литературы

1. Wetherhold, R. C., Wetherhold, R. C., Seelman S., Wang, J. (1996). The use of functionally graded materials to eliminated or control thermal deformation. *Composites Science and Technology*, 56, 1099–1104.
2. Lukasiewicz, S. A., Lukasiewicz S. A., Babaei R., Qian R. E. (2003.) Detection of material properties in a layered body by means of thermal effects. *J. of Thermal Stresses*, 1(26), 13–23.
3. Айзикович, С. М., Айзикович, С. М., Александров, В. М., Васильев, А. С., Кренев, Л. И., Трубчик. И. С. (2011.) *Аналитические решения смешанных осесимметричных задач для функционально-градиентных сред*. М.: Физматлит.
4. Sheppard, L. M. (1988) Manufacturing ceramics with microwave: the potential for economical production. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 67(10), 3041–3086.
5. Выков, Yu. V., Egorov, S. V., Ereemeev, A. G. (2012.) Fabrication of Metal-Ceramic Functionally Graded Materials by Microwave Sintering. *Inorganic Materials: Applied Research*, 3(3), 261–269.
6. Лыков, А. В. (1967) *Теория теплопроводности*. М.: Высшая школа.
7. Lukas, R. (2005.) *Mikrowelleunterstützte Wärmt- und Stoffübertragung beim Trocknen und Entbindern Technischer Keramik*. (Doktoral Dissertation). Freiburg.

**Бошкова И.Л.<sup>1</sup>, Колесниченко Н.А.<sup>2</sup>, Волгушева Н.В.<sup>1</sup>, Паскаль А.А.<sup>1</sup>**

**ВІВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПРИ МІКРОХВИЛЬОВОМУ НАГРІВАННІ**

*На основі рівняння теплопровідності з внутрішніми джерелами теплоти при обліку теплообміну з навколишнім середовищем отримано аналітичне рішення, що дозволяє розрахувати температуру в довільній точці напівобмеженого масиву в умовах нагріву в мікрохвильовому полі. Результати обчислювального експерименту свідчать про коректність отриманої залежності.*

**Ключові слова:** математична модель, напівобмежений масив, температура, граничні умови, внутрішні джерела, теплота

**Boshkova I. L.<sup>1</sup>, Kolesnichenko N.A.<sup>2</sup>, Volgushheva N.V.<sup>1</sup>, Pascal A.A.<sup>1</sup>**

**STUDY OF HEAT TRANSFER PROCESSES BY MICROWAVE HEATING**

*On the basis of the equation of heat conductivity with internal sources of heat, taking into account heat exchange with the environment, an analytical solution was obtained that allows calculating the temperature at an arbitrary point of a semi-limited array under conditions of heating in the microwave field. The results of the computational experiment indicate the correctness of the obtained dependence.*

**Key words:** mathematical model, semi-arrays, temperature, boundary conditions, internal sources, heat

<b>Потапов В.О., Білий Д.В.</b> Перспективи застосування технологічних систем активної вентиляції плодоовочесховищ.....	404
<b>Xinhao Zhang, Peilin Dou</b> Features of two current high-end aquaculture equipment and a preliminary study of a new deep sea fish farm.....	407
<b>Потапов В.О., Семенюк Д.П.</b> Аналіз способів отримання холоду в польових умовах.....	413
<b>Верхивкер Я.Г., Мирошніченко Е.М., Альтман Э.И.</b> Использование полимерной потребительской тары в технологиях производства пищевых продуктов .....	417
<b>Георгиев Е.В.</b> Методика получения экстрактов <i>LACTUCA VIROSA</i> методом микроволнового экстрагирования.....	422
<b>Кологривов М.М., Кологривова Н. М.</b> Оцінка якості викладу навчального матеріалу.....	426
<b>Бошкова И.Л., Колесніченко Н.А., Волгушева Н.В., Паскаль А.А.</b> Изучение процессов теплопроводности при микроволновом нагреве.....	430