

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ

УДК 536.2:519.876

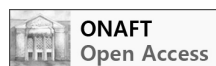
**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ НАГРЕВЕ ПЛОТНЫХ ТЕЛ
ANALYTICAL STUDY OF THE HEAT AT INTENSE HEAT DENSE BODIES**

**Колесниченко Н. А., аспирант, Волгушева Н. В., канд. техн. наук, доцент,
Бошкова И. Л., д-р техн. наук, доцент,
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса
Kolesnichenko N. A., Volgusheva N. V., Boshkova I. L.
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine**

Copyright © 2016 by author and the journal "Scientific Works".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Проведено аналітичне дослідження процесів теплопровідності при високоінтенсивному нагріві щільних тіл, подібних глинистим і пластичним матеріалам. Розглянуті умови применимості гіперболічного і параболічного рівняння теплопровідності для складання математических моделей високоінтенсивного нагріву. Отримано, що для малих чисел Фур'є рішення гіперболічного рівняння теплопровідності дозволяє визначити товщину термічного шару і його змінення во часі. Показано на прикладі виробництва технічної кераміки, що можливі швидкості нагріву значно нижче граничної, до якої швидкість розповсюдження теплоти може бути прийнята нескінченно великою. Сделано висновок, що при побудові математических моделей для процесів термообробки в технологіях виробництва технічної кераміки і подібних їм по інтенсивності нагріву, раціонально ґрунтуватися на рівнянні теплопровідності параболічного типу. Предложена математическая модель теплопроводности полуграниченного массива при действии внутренних источников теплоты для граничных условий III рода в дифференциальной форме. Как результат ее решения, получены аналитические зависимости для расчета температуры массива при его нагреве в условиях действия внутренних источников теплоты, в частности, в микроволновом поле. Предлагаемая зависимость для расчета безразмерной избыточной температуры позволяет получить информацию о тепловом состоянии тела при его нагреве в микроволновом поле и определить влияние на теплообменный процесс определяющих характеристик: коэффициента теплоотдачи, коэффициента поглощения электромагнитной энергии, толщины слоя, начальной температуры материала и температуры окружающей среды.

The analytical study of the processes of thermal conductivity at high intensity heating of dense bodies, similar to clay and plastic materials, was conducted. The conditions of applicability for the hyperbolic and parabolic equation of thermal conductivity for the composition of mathematical models of high intensity heating were explored. It was found that for the small Fourier numbers, the solution of hyperbolic equation of thermal conductivity makes it possible to determine thickness of the thermal layer and its change over time. Based on the example of manufacturing technical ceramics, it was demonstrated that the possible heating rates are considerably below the boundary rate, within which the velocity of heat propagation may be accepted as infinitely high. The conclusion was drawn that in the course of construction of mathematical models for the processes of thermal treatment in the technologies for the production of technical ceramics and the products similar to them in the intensity of heating, it is rational to take the thermal conductivity equation of parabolic type as the basis. A mathematical model of thermal conductivity of a semi—restricted array by the effect of internal heat sources for the boundary conditions of the III kind in the differential form was proposed. As the result of its solution, we obtained analytical dependencies for the calculation of temperature of the array at its heating under conditions of action of the internal heat sources, in particular, in the microwave field. The proposed dependency for calculating the dimensionless excess temperature makes it possible to obtain information about a thermal state of a body at its heating in the microwave field and to determine influence of the determining characteristics — the heat emission coefficient, the coefficient of absorption of electromagnetic energy, thickness of the layer, initial temperature of material and ambient temperature — on the heat exchange process.

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Ключевые слова: время релаксации, число Фурье, безразмерная температура, гиперболическое уравнение, теплопроводность, микроволновое поле.

Key words: relaxation time, the number of Fourier, the dimensionless temperature, hyperbolic equation, thermal conductivity, microwave field.

Особенности аналитического исследования высокоинтенсивных процессов теплопроводности. Применение методов высокоэнергетического воздействия и их комбинирование с традиционными технологиями термической обработки глинистых и пластических материалов 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. Эффективность получения таких материалов зависит от особенностей формирования температурного поля в теле, для получения данных о котором необходимы надежные математические модели. Однако в настоящее время существует проблема, связанная с неопределенностью подходов к моделированию высокоинтенсивных процессов, в первую очередь, вследствие неопределенности допущений, принимаемых при формулировке дифференциального уравнения теплопроводности. Само понятие высокоинтенсивного нагрева применяется довольно широко, при построении моделей допустимы уравнения как гиперболического, так и параболического типа, в зависимости от специфики распространения теплоты в конкретном материале.

Таким образом, актуальность темы исследования обуславливается необходимостью определения корректных математических моделей теплопроводности для условий высокоинтенсивного нагрева материала. Аналитические решения дают возможность проводить вычислительные эксперименты и, в результате, получать новые знания о влиянии широкого спектра параметров процесса на тепловое состояние тела.

Как отмечено в [1], конкретному виду изотермической поверхности соответствует определенный дифференциальный оператор теплопроводности, среди которых оператор параболического типа является частным случаем. Этому оператору соответствует строго определенный класс изотермических поверхностей, и выйти за его пределы нельзя изменением начальных и граничных условий [1—2]. Дифференциальное уравнение теплопроводности, связывающее временное и пространственное изменение температуры, для среды с переменными физическими характеристиками и внутренними источниками теплоты при допущении о том, что скорость распространения теплоты бесконечно велика, имеет следующий вид:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + q_v, \quad (1)$$

При его выводе тепловой поток через контрольную площадку в некоторый момент времени принят пропорциональным разности температур в точках тела, удаленных от этой площадки на некоторое расстояние, в тот же момент времени. В 1941 г. А. В. Лыковым была предложена гипотеза о конечных скоростях распространения теплоты и массы [3]. В случаях, когда линейная связь между тепловым потоком и градиентом температур нарушается, плотность теплового потока определяется обобщенным законом Фурье (в предположении, что теплотифизические характеристики не зависят от температуры и внутренние источники теплоты отсутствуют):

$$\vec{q} = -\lambda \nabla t - \tau_r \frac{\partial \vec{q}}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где τ_r — постоянная времени (время релаксации).

При резком изменении $\vec{q}$ перестройка температурного поля и градиента температуры происходит со смещением во времени (τ_r). Чем выше степень нестационарности, тем больше τ_r . Дифференциальное уравнение теплопроводности с учетом релаксационных процессов было получено на основе уравнения теплового баланса и обобщенного закона Фурье (гиперболическое уравнение теплопроводности):

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \tau_r \frac{\partial^2 t}{\partial \tau^2} = a \nabla^2 t, \quad (3)$$

Переход к гиперболическому оператору устраняет некоторые некорректные решения классической теории теплопроводности. В [4] представлены результаты исследования решений краевых задач переноса для уравнений гиперболического типа, где рассматривалась корректность постановки задачи при граничных условиях (ГУ) ГУ I и ГУ III рода. В [5] представлено решение нелинейного гиперболического уравнения теплопроводности при ГУ I рода в квазистационарном режиме нагрева для полубесконечного тела. Показано, в рассматриваемом случае можно вместо гиперболического уравнения теплопроводности использовать решение параболического уравнения, при условии, что коэффициент теплопроводности будет функцией как температуры, так и скорости нагрева.

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ

Отдельной проблемой математического моделирования процессов теплопроводности является нагрев в микроволновом поле, поскольку здесь требуется учитывать преобразование электромагнитной энергии во внутреннюю энергию в объеме тела. В то же время, технологии получения материалов, основанные на микроволновом нагреве, получают все большее распространение [6—8]. На основе применения теории обобщенных функций путем сведения задачи теплопроводности для многослойной конструкции к однослойной с переменными (разрывными) физическими свойствами среды в замкнутом виде получено точное аналитическое решение задачи нестационарной теплопроводности с переменными во времени внутренними источниками теплоты [3]. Однако, предложенные зависимости имеют свои ограничения и могут быть применены исключительно для многослойных конструкций при заданных значениях внутренних источников теплоты.

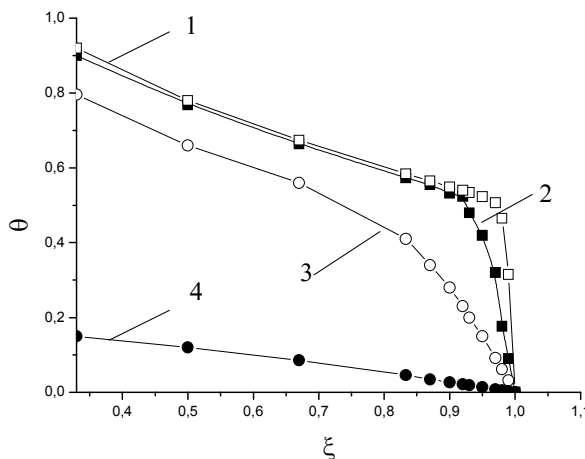
Целью работы является составление математических моделей высокоинтенсивного нагрева плотных тел, свойства которых подобны глинистым материалам и пластическим массам, применяемых при производстве технической керамики и различных композиционных изделий.

Для достижения данной цели следовало решить ряд задач:

- провести анализ существующих решений гиперболических уравнений теплопроводности и оценить их применимость для расчета высокоинтенсивных процессов производства, в частности керамики;
- оценить вклад релаксационных явлений в процессы, интенсивность которых ограничена требованиями для производства керамики;
- получить зависимости для расчета температуры при микроволновом нагреве полуограниченного массива для граничных условий III рода;
- провести вычислительный эксперимент по полученным зависимостям с целью их верификации.

Аналитическое исследование температуры тела при высокоинтенсивном нагреве. Аналитическое исследование теплового состояния тела проведено с использованием зависимостей [9]. На рис. 1 представлен график изменения избыточной температуры тела при различных значениях Fo . Релаксационное число Фурье

$$Fo_r = \frac{a \cdot \tau_r}{\delta^2} \text{ относительная координата } \xi = \frac{x}{\delta}, \text{ безразмерная избыточная температура } \theta_K = \frac{t - t_{cm}}{t_0 - t_{cm}}.$$



1 — $Fo = 2,78 \cdot 10^{-4}$; 2 — $Fo = 2,78 \cdot 10^{-3}$;
3 — $Fo = 2,78 \cdot 10^{-2}$; 4 — $Fo = 2,78 \cdot 10^{-1}$

Рис. 1 — Избыточная температура тела при различных значениях числа Фурье

для процессов любой интенсивности применение уравнения теплопроводности гиперболического типа позволяет решить проблему малых чисел Фурье. На малых числах Фурье прогрев (охлаждение) тела определяется движением фронта ударной тепловой волны, на котором происходит скачок температур.

Анализ необходимости применения гиперболического уравнения теплопроводности проводился на основании расчетных данных по температуре при задании экстремально больших значений температур поверхности нагрева: от 3000 °C до 4000 °C (к примеру, при спекании керамики температура не превышает 1420 °C). Полу-

Расчеты проводились при следующих условиях: $Fo_r = 2,78 \cdot 10^{-11}$, $\delta = 0,06$ м. При Fo порядка $10^{-3} \dots 10^{-4}$ наблюдается существенное изменение температуры на границе тела, далее температурная кривая начинает сглаживаться, в этих случаях вид кривых соответствует результатам, получаемым по известным зависимостям, в основе которых лежит дифференциальное уравнение теплопроводности параболического типа. Фронт ударной волны при $Fo = 2,78 \cdot 10^{-4}$ ограничивается безразмерной координатой $\xi = 0,97$, при $Fo = 2,78 \cdot 10^{-3}$ координата сместилась до значения $\xi = 0,92$. Расчеты показывают, что за фронтом ударной волны температура менее интенсивно, но изменяется, т.е. в период времени релаксации теплота продолжает распространяться путем теплопроводности.

Применение зависимостей [9] позволяет проводить уточненные расчеты температурного поля с учетом релаксационных процессов при любых (сколь угодно малых) числах Фурье и определять границу теплового фронта. Представляется, что

**СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І
АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ.
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ
В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ**

чено, что скорость нагрева в этих условиях 2,6...3,8 К/с. В то же время, в соответствии с зависимостью (7), для глинистых материалов, свойства которых определялись согласно [10], граничная скорость нагрева составляла 13185 К/с (в качестве T_w принята температура плавления каолина (1800 °С), начальная температура $T_0 = 20$ °С). Таким образом, при моделировании температурного поля в процессах спекания керамики существует принципиальная возможность применения уравнений теплопроводности параболического типа.

Математическая модель нестационарной теплопроводности на основе параболического уравнения с внутренними источниками теплоты. При формулировке модели принимались следующие условия. 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/м³. Теплообмен с окружающей средой протекает по закону Ньютона—Рихмана (граничное условие третьего рода). Задачей является получение зависимости для температуры от глубины массива и времени. Математическая запись данной задачи представляется следующим образом:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v}{c \cdot \rho} \quad (4)$$

$$t(x, 0) = t_0 \quad (5) \quad \frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\alpha(t(0, \tau) - t_{\text{ср}}) = -\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} \quad (7)$$

Здесь t — температура, x — текущая координата, τ — время, a , λ , c , ρ — соответственно коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность слоя материала; α — коэффициент теплоотдачи, q_v — положительный источник теплоты.

Принято, что внутренние источники тепла являются экспоненциальной функцией координаты: $q_v = q_{v0} e^{-\beta x}$. Здесь q_{v0} — максимальная удельная мощность положительного источника, γ — коэффициент ослабления электромагнитной энергии в слое, м⁻¹. Применив преобразование Лапласа, получено решение (8):

$$\begin{aligned} T(x, \tau) = & \left(\frac{T_0 - T_{\text{ср}}}{\lambda} + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a} \cdot \frac{1}{\gamma + \frac{\alpha}{\lambda}} \right) \cdot \left(-\frac{\lambda}{\gamma} \cdot \text{Erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) + \frac{\lambda}{\alpha} \cdot e^{-\frac{\gamma}{\lambda} \sqrt{a \cdot \tau} \left(-\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \right. \\ & \cdot \text{Erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot \tau} \right) \left. + \frac{q_{v0} \cdot (\alpha - \alpha \cdot \gamma)}{c \cdot \rho \cdot a} \cdot \frac{1}{2 \cdot \gamma^2 \cdot \lambda} \cdot \left\{ \frac{1}{\gamma - \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \left(-\text{Erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) + e^{-\gamma \sqrt{a \cdot \tau} \left(-\gamma \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \right) \right. \right. \right. \\ & \cdot \text{Erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \gamma \cdot \sqrt{a \cdot \tau} \right) \left. + \frac{1}{\gamma \cdot \left(\gamma + \frac{\alpha}{\lambda} \right)} \cdot \left(\text{Erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) + e^{\gamma \sqrt{a \cdot \tau} \left(\gamma \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \cdot \text{Erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} + \gamma \cdot \sqrt{a \cdot \tau} \right) \right) \right\} + \\ & + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a \cdot \gamma^2} \cdot \left(e^{a \cdot \gamma^2 \cdot \tau} - 1 \right) \cdot e^{-\gamma x} + T_0 \end{aligned} \quad (8)$$

Аналитическое исследование температурного поля полуограниченного массива проводилось при варьировании следующих определяющих характеристик: коэффициента теплоотдачи α , коэффициента поглощения электромагнитной энергии γ , толщины слоя x , начальной температуры материала t_0 и температуры окружающей среды t_a . Рис. 2 демонстрирует изменение температуры по глубине материала.

Данные получены для следующих условий: $\alpha = 20$ Вт/(м²К), $x = 0,001$ м, $q_{v0} = 3 \cdot 10^5$ Вт/м³, $\gamma = 35$ м⁻¹, $t_0 = 20$ °С, $t_a = 20$ °С. 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.

Влияние коэффициента теплоотдачи на распределение температур в материале демонстрируется рис. 3. Низкие значения α приводят к тому, что в слоях, близких к поверхности, в которых затухание электромагнитной энергии незначительно, температура существенно возрастает.

Полученная зависимость (8) позволяет рассчитать температуру полубесконечного массива при различных геометрических и физических условиях, среды и материала.

Выводы. Аналитическое исследование изменения температурного поля в материале показало, что при значениях чисел Фурье, соизмеримых с релаксационными числами Фурье, формируются две области, соответствующие термическому слою и слою, в котором релаксационные процессы не завершились.

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ

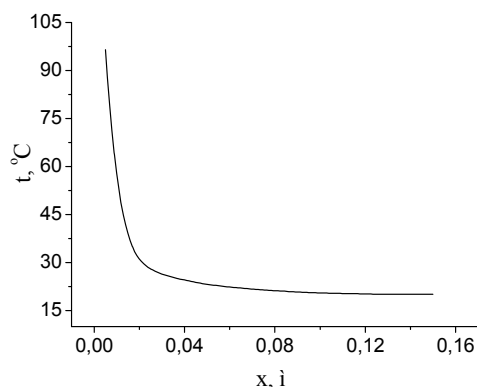
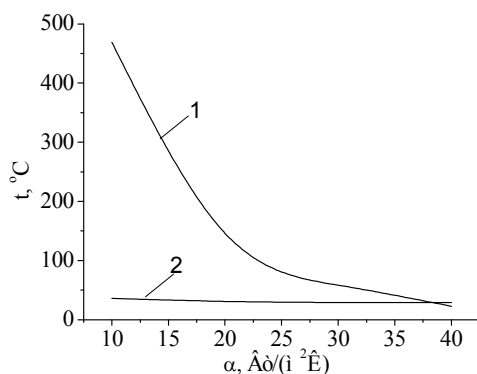


Рис. 2 — Изменение температуры материала t , °C по глубине x , i (время $\tau=100$ с)



1 — $x=0,01$ м; 2 — $x=0,021$ м

Рис. 3 — Влияние коэффициента теплоотдачи α на температуру материала t , °C (время $\tau=100$ с)

Вкладом релаксационных явлений в процессы, интенсивность которых ограничена требованиями для производства, к примеру, керамики, можно пренебречь. Показано, что возможные скорости нагрева на примере производства технической керамики значительно ниже граничной, выше которой нельзя принимать гипотезу о бесконечной скорости распространения теплоты. При построении математических моделей целесообразно основываться на уравнении теплопроводности параболического типа.

Предложена математическая модель теплопроводности полуограниченного массива при действии внутренних источников теплоты для граничных условий III рода в дифференциальной форме. Как результат ее решения, получена аналитическая зависимость для расчета температуры массива при его нагреве в условиях действия внутренних источников теплоты, в частности, в микроволновом поле.

Предлагаемая зависимость для расчета безразмерной избыточной температуры позволяет получить информацию о тепловом состоянии тела при его нагреве в микроволновом поле и определить влияние на теплообменный процесс определяющих величин: коэффициента теплоотдачи, коэффициента поглощения электромагнитной энергии, толщины слоя, начальной температуры материала и температуры окружающей среды.

Литература

1. Шашков, А. Г. Волновые явления теплопроводности [Текст] / А. Г. Шашков, В. А. Бубнов, С. Ю. Яновский. — М.: Эдиториал УРСС, 2004. — 296 с.
2. Риман, Б. Сочинения [Текст] / Б. Риман; Пер. с нем. под ред., с предисловием, обзорной статьей и примечаниями В. Л. Гончарова. — М.—Л.: Гостехиздат, 1948. — 543 с.
3. Лыков, А. В. Теория теплопроводности [Текст] / А. В. Лыков. — М.: Высшая школа, 1967. — 559 с.
4. Карташов, Э. М. Краевые задачи для гиперболических моделей переноса. Математические методы и информационные технологии в химии и химической технологии [Текст] / Э. М. Карташов // Вестн. МИТХТ. — 2008. — № 3, Т. 3. — С. 20–22.
5. Исаев, К. Б. К вопросу об учете конечной скорости распространения тепла в твердом теле [Текст] / К. Б. Исаев // Тр. V Минского межд. форума ММФ-2004. — Минск: ИТМО НАНБ, 2004. — С. 1–6.
6. Luo, Zh. A reduced-order extrapolation central difference scheme based on POD for two-dimensional fourth-order hyperbolic equations [Text] / Zh. Luo, Sh. Jin, J. Chen // Applied Mathematics and Computation. — 2016. — V. 289. — P. 396–408.
7. Shen, W. Anti-diffusive methods for hyperbolic heat transfer [Text] / W. Shen, Leigh Little, L. Hu // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 2010. — V. 199, Iss. 17–20. — P. 1231–1239.
8. Ordonez-Miranda, J. Determination of thermal properties for hyperbolic heat transport using a frequency-modulated excitation source [Text] / J. Ordonez-Miranda, J. J. Alvarado-Gil // International Journal of Engineering Science. — 2012. — V. 50, Iss. 1. — P. 101–112.
9. Кудинов, В. А. Об одном методе получения точного аналитического решения гиперболического уравнения теплопроводности на основе использования ортогональных методов [Текст] / В. А. Кудинов, И. В. Кудинов // Вестник Самарского Технического ун-та. Серия: Физико-математические науки. — 2010. — № 5 (21). — С. 159–169.

**СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І
АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ.
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ
В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ**

10. Шумскайте, М. Й. Анализ влияния объемного содержания и типа глинистых минералов на релаксационные характеристики песчано-алевритовых образцов керна [Текст] / М. Й. Шумскайте, В. Н. Глинских // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – 2015. – № 7. – С. 35-38.

References

1. Shashkov, A. G., Bubnov, V. A., Janovskij, S. Ju. (2004). Volnovye javlenija teploprovodnosti. Moscow: Jeditorial UPSS, 296.
2. Riman, B. (1948). Sochinenija. Per. s nem. pod red., s predisloviem, obzornoj stat'ej i primechanijami V. L. Goncharova. Moscow–Leningrad: Gostehizdat, 543.
3. Lykov, A. V. (2004). Teorija teploprovodnosti. Moscow: Vysshaja shkola, 559.
4. Kartashov, Je. M. (2008). Kraevye zadachi dlja giperbolicheskikh modelej perenosa. Matematicheskie metody i informacionnye tehnologii v himii i himicheskoi tehnologii. Vestn. MITHT, 3 (3), 20–22.
5. Isaev, K. B. (2004). K voprosu ob uchte konechnoj skorosti rasprostraneniya tepla v tverdom tele. Trydi. V Minskogo mezhd. foruma MMF-2004. Minsk: ITMO NANB, 1–6.
6. Luo, Zh. Chen, Sh. Jin, J. (2016). A reduced-order extrapolation central difference scheme based on POD for two-dimensional fourth-order hyperbolic equations. Applied Mathematics and Computation, 289, 396–408.
7. Shen, W., Leigh Little, L. Hu. (2010). Anti-diffusive methods for hyperbolic heat transfer. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 199 (17–20), 1231–1239.
8. Ordonez-Miranda, J., Alvarado-Gil, J. J. (2012). Determination of thermal properties for hyperbolic heat transport using a frequency-modulated excitation source. International Journal of Engineering Science. 50 (1), 101–112.
9. Kudinov, V. A., Kudinov, I. V. (2010). Ob odnom metode poluchenija tochnogo analiticheskogo reshenija giperbolicheskogo uravnenija teploprovodnosti na osnove ispol'zovanija ortogonal'nyh metodov. Vestnik Samarskogo Tehnicheskogo un-ta. Serija: Fiziko-matematicheskie nauki, 5 (21), 159–169.
10. Shumskajte, M. J., Glinskih, V. N. (2015). Analiz vlijaniya obemnogo sodержaniya i tipa glinistyh mineralov na relaksacionnye harakteristiki peschano-alevritovyh obrazcov kerna. Geologija, geofizika i razrabotka nefityanh mestorozhdenij, 7, 35–38.

УДК 536.24

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ТЕПЛООБМЕННИКЕ
С ГРАНУЛИРОВАННОЙ НАСАДКОЙ
STUDY OF HEAT TRANSFER PROCESSES EXCHANGER GRANULAR
NOZZLE INCLUDED**

Солодка А. В., аспирант

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

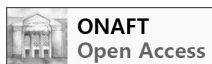
Solodkaya A. V.

Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

Copyright © 2016 by author and the journal “Scientific Works”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Исследуется эффективность работы теплоутилизатора с гранулированной насадкой. Обоснован выбор для исследования частиц гравия и керамзита в качестве материала насадки. Представлены результаты экспериментального изучения межкомпонентного теплообмена в плотном слое дисперсного (гранулированного) материала, движущегося и неподвижного. В схеме экспериментальной установки нагретый воздух моделирует поток отходящих газов в системе вентиляции промышленных предприятий с низкпотенциальными тепловыми выбросами. Исследуется эффективность работы теплообменного участка по схеме противотока в сравнении с продувкой неподвижного слоя. Предложено критериальное уравнение для определения коэффициента межкомпонентного теплообмена, которое учитывает скорость движения теплоносителей, теплофизические свойства газового компонента, определяющий размер частиц. Результаты анализа экспериментальных