

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

На правах рукопису

**КОЛЕСНИЧЕНКО НАТАЛЯ ОЛЕКСАНДРІВНА**

УДК 536.2.02

**ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТЕПЛОТИ  
В ДИСПЕРСНИХ ТА ЩІЛЬНИХ СЕРЕДАХ ПРИ  
ВИСОКОІНТЕНСИВНИХ ПРОЦЕСАХ НАГРІВАННЯ**

Спеціальність **05.14.06** – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2017

*Дисертація є рукописом*

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій  
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, доц.  
**Бошкова Ірина Леонідівна,**  
доцент кафедри теплоенергетики та  
трубопровідного транспорту енергоносіїв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Потапов Володимир Олексійович,**  
зав. кафедри холодильної та торгівельної  
техніки Харківського державного університету  
харчування та торгівлі МОН України

доктор технічних наук, професор  
**Дем'янчук Борис Олександрович,**  
зав. кафедри технічного забезпечення Військової  
академії (м. Одеса) Міністерства оборони України

Захист дисертації відбудеться "19" 06 2017 р. в 12<sup>00</sup> в ауд. 108 на  
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 ОНАХТ за адресою: вул.  
Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної  
академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна,  
65082.

Автореферат розісланий "15" 05 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради,  
доктор технічних наук, професор



В.І. Мілованов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Високоінтенсивний нагрів є ефективним способом обробки технічних матеріалів, які мають численні застосування в мікроелектроніці, авіакосмічній техніці, машинобудівній, електронній, хімічній промисловості, біомеханіці. Особливе значення має нагрів в мікрохвильовому (МХ) полі. Високотемпературна мікрохвильова обробка матеріалів демонструє значний потенціал застосування в різних технологіях, таких як створення композиційних і функціонально-градієнтних матеріалів (Sheppard L. M., В.В. Сапунів, Makino Y., Ohmae T.), виробництво технічної кераміки (Lukas R.), порошкова металургія (Gupta M., Wong Wai Leong, E.), виготовлення напівпровідникових структур (R.C. Merkle, Corradi A. B.), синтез наноструктурованих покриттів (Морозов А.Н., Wu X., Corradi A. B., Shangguan W.F.) Розвиток нових технологій одержання керамічних, композиційних і напівпровідникових матеріалів залежить від знань особливостей формування температурного поля в тілі, для одержання даних у якому необхідні надійні математичні моделі. Однак у цей час існує проблема, пов'язана з невизначеністю підходів до моделювання високоінтенсивних процесів, у першу чергу, внаслідок обґрунтованості припущень, прийнятих при формулюванні диференціального рівняння теплопровідності. Саме поняття високоінтенсивного нагріву застосовується досить широко, при побудові моделей теплопровідності припустимі рівняння як гіперболічного, так і параболічного типу в залежності від особливостей поширення теплоти в досліджуваному матеріалі, що наголошується в роботах Ликова А.В., Ісаєва К.Б., Шашкова А.Г. Результати розв'язків рівнянь теплопровідності в ряді випадків не відбивають реального розподілу температур при високоінтенсивному нагріванні внаслідок недостатності знань особливостей поширення теплоти в досліджуваних матеріалах (Шашков А.Г.), проблема ускладнюється при моделюванні нагріву в мікрохвильовому полі. Таким чином, актуальність теми дослідження обумовлюється необхідністю складання коректних математичних моделей теплопровідності для умов нагріву матеріалу з високою інтенсивністю.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.** Дисертаційна робота виконувалася згідно із Законом України "Про енергозбереження", затвердженим Постановою Верховної Ради України №74/94 01.07.1994 р., "Основних положень енергетичної стратегії України на період до 2030 р.", прийнятих Кабінетом Міністрів України 15.03.2006 р.; Законом Кабінету Міністрів України № 148 від 5.02.97 р., що затвердив "Комплексну Державну Програму Енергозбереження".

Дисертаційна робота виконувалася в рамках держбюджетної тематики кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв "Методи теплотеплофізичного експерименту і проблеми масообміну в нетрадиційній енергетиці, низькотемпературних установках, нових термічних технологіях".

**Мета і завдання досліджень.** Метою роботи є встановлення особливостей поширення теплоти в дисперсних і щільних середовищах при високоінтенсивних процесах нагріву в технологіях виробництва технічної кераміки, композиційних і

функціонально-градієнтних матеріалів.

Для досягнення зазначеної мети необхідно було вирішити такі *завдання*:

- вивчити математичні моделі, що описують нестационарну теплопровідність щільних тіл в умовах високоінтенсивного нагріву, включаючи нагрів в мікрохвильовому полі;
- провести аналіз існуючих моделей, складених на основі гіперболічного рівняння теплопровідності і оцінити їх придатність для розрахунку високоінтенсивних процесів виробництва, зокрема, кераміки;
- оцінити внесок релаксаційних явищ у процеси, інтенсивність яких обмежена вимогами виробництва кераміки;
- одержати залежність для розрахунків локальних температур при мікрохвильовому нагріванні напівобмеженого масиву для граничних умов III роду;
- провести обчислювальний експеримент по отриманій залежності з метою її верифікації;
- провести експериментальні дослідження процесів нагріву в мікрохвильовому полі порошкових матеріалів, глинистих і пластичних мас, застосовуваних при виробництві технічної кераміки, і встановить можливості аналітичних розрахунків температурного поля в матеріалі;
- визначити умови забезпечення рівномірності нагріву при спіканні керамічних виробів у мікрохвильовому полі;
- оцінити економічну ефективність застосування в промисловості мікрохвильового нагріву заготовок при виробництві технічної кераміки.

**Об'єкт дослідження** – процеси переносу теплоти і маси при нагріванні щільних матеріалів з високою інтенсивністю.

**Предмет дослідження** – основні теплові характеристики нагріву щільних тіл з високою інтенсивністю, зокрема, в умовах мікрохвильового нагріву, такі як температурне поле та кількість переданої теплоти, а також фізичні властивості матеріалів, що становлять основу для виробництва технічної кераміки.

**Методи дослідження** – математичні методи дослідження теплового стану тіл при нестационарній теплопровідності; експериментальні методи дослідження процесів переносу теплоти та маси при дії внутрішніх джерел теплоти; теоретичні методи дослідження взаємодії мікрохвильового поля з матеріалом, що базуються на основних положеннях тепломасопереносу та поширення електромагнітних хвиль; методи статистичного та кореляційного аналізу експериментальних даних, фізико-математичного моделювання процесів взаємодії матеріалів з мікрохвильовим електромагнітним полем, методи обчислювальної математики та програмування з використанням пакета прикладних програм "MAPLE-XV", "Origin-6".

**Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше встановлено, що при побудові математичних моделей нагріву матеріалу в технологіях виробництва технічної кераміки раціонально застосовувати рівняння теплопровідності параболічного типу.

2. Вперше отримані дані по швидкості нагріву в мікрохвильовому полі зразків для виробництва технічної кераміки на основі порошків карбїду кремнію і оксиду алюмінію зі в'язучими - полівініловий спирт і лігносульфонат технічний.

3. Вперше встановлено, що продукти терморозпаду лігносульфонату технічного, що утворюються на поверхні зразка при його нагріванні в мікрохвильовому полі, сприяють інтенсифікації його нагріву.

4. Вперше отримана залежність для розрахунків швидкості сушіння глини в мікрохвильовому полі для періоду постійної швидкості сушіння.

5. Вперше для сполученого процесу тепло- і вологопереносу при мікрохвильовому нагріву запропонований метод розрахунків температури матеріалу за отриманими аналітичними залежностями для нестационарного теплообміну при дії внутрішнього джерела теплоти шляхом урахування в значенні позитивного джерела теплоти складової, обумовленою енергією випару вологи з матеріалу.

**Наукове значення роботи.** Визначені умови застосовності гіперболічного та параболічного рівняння теплопровідності для складання математичних моделей нагріву високої інтенсивності. Аналітична залежність, отримана на основі рівняння теплопровідності із внутрішніми джерелами теплоти в умовах теплообміну з навколишнім середовищем, дозволяє розрахувати температурне поле напівобмеженого масиву в мікрохвильовому полі. Аналітичне дослідження процесів теплопровідності при високоінтенсивному нагріванні щільних тіл, зокрема, глинистих і пластичних матеріалів, дозволяє оцінити вплив основних фізичних параметрів матеріалу на тепловий стан тіла.

**Практичне значення отриманих результатів.** Покриття поверхні заготовки матеріалом з високою здатністю поглинання електромагнітної енергії дозволяє розв'язати актуальну проблему забезпечення однорідності температурного поля при мікрохвильовому нагріванні, що дозволить поліпшити якість виробу за рахунок об'ємного і рівномірного характеру нагріву та підвищити енергетичні показники технологічних процесів. Застосування мікрохвильового нагріву відкриває можливість розробки принципово нових високоінтенсивних технологій виготовлення перспективних керамічних, композиційних і функціонально-градієнтних матеріалів.

**Особистий внесок здобувача.** Усі положення, що виносяться на захист, отримані особисто здобувачем. У роботах, виконаних разом із іншими дослідниками, здобувачеві належить формулювання, розвиток і перевірка гіпотез щодо математичного моделювання високоінтенсивних процесів теплопровідності при виробництві технічної кераміки, розробка методик експериментальних досліджень, визначення доцільних матеріалів для дослідження та аналіз технологічного процесу виробництва, а також аналіз існуючих в'язучих і обґрунтування їх застосування. Здобувачем виконаний аналіз і узагальнення експериментальних даних, проведено зіставлення емпіричних і аналітичних даних і зроблений ряд важливих висновків щодо умов застосування отриманих у роботі аналітичних залежностей для одержання достовірних даних у тепловому стані тіла при його нагріванні в мікрохвильовому електромагнітному полі.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи були представлені та обговорені на конференціях і семінарах: VII міжнародній науково-технічній конференції "Казахстан – Холод 2017". – Алмати, 2017; II міжнародній науково-практичній конференції: "Наука і сучасність: виклики глобалізації" (Київ,

2016), Міжнародній конференції “ENERGY OF MOLDOVA – 2016. REGIONAL ASPECTS OF DEVELOPMENT” (Кишинів, 2016), XV міжнародній заочній науково-практичній конференції "Розвиток науки в XXI столітті" (Харків, 2016), Всеукраїнській науково-технічній конференції "Актуальні проблеми енергетики й екології" (Київ, 2016), VII Міжнародній науково-технічній конференції "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці" (Миколаїв, 2016), XVI Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології» (ОНАХТ, 5-7 жовтня 2016 року, м. Одеса; Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених і студентів "Еколого-енергетичні проблеми сучасності" (ОНАХТ, Одеса, 2015).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, списку літератури з 158 найменувань і додатків. Робота викладена на 140 сторінках основної частини, включаючи 59 рисунків і 16 таблиць.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** наведена загальна характеристика роботи, яка включає обґрунтування актуальності обраної теми, мету і завдання досліджень, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, публікації здобувача за темою роботи, а також основні положення, які виносяться на захист.

**У першому розділі** аналізуються методи математичного моделювання високоінтенсивних процесів теплопровідності і вивчається можливість визначення граничної швидкості нагріву, до якої немає необхідності враховувати в рівняннях тепломасопереносу кінцеву швидкість поширення тепла і справедливо параболічне рівняння теплопровідності. Встановлено, що для дисперсних систем, зокрема матеріалів для виробництва технічної кераміки, розміри часток у яких набагато менше розмірів самої системи, можна застосовувати залежності, що описують теплопровідність щільних середовищ, ввівши при цьому ефективні значення коефіцієнтів теплопровідності та температуропровідності, що характеризують шар як квазігомогенне середовище (З.Р. Горбис, В.А. Календерьян, Fricke J., Schwab H.).

Аналізується метод нагріву матеріалів у мікрохвильовому полі, проводиться оцінка умов інтенсифікації процесу для якісного поліпшення технологій обробки, в основі яких лежить об'ємний характер перетворення мікрохвильової енергії у внутрішню енергію тіла (Г.С. Сапрунов, Б.А. Демьянчук, Ch. Anindita) і виникнення нетеплових ефектів (К.І. Рібаков). Узагальнені дані з побудови математичних моделей для високоінтенсивних процесів поширення теплоти. Ще в XIX столітті Г.Ф.Б Риманом було відзначено, що конкретному виду ізотермічної поверхні відповідає певний диференційний оператор теплопровідності, та оператор параболічного типу є окремим випадком, і спроба з параболічного оператора одержати невласиві йому температурні поля за рахунок початкових і граничних умов привела до проблеми парадоксів і некоректних завдань.

В сучасних технологіях, які зв'язані, з однієї сторони, з наднизькими температурами, а з іншої – з високими температурами та швидкостями нагріву, лінійний зв'язок між тепловим потоком і градієнтом температур може порушуватися, що враховується при відповідних дослідженнях (К.Б. Ісаєв,

М. J. Maurer, Н. А. Thompson). Високоінтенсивні процеси поширення теплоти підкоряються рівнянню теплопровідності гіперболічного типу, диференціальна форма якого представлена А.В. Ликовим, та аналізується А.Г. Шашковим, В.А. Бубновим, С.А. Яновським. Встановлено, що при моделюванні високоінтенсивних процесів нагріву щільних і квазігомогенних тіл існує проблема, пов'язана з невизначеністю припущень, прийнятих при формулюванні диференціального рівняння теплопровідності.

У другому розділі представлені результати аналітичного дослідження процесів нестационарної теплопровідності високої інтенсивності. Дослідження теплового стану тіла з урахуванням кінцевої швидкості поширення теплоти проведено з використанням залежностей А.В. Кудінова, отриманих на основі гіперболічного рівняння теплопровідності за симетричними граничними умовами першого роду для щільного тіла, теплофізичні і електрофізичні властивості якого відповідають властивостям композиційного матеріалу, застосовуваного для виробництва технічної кераміки. На рис. 1 наведено графік зміни надлишкової температури тіла при різних значеннях числа  $Fo$ . Приймалися наступні позначення:

релаксаційне число Фур'є  $Fo_r = \frac{a \cdot \tau_r}{\delta^2}$ , відносна координата  $\xi = \frac{x}{\delta}$ . Розрахунки

проводилися при наступних умовах:  $Fo_r = 2,78 \cdot 10^{-11}$ ,  $\delta = 0,06$  м. При зміні  $Fo$  у діапазоні  $10^{-3} - 10^{-4}$  спостерігається значний ріст температури поблизу границі тіла, далі температурна крива починає згладжуватися, при цьому вид кривих відповідає кривим, що одержані за відомими залежностями, в основі яких лежить диференціальне рівняння теплопровідності параболічного типу. Тепловий фронт при  $Fo = 2,78 \cdot 10^{-4}$  обмежується безрозмірною координатою  $\xi = 0,97$ , при  $Fo = 2,78 \cdot 10^{-3}$  координата змістилася до значення  $\xi = 0,92$ .

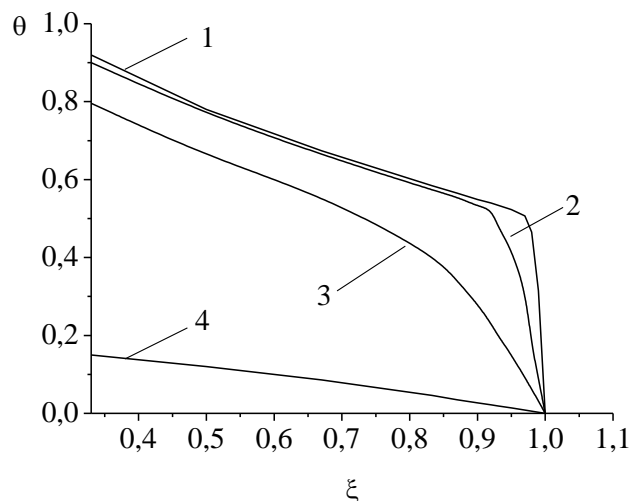


Рис. 1. Зміна надлишкової температури тіла  $\Theta$  по безрозмірній координаті  $\xi$  при різних значеннях числа Фур'є:

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

Рівняння теплопровідності гіперболічного типу дозволяють розв'язати проблему малих чисел Фур'є. На малих числах Фур'є прогрів (охолодження) тіла

визначається рухом фронту ударної теплової хвилі, на якому відбувається різка зміна температур. Характер зміни розрахункових температур у розглянутих умовах подібний до кривих, одержуваних при використанні наближених методів розв'язку завдань теплопровідності, заснованих на параболічному рівнянні (А.І. Вейник). При цьому процес нагріву (охолодження) тіла розділяють на дві стадії: в першій теплота проникає з поверхні вглиб тіла, температура змінюється тільки в прогрітій (охолодженій) зоні, товщина якої збільшується з часом; у другій стадії температура змінюється по всьому об'єму (товщині) тіла. Зіставлення результатів розрахунків привело до припущення, що при моделюванні високоінтенсивних процесів в існуючих технологіях, немає необхідності застосування гіперболічного рівняння теплопровідності. Для відповіді на запитання, яка гранична швидкість нагріву, при якій ще справедливо параболічне рівняння теплопровідності і немає необхідності враховувати кінцеву швидкість поширення теплоти, проведені розрахунки при завданні надвисоких температур поверхні матеріалу: от 3000 °С до 4000 °С (наприклад, при спіканні технічної кераміки температура не перевищує 1600 °С). Отримано, що швидкість нагріву в цих умовах становить 2,6 К/с – 3,8К/с. У той же час, приміром, для глинистих матеріалів гранична швидкість нагріву, отримана по залежності К.В. Ісаєва при часі релаксації  $\tau_r=10$  мс (для матеріалу з перевагою каолініту), становила  $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_{\max} = 13185$  К/с, для інших матеріалів, що використовуються при виробництві технічної кераміки, наприклад,  $Al_2O_3$  і  $SiC$ , гранична швидкість буде значно вище та досягати  $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_{\max} \cong 10^{12}$  К/с.

Таким чином, при моделюванні температурного поля в процесах спікання кераміки існує обґрунтована припустимість застосування рівнянь теплопровідності параболічного типу.

З метою оцінки впливу фізичних і геометричних параметрів процесу нагріву в різних режимах, у тому числі високоінтенсивних, в умовах дії мікрохвильового поля з урахуванням теплообміну з навколишнім середовищем, складена математична модель нестационарної теплопровідності на основі параболічного рівняння з внутрішніми джерелами теплоти. Шар матеріалу розглядається як напівобмежений масив з тепловою ізоляцією бічної поверхні при початковій температурі  $t_0$ . Діє позитивне джерело тепла, обумовлене дією мікрохвильового поля з питомою потужністю  $q_v$ , Вт/ м<sup>3</sup>. Прийнято граничну умову третього роду. Математична модель в диференційному вигляді включає рівняння теплопровідності:

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

Граничні і початкові умови:

$$t(x, 0) = t_0 \quad (2)$$

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

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

де  $t$  – температура,  $x$  – поточна координата,  $\tau$  – час,  $a$ ,  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  – відповідно коефіцієнти температуропровідності та теплопровідності, питома теплоємність і щільність матеріалу;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $q_v$  – позитивне джерело теплоти.

Прийнято, що джерела тепла є експоненціальною функцією координати:  $q_v = q_{v0} \cdot e^{-\gamma \cdot x}$ , де  $q_{v0}$  – максимальна питома потужність позитивного джерела, Вт/м<sup>3</sup>,  $\gamma$  – коефіцієнт послаблення електромагнітної енергії в шарі, м<sup>-1</sup>. Застосувавши метод інтегрального перетворення Лапласа, отримана наступна залежність для розрахунку локальних температур в шарі матеріалу:

$$\begin{aligned} T(x, \tau) = & \left( \frac{T_{\text{в03д}} - T_0}{\lambda / \gamma} + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a} \right) \cdot \left( -\frac{\lambda}{\alpha} \cdot \operatorname{Erfc} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) + \frac{\lambda}{\alpha} \cdot e^{-\frac{\gamma}{\lambda} \cdot \sqrt{a} \cdot \left( -\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a} \cdot \tau + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \right. \\ & \cdot \operatorname{Erfc} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a} \cdot \tau \right) \left. \right) + \frac{q_{v0} \cdot (\alpha - \lambda \cdot \gamma)}{c \cdot \rho \cdot a} \cdot \frac{1}{2 \cdot \gamma^2 \cdot \lambda} \cdot \left\{ \frac{1}{\gamma - \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \left( -\operatorname{Erfc} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) + e^{-\gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \left( -\gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \tau + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \right) \right. \\ & \cdot \operatorname{Erfc} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \tau \right) + \frac{1}{\gamma \cdot \left( \gamma + \frac{\alpha}{\lambda} \right)} \cdot \left( \operatorname{Erfc} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) + e^{\gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \left( \gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \tau + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \cdot \operatorname{Erfc} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} + \gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \tau \right) \right) \left. \right\} + \\ & + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a \cdot \gamma^2} \cdot \left( e^{a \cdot \gamma^2 \cdot \tau} - 1 \right) \cdot e^{-\gamma \cdot x} + T_0 \end{aligned} \quad (5)$$

Залежність (5) дозволяє розрахувати температуру напівобмеженого масиву при різних геометричних і фізичних умовах, середовища і матеріалу.

Аналітичне дослідження температурного поля напівобмеженого масиву проводилося при варіюванні наступних визначальних характеристик: коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$ , коефіцієнта поглинання електромагнітної енергії  $\gamma$ , товщини шару  $x$ , початкової температури матеріалу  $t_0$  і температури навколишнього середовища  $t_a$ . Верифікація залежності проведена на прикладі матеріалу, застосовуваного для виробництва кераміки. Характер зміни температури матеріалу в часі представлений на рис. 2а: залежність відображає той факт, що при збільшенні тривалості знаходження матеріалу у МХ полі температура зростає по статичному закону. На рис. 2б наведені результати розрахунків температури при різних значеннях коефіцієнта тепловіддачі. Коефіцієнт тепловіддачі суттєво впливає на температуру матеріалу в шарах, близьких до поверхні (рис. 2б). Низькі значення  $\alpha$  приводять до того, що в шарах, близьких до поверхні, у яких загасання електромагнітної енергії незначно, температура суттєво зростає.

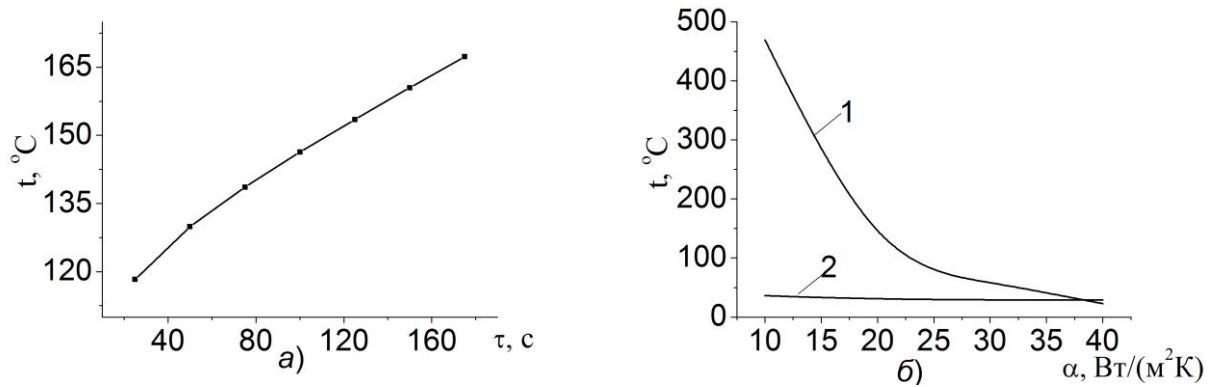


Рис. 2. Температура щільного шару матеріалу при мікрохвильовому нагріванні.  $\tau=100$  с,  $q_{v0}=3 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>3</sup>,  $\gamma=35$  м<sup>-1</sup>,  $t_0=20$  °C,  $t_a=20$  °C,  $a=8,9 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. *a* – зміна температури  $t$  у часі  $\tau$ ,  $x=0,001$  м,  $\alpha=20$  Вт/(м<sup>2</sup>К); *б* – вплив коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  на температуру матеріалу  $t$ . 1 -  $x=0,01$  м, 2 -  $x=0,021$  м

Коефіцієнт поглинання  $\gamma$  впливає на температуру матеріалу та на рівномірність його нагріву. Розрахунок свідчить, що в безпосередній близькості від поверхні при значеннях  $\gamma \leq 50$  м<sup>-1</sup> температура матеріалу росте зі збільшенням  $\gamma$ . При  $\gamma > 50$  м<sup>-1</sup> спостерігається спад температури. На більшій глибині масиву збільшення  $\gamma$  приводить до монотонного зниження температури. Дослідження впливу питомої потужності внутрішніх джерел теплоти на температуру матеріалу засвідчило, що збільшення  $q_v$  у три рази, від  $2 \cdot 10^5$  до  $6 \cdot 10^5$ , призвело до збільшення температури (для контрольного інтервалу часу  $\tau=100$  с) в 2,4 рази. Аналіз результатів розрахунків дозволяє зробити висновок, що отримана аналітична залежність (5) якісно вірно відбиває вплив визначальних фізичних величин на температуру матеріалу при дії позитивних внутрішніх джерел теплоти, зокрема, від мікрохвильового електромагнітного поля.

У **третьому розділі** наведені результати експериментального дослідження нагріву в мікрохвильовому полі заготовок з порошків, що використовуються при виробництві технічної кераміки. Доцільність досліджень визначається необхідністю інтенсифікувати процес спікання, в якому найбільш енергоємною стадією є нагрівання, і потребою зниження енергетичних витрат у цілому, що можливо при застосуванні мікрохвильової обробки завдяки високошвидкісному нагріванню, можливості зниження температури спікання до 200 °C (R. Lukas) і нетепловим ефектам перетворення мікрохвильової енергії у внутрішню енергію тіла (К.І. Рибаків). Одне з головних завдань дослідження була оцінка рівномірності нагріву зразків у мікрохвильовій камері та визначення умов і способів підвищення рівномірності нагріву в мікрохвильовому полі. У дослідженнях застосовувалася фракція Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> F800 (розмір часток 10-7 мкм) і фракції SiC F100 (розмір часток 150-125 мкм), F240 (розмір часток 50-40 мкм), F600 (розмір часток 14-10 мкм), F1200 (розмір часток 3 мкм). У якості в'язучого матеріалу використовувались полівініловий спирт (ПВС) і лігносульфонат технічний (ЛСТ). Всі вимірювання, проведені в умовах відкритої поверхні зразків при мікрохвильовому нагріванні, показали нерівномірність розподілу температури за об'ємом. На рис. 3 як приклад наведені температурні криві, отримані при нагріванні пластини порошку карбиду

кремнію зі в'язучим ПВС. Товщина пластини  $\delta = 1,0$  см, розмір часток 125 мкм. Потужність внутрішніх джерел теплоти  $q_v = 9,7 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>3</sup>.

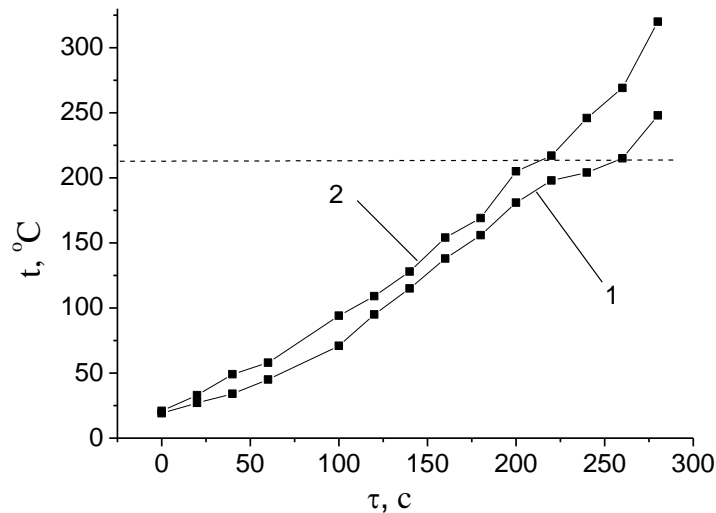


Рис. 3. Нагрів пластинки з порошку карбиду кремнію у МХ полі.  
Вихідна потужність магнетрона  $P = 800$  Вт,  $m = 165$  г.  
1 – поверхня, 2 – основа.

Нагрів композиційного порошку на основі оксиду алюмінію привів до висновку, що темп нагріву матеріалу з додаванням 10 % ЛСТ збільшується після температури вище  $150$  °С (рис. 4, криві 1, 2). Це пов'язано з розкладанням лігносульфонату, внаслідок чого продукти терморозпаду, які починають утворюватися при температурі вище  $130$  °С, інтенсивно поглинають мікрохвильову енергію і ізолюють поверхню від навколишнього середовища. Нагрів в мікрохвильовому полі  $Al_2O_3 + 5\% SiC$  дозволяє досягти темпу нагріву, одержуваного при високоефективному електроімпульсному плазмовому спіканні  $1,7$  К/с і перевищити його. Темп нагріву досягав величини  $3,2$  К/с. Однак такий інтенсивний характер нагріву спостерігався для маси  $20$  г і  $50$  г і при додаванні в'язучого в суміш порошків. При цьому питома потужність внутрішніх джерел теплоти перебувала в інтервалі  $q_v = 2,88 \cdot 10^7 - 7,2 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>3</sup>. Без в'язучого темп нагріву становив  $0,226$  К/с. У чистому виді оксид алюмінію  $Al_2O_3$  у мікрохвильовому полі не нагрівається (здатність поглинати мікрохвильове випромінювання  $Al_2O_3$  з'являється на рівні температур  $1100-1200$  °С).

Дослідження ефективності нагріву у мікрохвильовому полі порошків карбиду кремнію і оксиду алюмінію демонструє істотну нерівномірність розподілу температури за об'ємом матеріалу. Окремою серією експериментів було дослідження мікрохвильового нагріву порошків різної дисперсності без в'язучого, що дозволило виявити вплив розміру часток на формування температурного поля. Незважаючи на малу масу зразків ( $3 - 5$  г), спостерігалася істотна нерівномірність розподілу температури. Також встановлено, що рівномірність нагріву підвищується зі збільшенням дисперсності. Температура центру для досліджуваних матеріалів була вище температури їх краю на  $35\%$  для  $Al_2O_3$  і для  $SiC$  на  $15\%$  (при розмірі

часток 3 мкм) – 32 % ( при розмірі часток 125 мкм), відстань між точками заміру – 1,75 см.

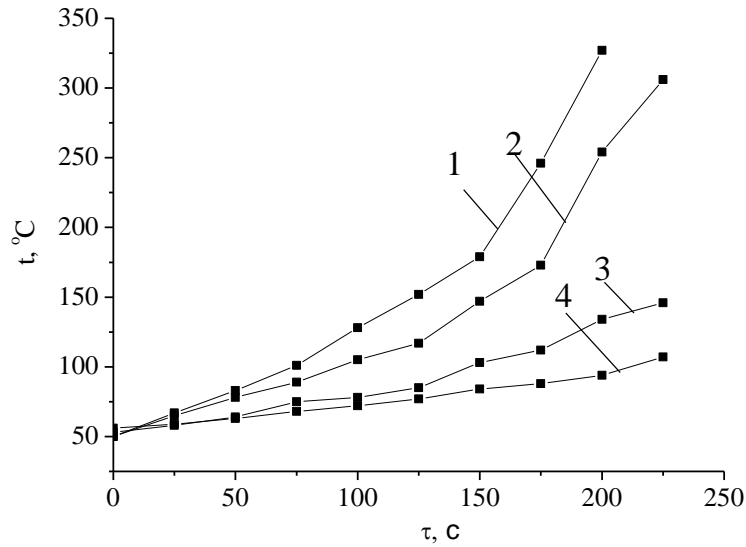


Рис. 4. Нагрів композиційного порошку на основі оксиду алюмінію ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5$  об.% SiC) із застосуванням в'язучого 10 % ЛСТ у МХ полі. 1 – маса зразка 20 г, 2 – маса зразка 50 г, 3 – маса зразка 70 г, 4 – маса зразка 20 г, без в'язучого. Вихідна потужність магнетрона 800 Вт.

Температура центру зразків різних фракцій порошку SiC при їх нагріванні в мікрохвильовому полі наведені на рис. 5. Експерименти проводилися з водяним еквівалентом, тобто додатковим водяним навантаженням для поглинання надлишкової мікрохвильової енергії при малих обсягах завантаження робочої камери.

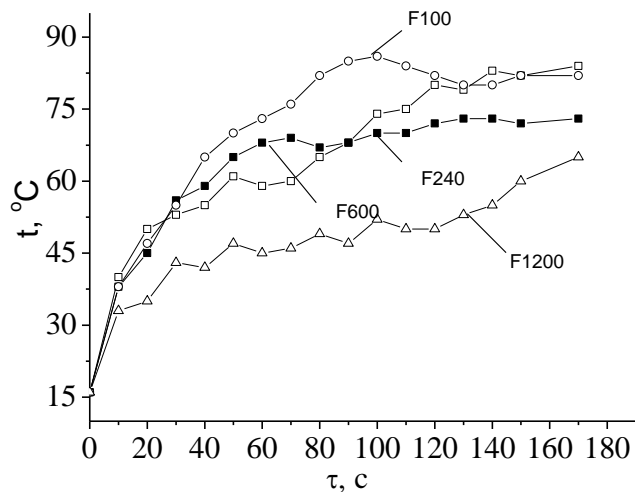


Рис. 5. Температура зразків різних фракцій порошку SiC при їх нагріванні в мікрохвильовому полі. Вихідна потужність магнетрона  $P=800$  Вт. Водяний еквівалент  $V=200$  мл.

Один з підходів до створення функціонально-градієнтних матеріалів ФГМ заснований на спіканні метало-діелектричних порошкових сумішей з мінливою композицією. У рамках даної роботи досліджувалося одержання металокерамічних композицій  $Al_2O_3-Fe$ , пластик-Fe в умовах мікрохвильового нагріву. Отримано, що при мікрохвильовому нагріванні  $Al_2O_3$  можна профілювати поле температур додаванням різної кількості порошку заліза (рис. 6). Зміст порошку заліза монотонно зменшувався от координати  $x=0$  (100 %) до координати  $x=0,1$  м (0 %).

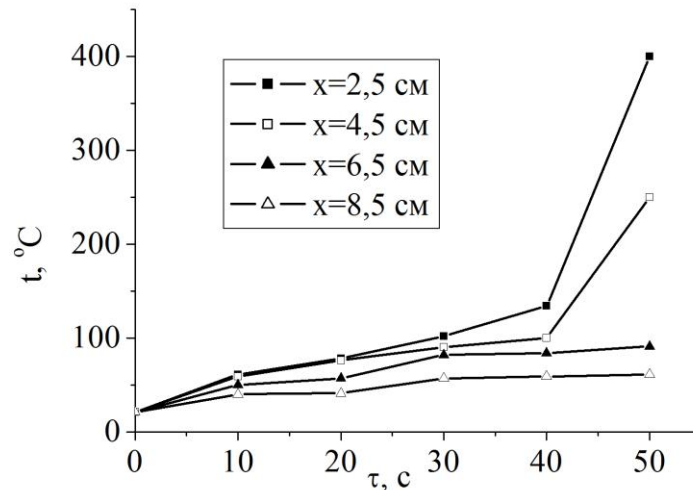


Рис. 6. Нагрів суміші порошоків заліза та оксиду алюмінію із градієнтним розподілом порошку заліза по довжині зразка. Вихідна потужність магнетрона  $P=800$  Вт. Маса  $Al_2O_3$   $m=30$  г, маса порошку заліза  $m=50$  г.

Перспективи застосування мікрохвильового поля для спікання функціонально-градієнтних матеріалів визначаються композиційною селективністю мікрохвильового нагріву, що дозволяє отримувати розподіли температури, які сприяють зменшенню термічних напружень.

Застосування порошку заліза також дозволило знизити температурну нерівномірність між центром і краєм зразка, а обмуровування зразка поглинаючим матеріалом на основі сажі сприяла ще більшому вирівнюванню температури (рис.7).

Результати зіставлення експериментальних і розрахункових даних по залежності (5) показали, що практично повний збіг результатів (табл. 1) досягається за умови зміни  $\gamma_0$  в часі, тобто зі зміною температури матеріалу. Можна зробити висновок, що при збільшенні температури значення  $\gamma_0$  зменшується. Для розрахунків  $q_v$  приймалися розміри зразка:  $0,15 \times 0,045 \times 0,01$  м, ККД камери –  $\eta=0,27$ ,  $q_v=3,0 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>3</sup>. Властивості суміші порошоків:  $\lambda=0,17$  Вт/мК,  $\rho=2200$  кг/м<sup>3</sup>,  $a=7,75 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с. Приймали:  $\alpha=20$  Вт/м<sup>2</sup>К,  $x=0,001$  м,  $t_a=21^\circ\text{C}$ ,  $t_0=21^\circ\text{C}$ . При оцінці величини  $\gamma_0$  експериментальне значення температури  $t_0^{\text{експ}}$  ставилося у відповідності розрахунковому  $t_0^{\text{теор}}$ .

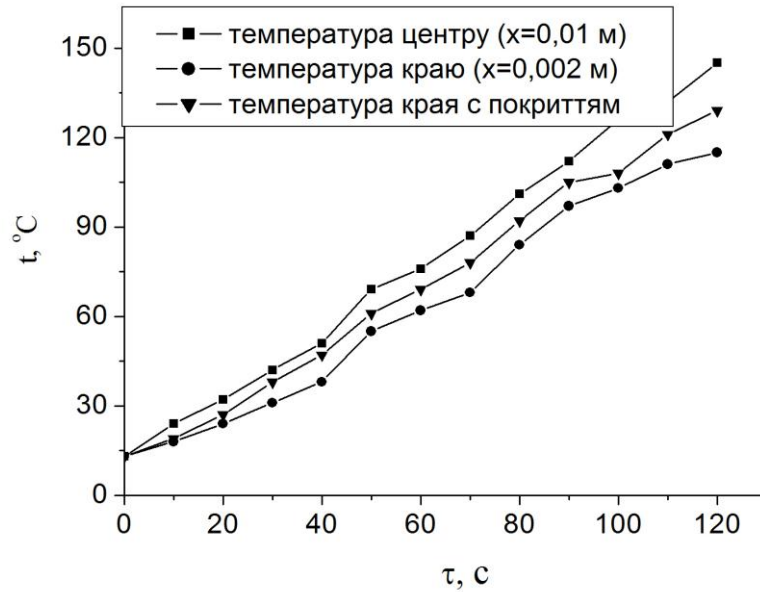


Рис. 7. Температура краю ( $x=0,002$  м) і центру зразка ( $x=0,01$  м)  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 20\%$  порошка заліза при мікрохвильовому нагріванні. Маса зразка  $m=70$  г. Вихідна потужність магнетрона  $P=800$  Вт. Водяний еквівалент  $V=200$  мл.

Таблиця 1

Оцінка значення коефіцієнта поглинання  $\gamma_0$  по відповідності експериментальним значенням температури  $t_0^{\text{експ}}$  розрахунковим  $t_0^{\text{теор}}$

№	$\tau, \text{с}$	$t_0^{\text{експ}}, \text{°C}$	$t_0^{\text{теор}}, \text{°C}$	$\gamma_0, \text{M}^{-1}$	№	$\tau, \text{с}$	$t_0^{\text{експ}}, \text{°C}$	$t_0^{\text{теор}}, \text{°C}$	$\gamma_0, \text{M}^{-1}$
1	0	21	21	5,7	7	30	102	98,5	5,5
2	5	43	48,3	5,7	8	35	117	114,0	5,3
3	10	61	65,6	5,7	9	40	134	133,4	5,1
4	15	70	74,8	5,7	10	45	200	208,0	4,5
5	20	78	80,0	5,7	11	50	400	413,0	3,7
6	25	91	89,6	5,6					

Оцінка енергетичної ефективності мікрохвильової технології спікання була проведена на прикладі виробництва керамічних підкладок на основі даних за технологічними параметрами традиційного спікання в печі фірми MARUWA і за отриманими експериментально швидкостями мікрохвильового нагріву і тривалості спікання у МХ полі. Порівняльна характеристика кінетики спікання для традиційного нагріву і мікрохвильового схематично зображена на рис. 8. Тривалість витримки керамічних підкладок у муфельній печі становила 326,3 хв., у мікрохвильовій камері – 82,2 хв. Таким чином, інтенсивність процесу збільшилася в 4 рази. Витрати енергії при переході на МХ технологію скоротяться в 1,6 рази, або енергоефективність буде виражена в економії 37% електроенергії під час переходу на мікрохвильовий нагрів. У розрахунках був врахований час нагріву та витримки виробів, тобто 266,3 хв. для муфельної печі та 73,5 хв. для мікрохвильової камери.

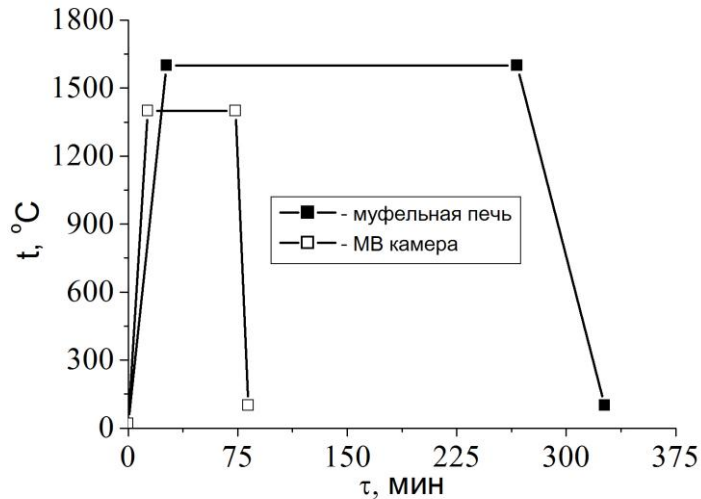


Рис. 8. Тепловий режим спікання керамічних підкладок при традиційному й мікрохвильовому нагріванні.

У четвертому розділі наведені результати експериментального вивчення ефективності впливу МХ поля при виробництві керамічних виробів із глини. На рис.9 представлені результати, отримані при мікрохвильовій обробці глиняної пластини товщиною 7 мм, масою 60 г і початковим вологовмістом 46%, вихідна потужність магнетрона  $P=240$  Вт. Середній темп нагріву матеріалу становив  $1,03$  К/с. При цьому не спостерігалось утворення тріщин і деформації зразка. Це пов'язане з безперервним зволоженням поверхні вологою, яка під дією МВ поля виходила до поверхні, завдяки чому поверхня не пересихала і не виникали механічні напруги. Найвища швидкість нагріву була в періоді (0 – 30) с і становила  $\frac{\Delta t}{\tau} = 2,07$  К/с, потім температура падає внаслідок випару вологи, після чого знову починає зростати. Після 120 с темп нагріву знижується, а після 150 с температура зразка починає падати. На цій же ділянці випаровування вологи припинилося. Результати експериментів представлені на рис. 9. Відсутність нагріву можна пояснити зниженням діелектричних характеристик матеріалу - тангенса кута втрат і діелектричної проникності, внаслідок чого кількість мікрохвильової енергії, перетвореної матеріалом у внутрішню енергію, різко знижується і зразок починає охолоджуватися, не сприймаючи падаючу на нього енергію мікрохвильового поля. Таким чином, мікрохвильовий нагрів слід здійснювати тільки на етапі сушіння глиняних виробів, а надалі спікання проводити із використанням традиційних методів. Графік (рис. 9) показує, що нагрів проходить інтенсивно, однак нерівномірно в часі, внаслідок чого внутрішня структура матеріалу була недостатньо щільною, відзначалася крихкість матеріалу. У зв'язку з цим були підібрані режими, при яких забезпечується рівномірність нагріву в часі. Приклад такого режиму для досліджуваної форми наведений у табл. 2. Експеримент проведений при вихідній потужності магнетрона  $P=180$  Вт із додатковим водяним навантаженням об'ємом 200 мл. Темп нагріву при цьому режимі в середньому становив  $0,125$  К/с, швидкість сушіння  $N=1,25 \cdot 10^{-5}$  кг/с. Таким чином, сушіння в

мікрохвильовому полі зразків із глини не повинне бути високоінтенсивним, проте, швидкість сушіння набагато вище в порівнянні із традиційною технологією.

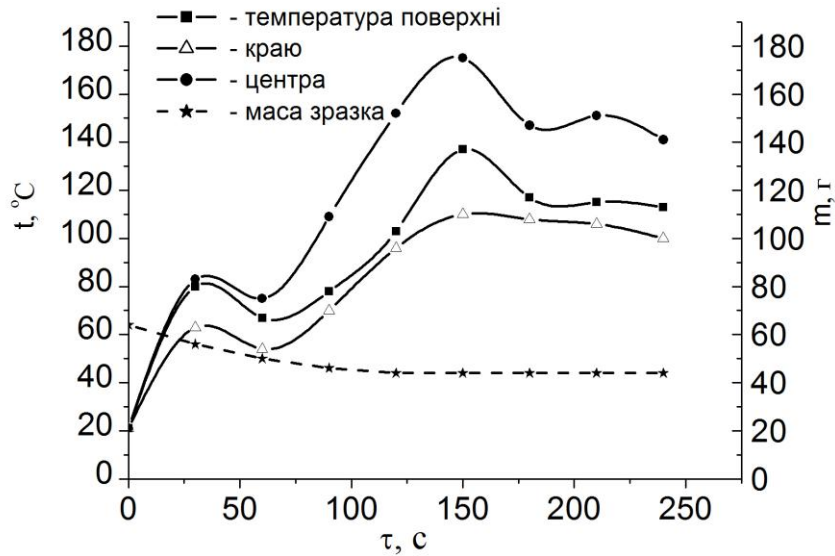


Рис. 9. Зміна температури і маси зразка (глина) при мікрохвильовому нагріванні. Вихідна потужність магнетрона P=80 Вт.

Таблиця 2

Нагрів глиняної пластини у МХ полі. Вихідна потужність магнетрона 180 Вт.  
Водяний еквівалент 200 мл

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$\tau, \text{с}$	0	30	60	90	120	150	180	210	240
$t_{\text{пов.}}, \text{°C}$	21	24	29	32	39	45	49	54	58
$t_{\text{цен.}}, \text{°C}$	21	26	31	37	42	48	52	57	61
$t_{\text{кр.}}, \text{°C}$	21	24	28	29	38	43	47	51	55
$m, \text{кг}$	0,065	0,064	0,064	0,064	0,063	0,062	0,060	0,059	0,059

На підставі теплових розрахунків процесів сушіння глиняних зразків при різних масах завантаження отримана емпірична залежність для розрахунків ККД мікрохвильової камери:

$$\eta_k = 0,72 \left( 1 - e^{-203 \cdot (V_{\text{обр}}/V_k)} \right) \cdot \left( \frac{u}{0,46} \right)^{-0,35} \quad (6)$$

Залежність може бути застосована для маси глиняного зразка від 0,06 кг до 0,9 кг, при товщині шару  $7 < l < 30$  мм і зміні відносного об'єму  $V_{\text{обр}}/V_k$  от 0,003 до 0,09.

Для одержання інформації про розподіл температур у глині при сушінні можна застосовувати залежність (5), урахувавши зниження потужності позитивного джерела теплоти за рахунок випару вологи:  $q_{v1} = q_{v0} - \rho \cdot N \cdot r$ , де  $N$  – швидкість сушіння,  $\rho$  – щільність матеріалу,  $r$  – питома теплота випару води. Для глини на підставі узагальнення експериментальних даних для швидкості сушіння в першому періоді отримана наступна залежність:

$$N = 5,23 \cdot 10^{-3} (q_m)^{0,214} \cdot (\delta / \delta_0)^{1,16}, \quad (7)$$

де  $\delta$  – початкова товщина шару,  $\delta_0$  – реперне значення, прийняте при виведенні цієї залежності  $\delta_0 = 7 \cdot 10^{-3}$  г. Значення питомого теплового потоку  $q_m$  (розраховуючи на кілограм маси матеріалу) визначалося з урахуванням ККД мікрохвильової камери, який при масі  $m = 0,065$  кг і для початкового вологовмісту  $u = 0,455$  відповідав  $\eta = 0,26$ . Емпірична залежність описує дані з відносною похибкою 17 % для діапазону зміни товщини шару  $0,005 \leq \delta \leq 0,03$  м і при  $q_m \leq 11 \cdot 10^3$  Вт/кг. Більші значення питомої потужності приводили до виникнення нестійкого режиму, який виражався в коливальному характері зміни маси і температури матеріалу.

## ВИСНОВКИ

1. Математичні моделі, які описують нестационарну теплопровідність щільних тіл в умовах високоінтенсивного нагріву, включаючи нагрів в мікрохвильовому полі, ґрунтуються на рівняннях параболічного та гіперболічного типу. Залежності для розрахунків температури щільного шару матеріалу як результат розв'язку рівняння теплопровідності гіперболічного типу дозволяють одержувати інформацію щодо теплового стану тіла при як завгодно малих числах  $Fo$ .

2. Встановлено, що швидкість нагріву у високоінтенсивних технологіях виробництва кераміки не перевищує 2 К/с, що значно нижче граничної швидкості, за якою допущення в нескінченній швидкості поширення теплоти не може бути прийняте. Гранична швидкість нагріву для глини з перевагою каолініту становить  $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_{\max} \cong 13185$  К/с.

3. Залежність для розрахунків локальних температур, отримана для напівобмеженого масиву на основі розв'язку рівняння теплопровідності параболічного типу з урахуванням дії внутрішніх джерел теплоти при ГУ III роду, якісно вірно відображає вплив визначальних фізичних величин на температуру матеріалу при дії позитивних внутрішніх джерел теплоти, зокрема, від мікрохвильового електромагнітного поля.

4. Нагрів в мікрохвильовому полі  $Al_2O_3 + 5\% SiC$  зі в'язучим ЛСТ дозволяє досягти швидкості 3,2 К/с при питомій потужності внутрішніх джерел теплоти від  $q_v = 2,88 \cdot 10^7$  до  $q_v = 7,2 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>3</sup>.

5. При мікрохвильовому нагріванні незалежно від розміру зразків виникає нерівномірність розподілу температури по товщині і поздовжній координаті. Зміна температури по товщині для пластини карбиду кремнію при  $\delta = 10$  мм досягає 27 %. Відмінність по температурі центру і краю (відстань 1,75 см) зразків масою до 5 г досягає 32 %.

6. Рівномірність нагріву в мікрохвильовій камері досягається при покритті поверхні матеріалу сажею, яка ефективно поглинає мікрохвильове випромінювання, а також завдяки виходу до поверхні продуктів термічного розпаду в'язучої

речовини лігносульфонату технічного.

7. Аналітичні розрахунки температури матеріалу (композиційний порошок  $Al_2O_3 + 20\% Fe$ ) при нагріванні у мікрохвильовому полі демонструє високу збіжність із результатами експериментальних досліджень при обліку залежності коефіцієнта поглинання  $\gamma$  від температури матеріалу.

8. При аналітичних розрахунках температури за отриманою у роботі залежністю для умов сушіння, доцільно враховувати зниження потужності позитивних внутрішніх джерел теплоти на величину, відповідну витратам теплоти на випаровування вологи  $\rho \cdot N \cdot r$ . Для швидкості сушіння глини отримана емпірична залежність, яка описує експериментальні дані з відносною похибкою 17 % у діапазоні зміни товщини шару  $0,005 \leq \delta \leq 0,03$  м і при  $q_m \leq 11 \cdot 10^3$  Вт/кг.

9. Залежність для розрахунку ККД мікрохвильової камери при завантаженні її зразками з глини дозволяє розрахунковим шляхом оцінити ефективність використання мікрохвильової енергії. Найбільше значення ККД при обробці глини становить 72 % при вологовмісті  $u=0,46$  кг/кг.

10. Економічна ефективність застосування в промисловості мікрохвильового нагріву заготовок для виготовлення керамічних підкладок визначається скороченням тривалості технологічного циклу термообробки в 4 рази і питомих енерговитрат на термообробку на 37%.

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті, в яких опублікуванні основні результати дисертації

1. N. Kolesnychenko, N. Volgusheva, I. Boshkova. Analytical study of the processes of thermal conductivity at high intensity heating // East-European Journal of Enterprise Technology: Energy-saving technologies and equipment. Vol 5, No. 8 (83) (2016). – P. 26-31. *Дисертанту належить формулювання ідеї роботи, напрямків досліджень та аналіз розрахункових температур.*

2. Бошкова І.Л., Георгієш К.В., Колесниченко Н.О. Математические модели теплопереносу в подвижном плотном слое при микроволново-конвективном и микроволновом нагревании [Текст] // Пищевая наука и технология. Научно-производственный журнал. № 4 (25 Математические модели теплопереносу в подвижном плотном слое при микроволново-конвективном и микроволновом нагревании), 2013. – С. 143-149. *Дисертанту належать варіантні розрахунки теплопереносу в рухомому щільному шарі при микроволновому нагріві.*

3. Бошкова І.Л., Е.В. Георгиеш, Колесниченко Н.А. Математические модели теплопереноса в движущемся плотном слое при микроволново-конвективном и микроволновом нагреве [Текст] // Актуальные проблемы энергетики и экологии. Сборник научных работ. Одесса. – ОНАХТ, 2014. – Вып. 45, т. 1. – С. 46-56. *Дисертанту належать варіантні розрахунки теплопереносу в рухомому щільному шарі.*

4. Бошкова І.Л., Колесниченко Н.А. Оценка теплового эффекта взаимодействия материала с микроволновым электромагнитным полем [Текст] //

Наукові праці ОНАХТ, 2014. – Вип. 45, т. 1. – С. 22-28. *Дисертанту належать розрахунки теплових характеристик, аналіз та узагальнення даних.*

5. Колесниченко Н. А., Волгушева Н. В., Бошкова І. Л. Аналитическое исследование процесса теплопроводности при интенсивном нагреве плотных тел. [Текст] // Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2017. – Т. 20, вип. 2. – С. 111-115. *Дисертанту належить складання математичної моделі та її верифікація, проведення розрахунків локальних температур при зміні вихідних даних.*

6. Колесниченко Н. А., Волгушева Н. В., Бошкова І. Л. Аналитическое исследование теплового состояния тела при высокоинтенсивных процессах распространения теплоты [Текст] // Холодильна техніка і технологія. Одеса, 2016. – Т. 52, вип. 5. – С. 27-31.

### **Публікації апробаційного характеру**

1. Колесниченко Н.А., Бошкова І.Л. К вопросу о конечной скорости распространения тепла в твердом теле [Текст] // Збірник наукових праць в XV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів "Еколого-енергетичні проблеми сучасності". – Одеса: ОНАХТ. – 2015. – С. 147-149. *Дисертанту належать розрахунки температур при різних значеннях часу та аналіз даних.*

2. Колесниченко Н.А. Перспективы применения микроволнового поля для спекания функционально-градиентных материалов. II міжнародна науково-практична конференція: "Наука і сучасність: виклики глобалізації", *Дисертанту належить визначення доцільності використання енергії МХ поля при виробництві ФГМ.*

3. Колесниченко Н.А., Волгушева Н. В., Бошкова І.Л. К вопросу моделирования процессов теплопроводности высокой интенсивности [Текст] // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції "Актуальні проблеми енергетики та екології", 5-7 жовтня 2016 р. – ОНАХТ. – С. 30-33. *Дисертанту належить формулювання проблеми, узагальнення даних та підготовка матеріалів.*

4. Колесниченко Н.А., Бошкова І.Л. Энергоэффективность высокоинтенсивных процессов микроволновой обработки материалов [Текст] // Сборник докладов международной конференции "Energy of Moldova – 2016. Regional aspects of development". 29 September – 01 October, 2016 – Chisinau, Republic of Moldova. – С. 118-122. *Дисертанту належить складання методик експериментального дослідження, проведення експериментів та узагальнення даних.*

5. Колесниченко Н.А., Волгушева Н. В., Бошкова І.Л. Математические модели высокоинтенсивных процессов теплопроводности [Текст] // Сборник статей научно-информационного центра "Знание" по материалам XV международной заочной научно-практической конференции: "Развитие науки в XXI веке" 1 часть, г. Харьков: сборник со статьями (уровень стандарта, академический уровень). – Х.: научно-информационный центр "Знание", 2016. – С. 78-83. *Дисертанту належить аналіз математичних моделей теплопровідності високої інтенсивності.*

6. Колесниченко Н.А. Перспективы применения микроволнового поля для спекания функционально-градиентных материалов [Текст] // Збірник центру наукових публікацій "Велес" за матеріалами II міжнародної науково-практичної конференції: "Наука і сучасність: виклики глобалізації", 1 частина м. Київ: збірник статей (рівень стандарту, академічний рівень). – К.: Центр наукових публікацій, 2016. – С. 82-86. *Дисертанту належить аналіз даних щодо впливу мікрохвильового опромінювання на матеріали – складові ФГМ.*

7. Волгушева Н.В., к.т.н., Бошкова И.Л., д.т.н., Колесниченко Н.А. Оценка энергетической эффективности микроволновой технологии спекания керамики [Текст] // Сборник докладов VII международной научно-технической конференции "Казахстан – Холод 2017". – Алматы, 2016. – С. 135-138. *Дисертанту належить проведення теплових розрахунків, узагальнення даних у вигляді емпіричних рівнянь, визначення енергетичної ефективності МХ спікання.*

## АНОТАЦІЯ

**Колесниченко Н.А. Особливості поширення теплоти в дисперсних і щільних середовищах при високоінтенсивних процесах нагріву.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика". - Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2017.

У дисертаційній роботі на підставі аналітичних і експериментальних досліджень визначені особливості поширення теплоти в неорганічних матеріалах при високоінтенсивних процесах нагріву, включаючи нагрів в умовах дії мікрохвильового поля. Встановлено, що швидкість нагріву, можлива у високоінтенсивних технологіях виробництва технічної кераміки, значно нижче граничної швидкості, при якій порушується лінійний зв'язок між тепловим потоком і градієнтом температур, що дозволяє при побудові математичних моделей теплопереносу в розглянутих технологіях ґрунтуватися на рівнянні теплопровідності параболічного типу. Отримана залежність для розрахунків температури матеріалу при його нагріванні в умовах дії внутрішніх джерел теплоти, зокрема, у мікрохвильовому полі, як результат розв'язку математичної моделі теплопровідності напівобмеженого масиву при дії внутрішніх джерел теплоти для граничних умов III роду, що адекватно відбиває вплив визначальних фізичних величин на тепловий стан тіла. Для сполученого переносу теплоти і вологи в процесі сушіння при мікрохвильовому нагріванні запропонован метод розрахунків температури матеріалу за аналітичними залежностями шляхом урахування в значенні позитивного джерела теплоти складової, обумовленою енергією випару вологи з матеріалу. Отримано, що нагрів в мікрохвильовому полі матеріалу для виробництва технічної кераміки на основі SiC забезпечує високоінтенсивне зростання температури, а використання поглинаючого покриття дозволяє забезпечити рівномірність розподілу температури за об'ємом. Аналізується доцільність застосування мікрохвильового нагріву при виготовленні виробів із глини. На прикладі виготовлення керамічних пластин проведена оцінка енергетичної ефективності та рівня інтенсифікації процесу спікання в мікрохвильовому полі і

визначено, що у порівнянні із традиційними технологіями витрати енергії скорочуються в 1,6 разів, при цьому тривалість виробництва може бути знижена в 4 рази.

**Ключові слова:** математичні моделі, швидкість поширення теплоти, високоінтенсивний нагрів, час релаксації, мікрохвильове поле, швидкість нагріву, технічна кераміка, спікання, інтенсифікація.

## АННОТАЦІЯ

**Колесниченко Н.А. Особенности распространения теплоты в дисперсных и плотных средах при высокоинтенсивных процессах нагрева. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – "Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика". – Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 2017.

В диссертационной работе на основании аналитических и экспериментальных исследований изучены особенности распространения теплоты в неорганических материалах, применяемых при производстве керамики, при высокоинтенсивных процессах нагрева, включая нагрев в условиях действия микроволнового поля. Установлено, что скорость нагрева, возможная в высокоинтенсивных технологиях производства технической керамики, значительно ниже предельной скорости, при которой нарушается линейная связь между тепловым потоком и градиентом температур, что позволяет при построении математических моделей теплопереноса в рассматриваемых технологиях основываться на уравнении теплопроводности параболического типа. Определено, что решения гиперболического уравнения теплопроводности рационально применять при числах Фурье, соизмеримых с релаксационными числами Фурье. Получена зависимость для расчета температуры материала при его нагреве в условиях действия внутренних источников теплоты, в частности, в микроволновом поле, как результат решения математической модели теплопроводности полуограниченного массива для граничных условий III рода, адекватно отражающая влияние определяющих физических величин на тепловое состояние тела. Сопоставление результатов расчета и экспериментов показало, что для получения надежных данных на основании математической модели необходимо располагать корректными сведениями о зависимости диэлектрических характеристик материала от температуры. Для сопряженного переноса теплоты и влаги в процессе сушки при микроволновом нагреве предложен метод расчета температуры материала по полученным аналитическим зависимостям для нестационарного теплообмена путем учета в значении положительного источника теплоты составляющей, определяемой энергией испарения влаги из материала. Получено, что нагрев в микроволновом поле материала для производства технической керамики на основе SiC обеспечивает высокоинтенсивный рост температуры, а использование поглощающих покрытий позволяет обеспечить равномерность распределения температуры по объему. Обнаружено, что увеличение дисперсности порошков способствует равномерному распределению температур при микроволновом нагреве. Анализируется целесообразность применения

микроволнового нагрева для глиняных заготовок. На примере изготовления керамических пластин проведена оценка энергетической эффективности и интенсификации процесса спекания в микроволновом поле и определено, что, в сравнении с традиционными технологиями, затраты энергии сокращаются в 1,6 раза, при этом длительность производства может быть снижена в 4 раза.

**Ключевые слова:** математические модели, скорость распространения теплоты, высокоинтенсивный нагрев, время релаксации, микроволновое поле, скорость нагрева, техническая керамика, спекание, интенсификация.

## ABSTRACT

**Kolesnychenko N. Features of heat passage in disperse and dense environment under high-intensive heating processes.** - Manuscript.

The thesis for the degree of Candidate of the Technical Sciences by specialty 05.14.06 – «Technical Thermophysics and Thermal Engineering». – Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2017

In the thesis on the basis of analytical and experimental studies, the features of heat passage in inorganic materials used in the production of ceramics, with high-intensive heating processes, including heating under the action of a microwave field, are studied. It is established that the heating rate, which is possible in high-intensive technologies for the production of technical ceramics, is much lower than the limiting speed at which the linear relationship between the heat flow and the temperature gradient is violated, which makes it possible to build mathematical models of heat transfer in the considered technologies on the basis of the parabolic heat equation. A dependence was obtained for calculating the temperature of the material when it was heated under the influence of internal heat sources, in particular in the microwave field, as a result of solving the mathematical model of the thermal conductivity of a semi-bounded array under the action of internal heat sources for boundary conditions of the third kind, adequately reflecting the influence of the determining physical quantities on the thermal condition of a body. For the adjoint transfer of heat and moisture during the drying process under microwave heating, a method is proposed for calculating the temperature of a material by analytical dependencies by taking into account, in the value of a positive heat source, the component determined by the energy of evaporation of moisture from the material. It is obtained that heating in a microwave field of a material for the production of technical ceramics based on SiC provides a high-intensive temperature increase, and the use of absorbing coatings allows to ensure a uniform temperature distribution by volume. The feasibility of using microwave heating in the manufacture of clay products is analyzed. Using the example of ceramic plates manufacturing, an assessment of the energy efficiency and intensification of the sintering process in the microwave field has been made and it is determined that, in comparison with traditional technologies, energy costs are reduced 1.6 times, while the duration of production can be reduced by 4 times.

**Key words:** mathematical models, velocity of heat propagation, high-intensive heating, relaxation time, microwave field, heating rate, technical ceramics, sintering, intensification.