

**ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ  
ІМ. А.М. ПІДГОРНОГО НАН УКРАЇНИ**

**Кошлак Ганна Володимирівна**

УДК 532.5.072.12

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ З  
ЗАДАНИМИ ТЕПЛОФІЗИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Спеціальність 05.14.06 – технічна теплофізика  
та промислова теплоенергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків– 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі промислової теплоенергетики Дніпродзержинського державного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор **Братута Едуард Георгійович**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» МОН України, професор кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій.

**Офіційні опоненти** доктор технічних наук, професор

**Маляренко Віталій Андрійович**, Харківська національна академія міського господарства, науковий керівник Центру енергозберігаючих технологій

кандидат технічних наук, доцент

**Радченко Юрій Миколайович** Національна металургійна академія України МОН України, доцент кафедри «Теплотехніки та екології металургійних печей»

Захист відбудеться «23» квітня 2009 р. о 14 годині на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02 Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України за адресою 61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України за адресою 61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського, 2/10.

Автореферат розісланий «19» березня 2009 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук

О.Е. Ковальський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Аналіз досвіду передових держав у рішенні проблеми енергозбереження дозволяє визначити один з найбільш ефективних його шляхів - скорочення витрат тепла крізь конструкції будинків, споруджень, промислового устаткування, теплових мереж та інших об'єктів, в яких використовуються теплоносії. В зв'язку з цим відзначається інтенсивний розвиток промисловості теплоізоляційних пористих матеріалів (ТПМ) в багатьох розвинених державах. На Україні темпи росту ринку ТПМ в 2007 році становили близько 40 %. Частка української продукції наближалась до 20-25%. Разом з тим, в 2007 році ціни на теплоізоляційні матеріали зросли на 30 - 100 % в залежності від номенклатури матеріалів. Україна має достатньо виробничих потужностей для забезпечення споживачів необхідною кількістю теплоізоляційних матеріалів, але застосування застарілих технологій та номенклатури виробів не дає можливості конкурувати з високоякісною продукцією відомих європейських виробників. В наслідок цього проблема енергозбереження в державі ускладнюється супутніми не вирішеними екологічними питаннями. Наприклад, теплоізоляція - ефективний засіб для скорочення витрат енергії на опалення та покращення екологічної обстановки в державі. По даним EURIMA (Європейської Асоціації виробників теплоізоляційних матеріалів) кількість викидів CO<sub>2</sub> у Європі становить близько 3000 млн. тн. в рік. При застосуванні теплоізоляції ця кількість скоротиться на 10%.

Таким чином, створення державою сприятливих умов для розвитку технології ізоляційних процесів, а також виробництва та використання нових матеріалів, дозволить вирішити комплексну проблему - енергозбереження та екології.

Одним з напрямків рішення даної проблеми є розробка та впровадження ефективних теплоізоляційних пористих матеріалів на основі розчинних гідросилікатів з місцевої сировини. Поширеність сировинної бази, відносна простота технології, низькі капітальні витрати на виробництво, а також привабливі теплофізичні характеристики могли б забезпечити широке використання таких ТПМ в промисловості. Але для виробництва ефективних ТПМ необхідно детально вивчити особливості технологій спучування сировини, які відзначаються значними енергетичними витратами і майже некерованістю, що можливо пояснюється недостатньою увагою з боку дослідників до розвитку теоретичних і технологічних основ даних процесів. У зв'язку з цим, першочергового рішення вимагає проблема вдосконалення технології виробництва ТПМ шляхом підбору оптимального складу сировини й використання технологічних прийомів, наприклад, принципу дискретно - імпульсного введення енергії в розчинну емульсійну сировинну суміш, розробленого академіком Долінським А.А.

Таким чином, актуальність роботи обумовлена необхідністю вдосконалення складу

сировинного матеріалу; технології виробництва, на основі розробленої теоретичної бази процесів спучування, яка буде засобом керування процесом для одержання матеріалів із прогнозованими теплофізичними характеристиками.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами й науковими напрямками:**

Тематика роботи відповідає Законам України про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки, зокрема, п. 7 "Нові технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі". Матеріали дисертації являють собою узагальнення наукових результатів, які отримані автором за період з 2005 по 2008 роки при виконанні науково-дослідних робіт відповідно до плану НДР Дніпродзержинського державного технічного університету. Автор був відповідальним виконавцем ряду науково-дослідних робіт: "Створення наукових основ для розробки устаткування для комплексних систем, які забезпечують відділення масляних фаз від водних МОР" (202/01ДБ,0101U001776); "Розвиток теорії тепломасообміну в нанотехнологіях обробки дисперсних середовищ" (202/05ДБ, 0184U006634); "Розвиток теорії тепломасообміну в дисперсних середовищах" (202/03ДБ, 0126U005749); "Розвиток теорії наномасштабних процесів енергообміну в рідких дисперсних середовищах" (202/07ДБ), що були базовими для підготовки дисертаційної роботи. Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри "Промислова теплоенергетика" Дніпродзержинського державного технічного університету.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є розробка технологічних і теоретичних основ створення пористого матеріалу із прогнозованими теплофізичними характеристиками шляхом термічного спучування.

Завдання дослідження:

- розробити склад і спосіб енергозберігаючого виробництва пористого матеріалу з прогнозованими теплофізичними характеристиками;
- експериментально визначити основні функціональні залежності теплофізичних властивостей матеріалу від його складу та структури;
- визначити оптимальні технологічні режими виробництва пористого матеріалу з прогнозованими теплофізичними характеристиками;
- розробити математичні моделі спучування та структуроутворення ТПМ;
- розробити методичні основи для визначення теплофізичних властивостей матеріалу на стадії його виробництва;
- визначити: теплофізичні властивості пористого теплоізоляційного матеріалу та їх зв'язок з технологічними режимами; об'єкти та умови застосування нового ТПМ.

*Об'єктом дослідження* є технології одержання пористих матеріалів.

*Предметом дослідження* є процеси гідротермічного спучування розчинних силікатів і

функціональні залежності для одержання пористих матеріалів з прогнозованими теплофізичними характеристиками.

*Методи дослідження.* Теоретичні дослідження процесів спучування сировинних рідких сумішей здійснювалися шляхом математичного моделювання термодинамічних, масообмінних і газодинамічних процесів. Експериментальні дослідження зазначених процесів проводилися на устаткуванні лабораторії тепломасообміну кафедри промислової теплоенергетики Дніпродзержинського державного технічного університету та промислового устаткуванні ВАТ "ДніпроАзот" (м. Дніпродзержинськ) і ВАТ "Дніпровський металургійний комбінат ім. Ф.Е. Дзержинського". Обробка даних здійснювалася з використанням чисельного експерименту на ЕОМ. Всі експериментальні виміри виконані на повірених приладах.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В роботі вперше отримані такі наукові результати:

- 1) встановлено функціональний взаємозв'язок теплофізичних і структурних характеристик пористих матеріалів на основі гідросилікатів, який дозволяє визначити оптимальні співвідношення при виробництві матеріалів для певних умов використання;
- 2) встановлено раціональні термодинамічні умови гідротермічного спучування гідросилікатів, які дозволяють знизити енерговитрати у виробництві ТПМ;
- 3) запропоновано співвідношення, які встановлюють взаємозв'язок термодинамічних умов процесу спучування зі структурними параметрами нового пористого матеріалу, за допомогою яких знайдений оптимальний склад і технологічні режими виробництва;
- 4) на основі знайдених характеристик тепломасообміну одержали подальший розвиток технологічні та теоретичні основи процесів спучування, які дозволяють отримувати матеріал з прогнозованими теплофізичними характеристиками;
- 5) визначено теплофізичні характеристики нових пористих матеріалів, які розроблені в рамках дисертаційної роботи для теплоагрегатів.

Вірогідність результатів забезпечена коректним використанням перевірених математичних методів і доведена порівнянням результатів моделювання з експериментальними даними. Обґрунтованість наукових досліджень і висновків базується на аналізі значної кількості емпіричних даних, отриманих автором у лабораторних і промислових умовах, а також при зіставленні з матеріалами інших дослідників.

**Практичне значення отриманих результатів:**

- 1) розроблено технології виробництва теплоізоляційних пористих матеріалів з прогнозованими теплофізичними характеристиками, які засновані на реалізації раціональних динамічних ефектів, що виникають при пароутворенні легкокип'ячого компонента в умовах термодинамічного насичення;

2) розроблено методики визначення технологічних режимів і параметрів устаткування в запропонованих технологіях виробництва ТПМ з прогнозованими теплофізичними характеристиками для теплоагрегатів, які застосовуються в теплоенергетиці та інших областях промисловості;

3) розроблено, експериментально апробовано та впроваджено у виробництво нові технології і устаткування для одержання ТПМ з прогнозованими теплофізичними характеристиками із сумарним економічним ефектом 342000 грн. в рік (акт впровадження від 20.11.2007);

4) розроблено та впроваджено у виробництво нові теплоізоляційні пористі матеріали, із сумарним економічним ефектом 563700 грн. в рік (акт впровадження від 06.09.2007 р.).

Названі способи, пристрої та технології, які запропоновані і запатентовані автором, можуть бути використані на підприємствах теплоенергетики, машинобудування, металургії, харчової й переробної промисловості та в інших технологіях, де застосовуються тепломасообмінні процеси в складних пористих середовищах.

**Особистий внесок здобувача.** Експериментальні та теоретичні дослідження, які представлені в дисертаційній роботі, виконані особисто автором. В наукових роботах, що опубліковано в співавторстві, особистий внесок здобувача полягає: в розробці математичних моделей і рішенні відповідних рівнянь [1, 4 - 6, 10 - 12, 16, 17]; дослідженні та аналізі отриманих результатів [7, 8]; в розробці оптимального складу та технології виробництва ТПМ з заданими теплофізичними характеристиками [2, 3, 13 - 15, 20].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати роботи доповідалися на 9 міжнародних конференціях: "Інформаційні технології в економічних і технічних системах" (м. Кременчук, 2005, 2008); "Математичні проблеми технічної механіки" (м. Дніпродзержинськ, 2003, 2006); IV-міжнародній конференції "Проблеми промислової теплотехніки" (Київ, 2005); V міжнародної конференції "Проблеми промислової теплотехніки" (м. Київ, 2007); "Проблеми енергозбереження України та шляхи їх вирішення" (м. Харків, 2007); "Математичні проблеми технічної механіки" (м. Дніпропетровськ, 2008); XV міжнародної конференції "Теплотехніка та теплоенергетика в металургії" (м. Дніпропетровськ, 2008).

**Публікації.** Основні результати роботи опубліковані в: 1 монографії, 14 статтях - в спеціалізованих журналах, 10 тезах доповідей - в матеріалах і роботах міжнародних наукових конференцій, 5 патентах України на винаходи.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, переліку джерел із 116 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 184 сторінки, серед яких 157 сторінок основного машинописного тексту, 28 рисунків і 25 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано стан наукової проблеми, актуальність і доцільність дисертаційної роботи, наведено наукову новизну, практичне значення одержаних результатів дослідження, відомості про апробацію досліджень та публікації.

У **першому розділі** роботи, згідно з викладеними метою та задачами, формулюється уявлення про предмет дослідження - процеси гідротермічного спучування розчинних силікатів та функціональні залежності властивостей ТПМ від їх структури, складу та режимів термообробки, які необхідні для отримання пористих матеріалів з прогнозованими теплофізичними характеристиками. Проаналізовано ефективність використання основних пористих теплоізоляційних матеріалів, зокрема ТПМ вітчизняних виробників, і відзначено, що розповсюдженість природних покладів кремнеземистих порід в багатьох регіонах України, дешева та екологічно чиста сировина є вагомим аргументом для подальших досліджень, розробки і впровадження нових технологій виробництва ТПМ на основі гідросилікатів. Дослідження в області отримання таких матеріалів націлені на покращення їх теплофізичних і конструктивних властивостей.

На основі аналізу експериментальних даних, які були отримані різними дослідниками та пошукувачем особисто, встановлено функціональний зв'язок структурних (форма, розміри та взаємне розташування пор) і теплофізичних характеристик пористих матеріалів. Відзначено, що для ТПМ, в залежності від внутрішньої геометричної будови та температури застосування, існують оптимальні значення пористості і питомої кількості пор, при яких досягається найбільший ефект зниження інтенсивності передачі теплоти. В свою чергу, його структура функціонально пов'язана з методами спучування та технологічними режимами, тому вони проаналізовані з точки зору можливості керування побудовою ТПМ.

Механізм спучування гідросилікатних матеріалів складається з таких етапів. При нагріванні гідросилікату високотемпературним теплоносієм утворюються первинні газові пухирці (пори). Грузькість рідини з часом зменшується, одночасно збільшується об'єм газової фази з відповідним підвищенням її тиску. Коли тиск газової фази (водяної пари) перебільшує сили в'язкого опору та поверхневого натягу здійснюється спучування розчину. Оптимальними умовами спучування є керована грузькість середовища, за рахунок утворення низькотемпературних евтектичних розчинів, та знижений поверхневий натяг, які залежать від хімічного складу і температури, тобто останні параметри дають змогу створення оптимальної структури матеріалу з бажаними теплофізичними властивостями. Тому в роботі, в другому розділі, визначалися експериментально саме ці функціональні зв'язки.

Формування пористого середовища відбувається в три етапи: зародження газових

пухирців, їхнє зростання, стабілізація розмірів та місцеположення. Утворюються вони всередині піропластичного розчину на активних ділянках Si-OH. Зростання газового пухирця та утворення пори – складний процес, що відбувається під впливом реологічних властивостей рідини: в'язкості та поверхневого натягу, які регулюються температурними режимами спучування. В результаті випаровування води або застосування іншого газоутворювача збільшується об'єм газової фази (пор) в сировинній суміші. Зростання газових пухирців (утворення пор) відбувається по всій масі одночасно. Злиття пухирців супроводжується зниженням тиску в газовій фазі, що уповільнює зростання її об'єму та, незважаючи на різну інтенсивність розвитку пухирців, пориста структура буде наближатися до гомогенної. Основним фактором, що впливає на інтенсивність зростання пухирців є в'язкість рідкої сировинної суміші, яка збільшується при термічній обробці до стадії повної кристалізації матеріалу з готовою пористою структурою.

У **другому розділі** дисертаційної роботи експериментально досліджено вплив теплотехнологічних параметрів та структурних характеристик ТПМ на його теплофізичні властивості, на основі чого розроблено та запатентовано два нових матеріали, способи їх виробництва та відповідне обладнання, оптимізовані склад ТПМ і технологічні режими виробництва.

При вивченні процесів спучування термічними методами в лабораторних умовах встановлено, що інтенсивність теплопідводу визначає практично всі споживацькі характеристики: теплопровідність, щільність, міцність, термостійкість, пористість, гігроскопічність, розмір та форму пор, вид пористості. Причому всі показники безпосередньо взаємопов'язані. Якщо підвищувати температуру спучування, можливо інтенсифікувати процес пороутворення, мінімізувати теплопровідність (рис.1) та грузькість матеріалу.

Однак при цьому буде знижуватися і міцність, оскільки стрімке та хаотичне утворення парових пухирців (пор) в сировинній суміші, яка поступово кристалізується, приводить до формування відкритої каналної пористості з ушкодженням каркасом. Це є причиною підвищеної гігроскопічності матеріалу та нестійкості теплофізичних параметрів.



*Рис. 1. – Залежність теплопровідності від температури теплоносія при спучуванні*

Друга особливість процесу спучування – динаміка змінення кількості і розмірів пор у часі. Встановлено, що інтенсивність теплопідводу формує належну пористу структуру матеріалу, і саме пориста структура визначає теплофізичні характеристики.

Вивчення особливостей процесів термічного пороутворення дозволило створити експериментальну основу для розробки нових

матеріалів, оптимізації їх складу та способу виробництва, тобто розробити теплотехнологічні основи виробництва нових ТПМ. Рецептурно – технологічні параметри виробництва запатентованих матеріалів (ТПМ1 та ТПМ2) наведені в основному тексті дисертаційної роботи.

Наступний етап досліджень – встановлення кількісних функціональних взаємозв'язків структурних, технологічних рецептурних та теплофізичних характеристик нових ТПМ.

Дослідження структури матеріалу (пористості) виконувалося за допомогою фотоелектронної установки, що включає мікроскоп МБС–2, фотомножитель та перерахунковий електронний прилад ПС – 10000.

Вплив термічних режимів спучування та складу сировинної суміші на пористість визначено експериментально за допомогою методики планованого експерименту. Керуючими факторами для виробництва ТПМ1 були: відсотковий вміст глини (кодове значення  $X_1$ ), вміст  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ( $X_2$ ), вміст води в сировинній суміші ( $X_3$ ) і температура теплоносія ( $X_4$ ). Для другого матеріалу: вміст  $\text{Al}$  ( $X'_1$ ), тривалість процесу спучування ( $X'_2$ ), вміст води в сировинній суміші ( $X_3$ ), температура спучування ( $X'_4$ ).

Залежність пористості від названих факторів представлена рівняннями

(1)

Із наведених даних випливає, що найбільш вагомий фактор впливу на пористість – вміст води в сировинній суміші ( $X_3$ ). Саме цей параметр визначає кількість газоутворювача – водяної пари.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ( $X_2$ ) є додатковим газоутворювачем і тому фактор  $X_2$  також домінує в першій серії дослідів по спучуванню ТПМ1. Температура ( $X_4$  та  $X'_4$ ) та тривалість термообробки в більшій мірі визначали вид пористості і міцнісні характеристики матеріалу.

Глина ( $X_1$ ) та алюміній ( $X'_1$ ) – додаткові газоутворювачі, але в більшій мірі вони

визначають міцність ТПМ, термостійкість і теплопровідність нових матеріалів, що визначалась за допомогою вимірника теплопровідності ИТ –  $\lambda$  – 400. Залежність для коефіцієнту теплопровідності (2)

(2)

З підвищенням вмісту газоутворювача, температури та тривалості спучування значення коефіцієнту теплопровідності знижується. Для ТПМ1 вміст глини не суттєво впливає на теплопровідність, тому відповідний фактор ( $X_1$ ) виключено із моделі (2).

На наступних етапах досліджень визначалися залежності міцності (3) та термостійкості ТПМ1 і ТПМ2 (4). Для визначення міцності використовувався ультразвуковий імпульсний метод, заснований на вимірах швидкості розповсюдження ультразвукових імпульсів в матеріалі, яка залежить від густоти ТПМ та пов'язана відповідною залежністю з міцністю. В досліді використовувався прилад УПЗ – 64.

(3)

(4)

В завершенні експериментальних дослідів для задач термонапруженого стану, що вирішувались у п'ятому розділі дисертації, визначено коефіцієнти температурного розширення нових ТПМ в діапазоні температур 100 – 700 °С за допомогою кварцевого дилатометра.

В **третьому розділі** дисертації оптимізовано склад та параметри технологічних режимів виробництва нових ТПМ, наведено дані про теплотехнологічні режими отримання пористого матеріалу з прогнозованими теплофізичними характеристиками, які оптимізовані на базі розроблених в другому розділі дисертаційної роботи емпіричних залежностей. Лабораторні дослідження процесів спучування гідросилікатів дозволили сформулювати один з основних висновків – ці процеси можуть бути керованими, і основна мета такого керування полягає в тому, щоб отримати ТПМ з необхідними теплофізичними характеристиками в досліджуваному інтервалі значень. Для цього, на наш погляд, важливо встановити параметри керуючих функцій для дослідження теплофізичних характеристик в оптимальній області зазначених факторів, які були визначені у третьому розділі дисертації з використанням розрахункових функцій Mathcad 2001 Professional. Для кожного із показників вирішена задача на max або min при обмеженнях на фактори  $-1,414 \leq X_i \leq 1,414$ . Оскільки регресійні рівняння, що отримані в другому розділі дисертації, виявились адекватними (перевірка виконувалась по критерію Фішера), вони використовувались для керування процесом спучування з метою його оптимізації. Функція мети

– теплопровідність, інші показники включені в обмеження. В результаті отримані оптимізаційні моделі спучування з мінімальною теплопровідністю ( $Y_2$ ) для ТПМ1 та ТПМ2.

На базі оптимізованих регресійних моделей отримано узагальнені моделі теплотехнологічного формування нових ТПМ за допомогою метода Фаррара – Глобера

$$\text{для ТПМ1: } Y_2 = 0,02 + 0,011Y_3 - 0,0002Y_4. \quad (5)$$

$$\text{для ТПМ2: } Y_2 = 0,49 - 0,01Y_1 + 0,001Y_4, \quad (6)$$

де  $Y_1$  – пористість матеріалу,  $Y_2$  – теплопровідність,  $Y_3$  – міцність,  $Y_4$  – термостійкість.

Аналогічний підхід можна використовувати для аналізу впливу і інших факторів, які досліджувалися в роботі, що дає точні та обґрунтовані данні для керованого отримання ТПМ з необхідними теплофізичними характеристиками.

Таким чином, використовуючи отримані результати, не важко прогнозувати ТФХ матеріалу, та приймаючи цю вже підтверджену гіпотезу, на основі даних розділів 2 та 3, розроблених технологічних основ виробництва нових ТПМ, можна створити і теоретичну базу процесу спучування.

**Четвертий розділ дисертації** присвячений математичному моделюванню процесів: 1) утворення парової фази в гелеподібній багатокомпонентній суміші; 2) теплообміну на межі поділу парогазового пухирця (пори) та зовнішньої суміші; 3) спучування рідкої сировинної частки; 4) теплообміну спучуваної частки в середовищі теплоносія; 5) встановлення рівноважного стану в динаміці формування пористої структури, рішенням рівнянь та аналізу отриманих результатів.

Стосовно першої моделі передбачалося, що поява парової фази буде відбуватися на межі поділу нерозчинних рідких фаз сировинної суміші, а саме в зоні зниженого поверхневого натягу. В запропонованих технологіях пороутворення може починатися в об'ємі сировинної суміші на границях подрібненого кремнеземистого матеріалу, а в другій технології, при додаванні алюмінієвої пудри, на границі часток Al. Алюмінієва пудра посилює екзотермію реакції, в наслідок цього вона проходить із самоприскоренням з додатковим виділенням водню. В результаті суттєво інтенсифікуються процеси утворення нових пухирців та з'являються додаткові теплові джерела у всьому об'ємі сировинної суміші.

Завдяки формуванню на паровому пухирці в'язкої поверхневої плівки всередині парової області створюється надлишковий тиск, внаслідок чого відбувається зростання пори. Завдяки високотемпературній дії теплоносія оболонка з часом втрачає пластичність і формується каркас.

Розглянемо зростаючий паровий пухирець, оточений рідким середовищем. В початковий

момент всередині встановлюється тиск  $p_0$  ( $p_0 > p_a$ ) при температурі  $T_0$ . Кінетику зростання парового пухирця (пори) можна відобразити рівнянням Релея

(7)

Тиск пари визначається рівняннями стану з урахуванням щільності та температури, як  $p_n = f(\rho_n, T_n)$ .

Припустимо, що внутрішній та зовнішній тиск не залежить від розміру пухирця, а температура пари однакова по всьому об'єму пори. Тому

$$\frac{d\rho_n}{dR_n} = 0, \quad (8)$$

Тепловий та масовий потоки, що переносяться молекулами пари

(9)

Приведені рівняння доповнюються рівнянням теплового балансу.

$$\alpha(T_{нов} - T_{сп}) = q + \iota L(T_{сп}). \quad (10)$$

Швидкість зростання границі пухирця

$$w = \frac{dR}{d\tau} + \frac{\iota}{\rho_e}. \quad (11)$$

Умови теплообмінних процесів пухирця з навколишнім середовищем та їхня інтенсивність є основними факторами, що характеризують динаміку зростання границі розділу фаз.

Для оцінки інтенсивності теплообміну необхідно визначити температуру  $T_{сп}$  на міжфазній поверхні. В нашому випадку  $T_{сп} \neq T_n$ . Додаткові рівняння, що включають  $T_{сп}$ , дозволяють зробити систему рівнянь математично визначеною, що дає змогу розрахувати температурне поле навколо пухирця та невідому  $T_{сп}$

Рівняння теплопровідності

,

$$\text{з початковими умовами } T(r,0) = T_0, \quad 0 < r < R; \quad T_{газа}(0) = T_{газа} = const. \quad (12)$$

$$; \quad T|_R(\tau) = T_{нов}; \quad -\lambda_2 \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \alpha = \lambda_{газа} / R.$$

Рівняння енергії та наведені вище залежності дозволяють визначити динаміку зростання парової фази (пори), а також температурне поле спучуваної частки. Результати рішення

приведені на рис. 2.

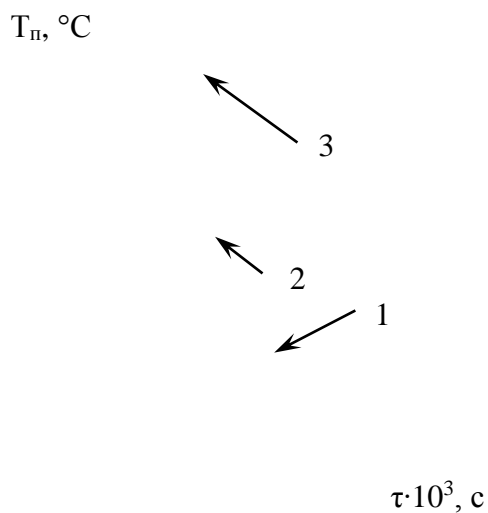
Характер зростання пор не змінюється по перетину частки. Зони зі зниженим поверхневим натягом є центрами пороутворення. На основі отриманих експериментальних даних запропоновано рівняння, що характеризує частоту утворення парових пухирців в об'ємі частки

$$\ln j = 9,7 - U / (k T), \quad (13)$$

та функцію розподілу центрів пороутворення

$$f(U) = (B V)^{-1} [1 + (1 - k) G] \exp\{9,7 - G\}. \quad (14)$$

Рис. 2 показує, що температура пари  $T_n$  має осцилюючий характер на початку процесу зростання парової області, що пояснюється двома причинами.



а)

б)

По – перше, збільшенням (об'єднанням) пухирців пари, яке супроводжується зміною їх термо-динамічних характеристик.

По-друге, температура  $T_n$  постійно збільшується, починаючи з моменту встановлення рівноважного тиску пари (рис.2б) в зв'язку з тим, що тепловий потік, від геля, буде перевищувати на всьому протязі часу ефект розширення парового об'єму, а також зворотній потік теплоти від пари та теплоту масового потоку. Осциляція температури при менш інтенсивному теплопідводі (графіки 1 і 2) відсутня. Очевидно, це пов'язано з динамічними, силовими ефектами, що виникають при швидкому зростанні та об'єднанні

*Рис.2. Зміна температури на поверхні при температурі теплоносія  $T_0$ : 1- 500°C; 2 – 300°C; 3 – 150°C. , тиску пари в порі та розміру пори в часі*

пухирців. З технологічної точки зору ці режими рівноцінні. Характерною особливістю цих процесів є те, що термообробка з екстенсивним тепловим впливом дозволяє досягнути рівномірної структури пористого матеріалу та більшої його міцності.

Графік зміни радіусу парового пухирця (рис. 2в) не має помітних осциляцій внаслідок зменшення щільності пари. Зростання та формування пор поступово завершується внаслідок збільшення реологічних показників сировинної маси і припиняється при її кристалізації. Інтенсивність цих процесів залежить від кількості підведеної теплоти. В четвертому розділі приділялась особлива увага моделюванню процесів урівноваження в динаміці росту пор.

В якості динамічної характеристики, що обумовлює направленість зміни розмірів парової пори прийнята різниця напруг, яка визначається тиском в паровій області та опором граничної поверхні пори. Рівняння Релея-Плессета характеризує динаміку зростання пухирця зі швидкістю  $w$

$$\frac{dw}{w^2 - \frac{P_n(T) - P_e}{1,5\rho_e}} = -\frac{1,5\rho_e d\tau}{\rho_e R} \quad (15)$$

Зміна розмірів пухирця може бути відображена трьома умовами: при  $P_n(T) - P > 0$  – пори зростає,  $P_n(T) - P < 0$  – зменшується;  $P_n(T) - P = 0$  – її розмір стабілізовано

(16)

В роботі більш детально наведено методику оцінки розмірів пор, в якій, рівняння (16),

що приведені в авторефераті як приклад, дозволяють визначити основні технологічні, енергетичні та структурні параметри процесу спучування для отримання певної структури ТПМ.

В п'ятому розділі дисертаційної роботи вирішено задачі термопружності виробів із нових ТПМ. Сформульована модель теплопровідності для пластини, яка доповнює рівняння термопружності

(17)

$$U(x;0)=U(x;b)=0, \quad (18)$$

$$V(0;y)=V(a;y)=0, \quad (19)$$

Для знаходження напруження запропоновано формули

(20)

(21)

(22)

За допомогою приведених рівнянь отримано компоненти вектора напруг для випадку жорсткого закріплення країв пластини.

Аналогічні перетворення виконано і для циліндричних поверхонь.

В шостому розділі наведено дані про промислове використання результатів дисертаційної роботи. Як і передбачалося в постановці задач дослідження, теплофізичні характеристики ТПМ були прогнозовані на стадії проектування обладнання та технологічних режимів спучування. Характеристики матеріалів наведені в дисертаційній роботі.

На рис. 3 показана схема установки для отримання нових ТПМ (рис. 4).

*Рис. 3. – Схема устаткування для  
виробництва ТПМ*

*Рис. 4. – Новий ТПМ1*

Сировинна суміш та додаткові газоутворювачі подаються послідовно в змішувач 1, далі шнеком 2 в вигляді гелю – на решітку 3 апарата фонтануючого шару. Готовий продукт 4 та теплоносій 5, – продукти спалювання газу, складають матеріальний баланс печі. Готовий матеріал формується в вигляді виробу з необхідними розмірами (рис.4).

В шостому розділі приведені режимні карти роботи обладнання, які дозволяють встановити технологічні параметри для отримання ТПМ з необхідними теплофізичними характеристиками.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел, присвячених вивченню процесів пороутворення, та дослідження цих процесів дозволили, на базі отриманих даних, сформулювати і обґрунтувати гіпотезу про керованість процесом спучення з метою виробництва матеріалу з прогнозованими теплофізичними характеристиками; розробити на цій основі на рівні винаходів два нові склади ТПМ, способи їх виробництва і устаткування.

2. Визначені основні структурні чинники і встановлені якісні залежності режимів спучення та теплофізичних характеристик, на основі чого оптимізована структура нових матеріалів з метою мінімізації теплопровідності, підвищення міцності і термостійкості, сформульована фізична модель процесу спучення.

3. Запропоновано, фізично обґрунтовано і апробовано математичні моделі динаміки парової фази, яка виникає і розвивається в об'ємі рідкої сировинної маси при нагріві, що дає можливість детально вивчити, проаналізувати і прогнозувати дані процеси, створити на цій базі теоретичні основи керованого спучування і отримання ТПМ з прогнозованими ТФХ.

4. Визначено основні теплофізичні характеристики ТПМ в робочих діапазонах температур - до 1500 °С, що дозволяє встановити область застосування нових матеріалів.

5. Розроблені матеріали пройшли промислові випробування при теплоізоляції поверхонь з температурою 180 - 1500 °С. При реалізації нових технологій і матеріалів підтверджено експериментально, що процес пороутворення може бути керований технологічними прийомами і значення теплофізичних характеристик можна прогнозувати з достатньою точністю в запропонованих технологіях на стадії їх проектування.

6. Нові матеріали, технології їх виробництва і устаткування реалізовані в промислових умовах з економічним ефектом 905700 грн. в рік.

**Позначення:**  $a$  – коефіцієнт температуропровідності;  $c$  – питома теплоємність;  $J$  – масовий потік;  $\iota$  – питомий масовий потік;  $m$  – маса;  $p$  – тиск;  $Q$  – тепловий потік;  $q$  – питомий тепловий потік;  $r, R$  – радіальна координата та радіус;  $T$  – температура;  $V$  – об'єм;  $w, W$  – швидкість;  $x, y$  – Декартові координати;  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості;  $\rho$  – щільність;  $\sigma$  – коефіцієнт міжфазного натягу;  $U$  – енергія активації;  $j$  – кількість центрів пароутворення;  $G$  – енергія Гіббса;  $\tau$  – час;  $L$  – постійна Ламе;  $\zeta$  – модуль зсуву;  $A$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення;  $E$  – модуль пружності;  $\Pi$  – коефіцієнт Пуассона;  $X, Y$  – складові переміщення;  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення.

**Індекси:** 0 – початкове значення;  $g$  – газ;  $n$  – пара.

**Умовні скорочення:** ДІВЕ – дискретно-імпульсне введення енергії; ПАР – поверхнево-активна речовина; ТПМ – теплоізоляційний пористий матеріал, ТФХ – теплофізичні



характеристики.

### ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Павленко А.М. Теплообмен частицы в потоке теплоносителя / И.А. Давыдов, А.В. Кошлак. - Днепродзержинск: Издательство ДГТУ, 2008.– 162 с.
2. Павленко А.М. Дезинтеграция эмульсионных сред в центробежных аппаратах / А.М. Павленко, А.В. Кошлак // Вестник НТУ «ХПИ». – 2004. - №37.-С.146-151.
3. Павленко А.М. Термічне розділення емульсій в вихрових апаратах / А.М. Павленко, А.В. Кошлак // Нові технології. Науковий вісник Інституту економіки та нових технологій ім. Ю.І. Кравченка. – 2005. -№ 1-2 (7-8). - С. 234 – 238.
4. Павленко А.М. Об одном способе интегрирования уравнений второго порядка с приложением к задачам теплопроводности / А.М. Павленко, И.А. Давыдов, А.В. Кошлак // Металлургическая теплотехника. - 2005. - Книга первая. - С. 318-329.
5. Братута Э.Г. Разделение многокомпонентных жидких сред в вихревом поле / Э.Г. Братута, А.М. Павленко, А.В. Кошлак// Интегровані технології та енергозбереження. – 2006. – №3 – С. 42-47.
6. Павленко А.М. Моделювання теплопровідності багаточислової частки / А.М. Павленко, Р.О. Клімов, Г.В. Кошлак, В.Е. Черниченко // Вісник КДПУ. – 2006. – Ч. 1, № 3 (38). - С.134-132.
7. Братута Э.Г. К решению задачи нестационарной теплопроводности /Э.Г. Братута, А.М. Павленко, А.В. Кошлак // Науковий вісник НТУ ХПІ. – 2007. - №2. - С. 109 – 115.
8. Павленко А.М. Теплообмен в каналах сложной конфигурации / А.М.Павленко, А.В. Кошлак, Б.И. Басок // Пром. теплотехніка. - 2007. - Т.29, №7. - С. 85-88.
9. Соколовская И.Е. Получение пористых материалов с прогнозируемыми теплофизическими характеристиками / И.Е. Соколовская, А.В. Кошлак, А.М. Павленко //Сборник науч. трудов ДГТУ (технические науки). - 2007. – № 8. – С. 122-126.
10. Соколовская И.Е. Моделирование процесса производства пористого материала с заданными свойствами / И.Е. Соколовская, А.В. Кошлак, А.М. Павленко, В.Е. Черниченко // Вестник КДПУ. – 2007. - № 2 (43). - С.19-22.
11. Павленко А.М. Моделирование процесса производства материала с прогнозируемой теплопроводностью / А.М. Павленко, А.В. Кошлак, В.Е. Черниченко // Вестник КДПУ. – 2008. - Ч. 2, № 2(49). - С. 25-28.
12. Кошлак А.В. Динамика формирования пористой структуры / А.В. Кошлак // Сборник научных трудов. - Днепродзержинск: ДГТУ. - 2008. – Выпуск 9. – С. 122-126.

13. Павленко А.М. Особенности управления процессами формирования структуры и свойств пористых тел / А.М. Павленко, А.В. Кошлак // Сборник научных трудов НМетАУ: Metallургическая теплотехника. - 2008. – С.211-220.
14. Кошлак А.В. Равновесные состояния в динамике формирования пористой структуры / А.В. Кошлак // Системные технологии. – 2008. - №5(58). – С.36-40.
15. Кошлак А.В. Формирование теплофизических характеристик пористого материала / А.В. Кошлак // Математичне моделювання. - 2008. – № 2(19). – С.48-50.
16. Пат. 85285 UA, МПК C04B14/00. Сировинна суміш для пористого теплоізоляційного матеріалу і спосіб його одержання/ Кошлак Г.В., Павленко А.М.; Соколовська І.Є. заявник та патентовласник ДДТУ.- а200703901; заявл. 10.04.2007; опубл. 12.01.2009, Бюл. №1.
17. Пат. 27656 UA, МПК C04B14/00. Сировинна суміш для пористого теплоізоляційного матеріалу / Кошлак Г.В., Павленко А.М.; заявник та патентовласник ДДТУ. - № 2007 07203; заявл. 26.06.2007; опубл. 12.11.2007, Бюл. №18.
18. Пат. 25862 UA, МПК C04B14/00. Сировинна суміш для пористого теплоізоляційного матеріалу / Кошлак Г.В., Павленко А.М., Соколовська І.Є.; заявник та патентовласник ДДТУ. - № 200703899; заявл. 10.04.2007; опублік. 27.08.2007, Бюл. №13.
19. Пат. 25527 UA, МПК C04B14/00. Спосіб одержання пористого теплоізоляційного матеріалу / Кошлак Г.В., Павленко А.М.; заявник та патентовласник ДДТУ. - № 200703898; заявл. 10.04.2007; опублік. 10.08.2007, Бюл. №12.
20. Пат. 26821 UA, МПК F26B17/10. Пристрій для отримання гранульованого наповнювача теплоізоляційного матеріалу / Кошлак Г.В., Павленко А.М., Соколовська І.Є., Клімов Р.О.; заявник та патентовласник ДДТУ. - № 200705035; заявл. 07.05.2007; опублік. 10.10.2007, Бюл. №16.

#### АНОТАЦІЯ

Кошлак Г.В. Теоретичні та технологічні основи розробки пористих матеріалів з заданими теплофізичними характеристиками – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика і промислова теплоенергетика, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків, 2009.

В дисертаційній роботі розроблені теоретичні та технологічні основи створення пористих матеріалів з заданими теплофізичними характеристиками. Запропоновано два варіанти складу пористих матеріалів для різних галузей застосування, способи їх виробництва та обладнання. Визначений функціональний взаємозв'язок теплофізичних і структурних характеристик

пористих матеріалів на основі гідросилікатів, що дозволило визначити оптимальні співвідношення при виробництві матеріалів для певних умов використання. Визначено раціональні термодинамічні умови гідротермічного спучування гідросилікатів. Запропоновано співвідношення, що встановлюють взаємозв'язок гідродинамічних і термодинамічних умов процесу спучування з структурними параметрами нового пористого матеріалу, що дозволило оптимізувати його склад та технологічні режими виробництва. На основі знайдених характеристик тепломасообміну набули подальшого розвитку технологічні та теоретичні основи теорії спучування, які дозволяють отримувати матеріал з прогнозованими теплофізичними характеристиками. Визначені теплофізичні характеристики нових пористих матеріалів для відповідних теплоагрегатів.

**Ключові слова:** Теплофізичні характеристики пористих матеріалів, тепломасообмін, кипіння легкокип'ячого компонента рідкої суміші, гідротермічне спучування.

### **АННОТАЦІЯ**

Кошляк А.В. Теоретические и технологические основы разработки пористых материалов с заданными теплофизическими характеристиками - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 - техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика, Институт проблем машиностроения им. А.М. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, 2009.

В диссертационной работе созданы теоретические и технологические основы получения пористых материалов с заданными теплофизическими характеристиками. На основе анализа существующих данных о взаимосвязи структурных и теплофизических характеристик ТПМ предложены два варианта состава пористых материалов для разных областей промышленного применения, способы их производства и оборудование. В результате лабораторных исследований определены функциональные взаимосвязи теплофизических и структурных характеристик новых пористых материалов, созданных на основе гидросиликатов, в диапазоне температур от -100 до 1500 °С. Установлены оптимальные соотношения пористости, теплопроводности, термостойкости, рецептурного состава сырьевой смеси, позволяющие при производстве материалов получать материал с необходимыми свойствами для различных условий использования. Уточнены рациональные термодинамические параметры гидротермического вспучивания гидросиликатов, применение которых позволяет существенно снизить энергозатраты в производстве пористого материала. Предложены соотношения, устанавливающие взаимосвязь гидродинамических и термодинамических условий процесса вспучивания со структурными параметрами нового пористого материала, на основе которых выполнена оптимизация состава и технологических режимов производства. Установлено, что одним из основных факторов, влияющих на теплопроводность ТПМ, является

продолжительность термического воздействия, которая определяет интенсивность теплообменных процессов в исходном материале. Определяющим параметром при формировании структуры материала с заданной пористостью, а, следовательно, его теплофизическими характеристиками, является начальная влажность сырьевой смеси, поскольку от влагосодержания будет зависеть объем газообразователя – водяного пара. Предложенная математическая модель динамики зарождения и роста паровой фазы, возникающей в объеме гелеобразной сырьевой массы при нагреве, дает возможность детально изучить процессы вспучивания. Разработаны технологии и оборудование для получения новых пористых материалов, которые базируются на найденных рациональных методах порообразования, и позволяют реализовать технологический процесс с меньшими энергетическими затратами, по сравнению с известными методами производства ТПМ. Получили дальнейшее развитие технологические и теоретические основы теории вспучивания, с помощью которых предложен материал с прогнозируемыми теплофизическими характеристиками. Определены теплофизические характеристики новых пористых материалов для различных теплоагрегатов.

Ключевые слова: Теплофизические характеристики пористых материалов, теплообмен в пористых средах, вскипание смесей жидкостей, гидротермическое вспучивание.

#### ANNOTATION

Koshlak A. V. Theoretical and technological bases of development of porous materials with the set thermal physics descriptions are Manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences on speciality 05.14.06 - technical thermal physics and industrial heat, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, 2009.

In dissertation work theoretical and technological bases of creation of porous materials are developed with the set thermal physics descriptions two variants of composition of porous materials are Offered for different industries of application, methods of their production and equipment. Functional intercommunication of thermal physics is certain and structural descriptions of porous materials on the basis of phydraulic silicates, that allowed to define optimum correlations at the production of materials for the certain terms of the use. The rational thermodynamics terms of gidro thermal growth of phydraulic silicates are certain. Correlations which set intercommunication of hydrodynamic and thermodynamics terms of process of growth with the structural parameters of new porous material are offered, that allowed to optimize his composition and technological modes of production. On the basis of the found descriptions of exchange by a heat and mass technological and theoretical bases of theory of growth got subsequent development, that allows to get material with the forecast thermal physics

descriptions. thermal physics descriptions of new porous materials are certain for proper warmly aggregates.

**Keywords:** thermal physics of description of porous materials, exchange by a heat and mass, boiling up of boils easily component of liquid mixture, gidrothermal growth.

Кошлак Ганна Володимирівна

Теоретичні та технологічні основи розробки пористих матеріалів з заданими  
теплофізичними характеристиками

Підписано до друку . Формат 60 x 84/16.

Ум. Др.. арк. 0,9. Авт.. арк.. 0,9.

Тираж 100 прим. Замовлення № .

51918, м. Дніпродзержинськ, вул. Дніпробудівська, 2.