

ВІДГУК

офіційного опонента Кутового Володимира Олександровича
на дисертаційну роботу Чейлитка Андрія Олександровича
«Розвиток теоретичних основ формування теплофізичних властивостей
теплоізоляційних матеріалів шляхом управління процесами тепломасообміну в
пористих структурах»,
представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова
теплоенергетика

Актуальність теми дослідження

Формування теплофізичних властивостей пористих матеріалів надає можливість створення високопористої теплової ізоляції заданої теплопровідності та міцності. До високопористих матеріалів з неструктурованою пористою структурою, на даний час, відносяться вогнетриви, піноскло, пінобетон, керамзит, пінометали та інші матеріали.

Для формування заданого термічного опору теплопровідності пористих матеріалів необхідне узагальнене рівняння ефективного коефіцієнта теплопровідності для високопористих матеріалів, якого досі не існувало. Також узагальнене рівняння ефективного коефіцієнта теплопровідності пористого матеріалу дозволить управляти теплопровідністю будь-якого високопористого матеріалу на стадії формування пористої структури без проведення безлічі експериментів. Тому знаходження даного рівняння є актуальною науковою проблемою, корисною для промисловості України та яка вирішується у дисертаційній роботі. Важливість проблеми вивчення специфіки протікання зазначених процесів пояснюється тим, що сьогодні різноманітні пористі матеріали широко застосовуються в сучасних технологіях у багатьох галузях промисловості, зокрема в енергетиці, в хімічній, металургійній, машинобудівній та інших.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами і темами

Робота виконана відповідно до держбюджетної теми науково-технічної розробки 8-1Д/2017 «Формування теплофізичних властивостей елементів конструкції теплового захисту енергетичного обладнання шляхом створення прогнозованих пористих структур для промисловості України» (номер державної реєстрації 0117U006455), у якій дисертант є керівником проекту, що підтверджує актуальність дисертаційної роботи.

Робота також є складовою комплексних досліджень держбюджетної теми науково-технічної розробки «Розробка інтерметалідних сплавів на основі алюмінідів титану для деталей газотурбінних двигунів та авіаційно-космічної

техніки» (номер державної реєстрації 0116U007400), у якій дисертант був виконавцем.

Загальні відомості про структуру дисертації та аналіз її змісту

Дисертація добре структурована. В ній послідовно викладені отримані результати наукових досліджень та практичні розробки автора. Дисертаційна робота складається із вступу, 8 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний об'єм дисертаційної роботи

379 сторінок, з них 278 сторінок основного тексту, 122 рисунка, 21 таблиця та 3 додатки. Список використаних літературних джерел становить 278 найменувань. У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження, сформульовано мету і задачі досліджень, наведено мету і завдання дослідження відповідно до предмета та об'єкта дослідження, зазначено новизну, а також практичне значення отриманих результатів.

Зміст дисертаційної роботи відповідає паспорту спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Зміст автореферату розкриває основні положення дисертації, у достатній мірі відтворює структуру і обсяг роботи. Дисертація та автореферат оформлені у відповідності до вимог "Положення ВАК України".

Аналіз дисертаційної роботи

У вступі до дисертаційної роботи містяться основні загальноприйняті положення, які викладено у відповідності до встановлених вимог ВАК України.

У першому розділі проведено аналіз наукових джерел зі впливу пористої структури на теплофізичні властивості матеріалу та методи формування пористої структури. Сформована робоча гіпотеза керованого структуроутворення матеріалів та формування його теплофізичних властивостей: вплив структурних параметрів на теплофізичні характеристики пористого матеріалу дозволяє створити теоретичні основи керованого структуроутворення теплоізоляційних матеріалів із заданими теплофізичними властивостями. Визначені комплексні показники, які повною мірою відображають пористу структуру і тепломасообмінні процеси у ній: пористість, кількість пір, розташування пір у матеріалі, форма пори та показники стану газу у порах. Використання визначених комплексних показників дозволяє створити технології керованого структуроутворення теплоізоляційного матеріалу з заданими теплофізичними властивостями.

У другому розділі запропонована класифікація генезису пір у теплоізоляційних матеріалах та конструкціях теплового захисту енергетичного обладнання, яка дозволяє відокремити пористі структури по технологічних ознаках їх створення та тепломасообмінним процесам, що протікають у даних структурах. Сформульована гіпотеза зміни комплексних показників пористої структури під час формування теплоізоляційного матеріалу з вологої сировинної суміші.

У третьому розділі дисертаційної роботи проведено експериментальні дослідження пористих структур вогнетривких теплоізоляційних матеріалів на основі глинозему. Експериментально підтверджено висунуті допоміжні гіпотези для визначення залежностей формування пористої структури теплоізоляційних матеріалів на різних етапах.

У четвертому розділі дисертаційної роботи зроблено математичний опис формування пористої структури для побудови математичної моделі зміни пористої структури у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу під час підведення теплової енергії до неї. Встановлено умови термодинамічної фазової рівноваги агента-пороутворювача в сировинній суміші матеріалу під час формування пористої структури, з урахуванням поверхневого натягу. З'ясовано, якою може бути структура матеріалу та як її отримати.

У п'ятому розділі проведено дослідження впливу розміру, розташування та форми пір на теплопровідність матеріалів. Для визначення впливу комплексних показників пір на електронну складову ефективного коефіцієнта теплопровідності матеріалів було досліджено вплив розміру та розташування пір у теплоізоляційних виробках. Описано установку з визначення теплопровідності пористих електропровідних матеріалів методом електро-теплової аналогії, що було розроблено та запатентовано в процесі проведення досліджень за темою роботи.

У шостому розділі дисертаційної роботи описано процес створення нових високопористих теплоізоляційних матеріалів на основі гіросилікатів. Наведено процес створення високопористого теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему шляхом пресування пластин з наступним їх спіканням. Також запропоновано новий хімічний склад та спосіб приготування суміші для виготовлення композиційного вогнетривкого бетону.

Сьомий розділ присвячено методу формування теплофізичних властивостей матеріалів шляхом створення прогнозованих пористих структур. Одна з розроблених конструкцій – це конструкція теплового захисту, котра складається з перфорованих металевих листів. Для знаходження залежності міцності та ефективного коефіцієнта теплопровідності від визначальних розмірів було використано метод планування експерименту.

Восьмий розділ завершує та узагальнює фізичні та аналітичні дослідження попередніх розділів, присвячений створенню математичної моделі перенесення теплової енергії крізь тіла з пористою структурою.

Наукова новизна отриманих результатів. У результаті теоретичних і експериментальних досліджень були знайдені нові наукові рішення.

1. Вперше встановлено закономірності динаміки формування теплофізичних властивостей пористої структури глиноземистих матеріалів залежно від термодинамічних параметрів та вологості сировинної суміші під час термообробки, що дозволило визначити функціональний зв'язок технологічних параметрів термообробки і коефіцієнта теплопровідності пористого глиноземистого матеріалу.

Висунуто та підтверджено гіпотезу про поетапну зміну кількості пір та їх об'єму під час термообробки сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу. Визначено функціональний зв'язок температури та часу термообробки з ефективним коефіцієнтом теплопровідності. Запропоновані рівняння розрахунку кількості пір для різних процесів генезису. Вперше знайдено узагальнюючий показник зміни кількості пір для глиноземистих матеріалів.

2. Отримано уявлення про електронну складову коефіцієнта теплопровідності пористих конструкцій та знайдено основні параметри, які визначають залежність електронної складової коефіцієнта теплопровідності від пористої структури, що дозволило оптимізувати структурні характеристики елементів конструкцій теплового захисту та визначити вплив електромагнітного поля на електронну складову коефіцієнта теплопровідності.

Підтверджена та уточнена висунута гіпотеза про вплив розміру пір на магнітні поля в електропровідному матеріалі, а також знайдено залежність зміни теплового опору електропровідних елементів конструкцій теплового захисту від розміру, форми та розташування пір у матеріалі, що дозволило рекомендувати практичні заходи по зменшенню ефективного коефіцієнта теплопровідності електропровідних пористих елементів конструкцій енергетичного обладнання.

3. Розвинуто теоретичні уявлення щодо впливу комплексних показників пористої структури на ефективний коефіцієнт теплопровідності матеріалу та отримано нове рівняння ефективного коефіцієнта теплопровідності пористого матеріалу, яке враховує градієнт температури вздовж пори, теплопровідність матеріалу без пір, розмір пори вздовж теплового потоку, розмір пори перпендикулярний теплому потоку та кількість пір на одиницю об'єму, що дозволило розробити метод прогнозування теплофізичних параметрів для закритої пористої структури.

Розробка відрізняється комплексним підходом до визначення ефективного коефіцієнта теплопровідності від структурних показників закритих пір та градієнта температури по матеріалу, який впливає на теплові потоки всередині пір. Отримане рівняння надає можливості визначити тепловий опір пористого матеріалу або конструкції для визначених умов експлуатування та структури, а також надає можливість розв'язувати зворотну задачу імітації для прогнозування теплового опору пористого теплоізоляційного матеріалу.

4. Проведено наукове обґрунтування процесів формування замкнутої сферичної пори під час термообробки сировинної суміші та визначено термодинамічні параметри газу у ній, що дало змогу побудувати модель, яка описує зміну пористості в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему.

Це дає можливість обґрунтовано визначити кількість пір та об'єм пір, що утворюються в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу.

5. Вперше визначена залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності пористих структур від коефіцієнта теплової проникності та геометричних характеристик пористої структури.

Раніше використовувались численні емпіричні характеристики та поправки для розрахунків перенесення енергії крізь пористо-волокнисте тіло. Нові залежності базуються на теорії перенесення теплової енергії флюїдами та дозволяють розрахувати кількість енергії, що проходить крізь пористу структуру, із врахуванням умов експлуатації, лише визначивши попередньо два напівемпіричних коефіцієнта.

6. Розвинута теорія формування теплофізичних властивостей теплоізоляційних та будівельних матеріалів за рахунок визначення впливу процесів тепломасообміну в пористих структурах.

Встановлені закономірності дозволили розробити раціональні процеси виробництва пористого теплоізоляційного матеріалу та елементів теплового захисту з оптимальними теплофізичними характеристиками.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність роботи полягає у вирішенні важливої проблеми підвищення ефективності теплоізоляційних матеріалів та елементів теплового захисту промислового обладнання, а також розроблено та впроваджено:

1. Розроблено метод формування оптимального коефіцієнта теплопровідності пористих матеріалів завдяки зміні пористої структури під час підведення теплової енергії до сировинної суміші.

2. Запропоновано спосіб створення елемента конструкції теплового захисту з перфорованих металевих листів з ефективним коефіцієнтом теплопровідності конструкції 20,77 Вт/(м·К) та границею міцності на стискання 100,235 МПа.

3. Запропоновано технологічні процеси для створення високоякісних теплоізоляційних матеріалів. Для вогнетривкої цегли, (температура під час пресування 200 С; час витримки 10 хв.; обпалювання за температури 1250 С протягом 2 год.), коефіцієнт теплопровідності виробленої цегли із сіоліту з порами дорівнював 0,45 Вт/(м·К), питома теплоємність 0,93 кДж/(кг·К), міцність на стискання 7,1 МПа. Для керамзиту з покращеними теплофізичними властивостями, який використовується як засипка (глиняна суміш спочатку висушується до вологості 38%, потім формуються гранули шляхом пресування сіткою з коміркою 6 × 20 мм; сушіння та формування структури проходить протягом 15 хв. при температурі 270 С; обпалювання за температури 1250 С протягом 1,5 год., коефіцієнт теплопровідності (0,038...0,045) Вт/(м·К), питома теплоємність 0,81 кДж/(кг·К), міцність на стискання (10,6...14,1) МПа. Для виготовлення вогнетривких бетонів (температура термообробки 200 °С, час термообробки 15 хв., початкова вологість суміші 50%), коефіцієнт теплопровідності 0,035 Вт/(м·К);

4. Розроблено та запатентовано установку для вимірювання електронної складової ефективного коефіцієнта теплопровідності металевих та електропровідних пористих конструкцій.

5. Результати дослідження та розроблені нові теплоізоляційні матеріали впроваджені на підприємствах і організаціях України: ВАТ «Мотор Січ», ТОВ «Екסקавація», ТОВ «Тера-Гарант», ЗМЗ ім. В. І. Омельченка АТ «МОТОР СІЧ», ПАТ «МК Запоріжсталь».

6. Розроблено методологію, формування теплофізичних властивостей елементів теплоізоляційних матеріалів шляхом регулювання процесів тепломасообміну в пористих структурах, а також теоретично обґрунтовано особливості процесів енергообміну в пористому середовищі.

7. Знайдено константи перенесення енергії флюїдами та геометричних характеристик пористої структури, а також теплової проникності чотирнадцяти пористих матеріалів, що використовуються як елементи теплового захисту.

8. Реалізація матеріалів дисертації у промисловості дозволила отримати очікуваний сумарний економічний ефект у розмірі 12 277 189,83 грн на рік, що підтверджено актами впровадження.

9. Наукові результати, отримані автором під час роботи над дисертацією, а також методи розрахунків використовуються в навчальному процесі в рамках загальних і спеціальних курсів для студентів теплоенергетичного напрямку Запорізької державної інженерної академії, а також під час виконання індивідуальних курсових завдань, магістерських робіт та для дослідницьких робіт аспірантів.

Зауваження та загальна оцінка роботи. Дисертаційна робота Чейлитко А.О., на мою думку, є завершеним дослідженням за означеною актуальною тематикою. Результати роботи мають беззаперечну накову новизну та практичну цінність. Проте до викладеного дисертаційного матеріалу є ряд зауважень.

Розділ 1. Пункт 1.1.1, ст. 50. Саме конвекція усередині пір збільшує кількість енергії, яка проходить крізь пористий матеріал. Не указано на фізичну суть енергії.

В таблиці 1.1 (стор. 57) наведено залежності ефективного коефіцієнта теплопровідності від пористості для двофазних систем. Вважаю, що автору більш доцільно було б провести дослідження залежності ефективного коефіцієнта теплопровідності від пористості у поперечному і повздовжньому напрямку окремо.

Вважаю, що рисунок 1.2 (сторінка 59) представлено некоректно. Із семи наведених матеріалів шість, згідно графічних відтворених залежностей, можуть мати пористість 100 %. На мою думку, графік варто було б обмежити пористістю у 90 %.

При розрахунку коефіцієнта дифузії (формула 1.4) (ст. 61) використовуються емпіричні коефіцієнти A та n . Автору було б доцільно надати пояснення фізичної суті цих коефіцієнтів, а також навести обґрунтування їх чисельним значенням.

Пункт 1.2, ст. 66, рис. 1.4. Підпис під рис. Зміна діаметра частинки під час її спучення. В дійсності на осі ігрек показана відносна зміна діаметра частинки під час її спучення. При цьому залежність коефіцієнта

теплопровідності кінцевого матеріалу від коефіцієнта спучення виявилася нелінійною (рис.1.6). Рис. 1.6 в даному розділі відсутній.

Розділ 2. У пункті 2.2 автор намагається надати обґрунтування необхідності введення узагальнюючого показника K_0 . (Ст. 94). В подальшому цей показник буде систематично використовуватись автором при вивченні проблеми швидкості утворення пір. Отже, вважаю, що варто було б детально пояснити, для яких саме матеріалів, на думку автора, варто вводити узагальнюючий показник K_0 . Також варто було б навести аргументацію того, що узагальнюючий показник одночасно об'єднує термодинамічні умови формування пір та склад сировинної суміші, які мають різну фізичну природу.

Розділ 3. Графік зміни температури сировинної суміші газобетону, що наведено на рисунку 3.6 (сторінка 120) означено, що проводилося примусове перемішування суміші. На мою думку, автору варто було б проаналізувати вплив такого перемішування (інтенсивність, якість, тривалість у часі) на зміну зовнішньої ($t_{\text{зовн}}$) і внутрішньої ($t_{\text{ц}}$) температури суміші.

Розділ 4. Бажано було б провести аналіз одержаних результатів, а також їх порівняння з практичними даними. В формулах (ст. 139, 152, 153) у фізичних величинах не вказана одиниця виміру.

Розділ 5. В пункті 5.2 наведено дослідження впливу форми пір на коефіцієнт теплопровідності пористих структур. На мою думку, автору варто б приділити більшу увагу способу виготовлення конструкції теплового захисту енергетичного обладнання з каналами, що мають у перетині правильні геометричні фігури. В отриманому рівнянні узагальненого коефіцієнта теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою неясно, чи використовуються відносні величини, чи їх натуральні значення. (Ст. 226).

Розділ 6. При створенні високопористих теплоізоляційних матеріалів необхідно було провести дослідження зі зниження енергоспоживання на одиницю виготовленої продукції і приділити увагу визначенню економічної ефективності від упровадження нової технології в промисловість.

Розділ 7. При створенні високопористих металевих композиційних елементів теплового захисту потрібно було показати, як зменшити собівартість одержаної продукції, як підвищується її якість, яким чином поліпшується екологія навколишнього середовища та умови праці обслуговуючого персоналу, що підкреслює істотне значення даної теми і визначає подальший напрямок наукових досліджень.

Розділ 8. Ст. 290. У реченні: "Для пористого теплоізоляційного матеріалу або елемента конструкції теплового захисту енергетичного обладнання передача енергії крізь пористу структуру буде характеризуватися ефективним коефіцієнтом теплопровідності або тепловим опором". Необхідно було б указати фізичну суть енергії.

Ст. 291. Підпис під рис. 8.2. Лінії току теплоти у пористій структурі конструкції теплового захисту енергетичного обладнання. Слід було б написати: "Лінії поток теплової енергії у пористій структурі конструкції теплового захисту енергетичного обладнання".

Ст. 294, формула 8.2 не зрозуміло, який фізичний смисл введеної величини ϕ «теплова проникність».

Також є деякі окремі помилки в оформленні дисертаційної роботи.

1. В розділі "Особистий внесок здобувача". Ст. 45. Основні методи досліджень розроблені автором самостійно. але не указано в яких роботах.

2. Ст. 48, перший абзац. Значення коефіцієнтів теплопровідності заліза (58,19 Вт/(м·К) та гірської породи (3,26 Вт/(м·К) відрізняються майже в 18 разів. Не вказана назва гірської породи.

3. Ст. 54. У реченні "На даний момент не існує єдиного методу дослідження конвективних токів в пористих структурах теплоізоляційних матеріалів та виробів". Потрібно написати (дослідження конвективних потоків).

4. Ст. 124. У реченні «Оскільки вид залежності зміни вологості при спученні збігається зі зміною вологості при сушці, то було б доцільно проаналізувати криву швидкості зміни вологості сировинної суміші при її термообробці» допущена стилістична і граматична помилка. На мою думку потрібно писати «Оскільки залежність зміни вологості при спученні збігається зі зміною вологості при сушінні, то було б доцільно проаналізувати криву швидкості зміни вологості сировинної суміші під час термообробки».

5. Ст. 124. У реченні «Через великий проміжок по часу складно точно виділити окремі періоди швидкості сушіння,...» допущена стилістична помилка. Потрібно писати «Через великий проміжок часу складно точно виділити окремі періоди швидкості сушіння,...».

6. Ст. 127. У реченні «При цьому швидкість збільшення загальної пористості сировинної суміші вогнетривких зразків постійно зменшується і є максимальною в наприкінці першого етапу – в момент перетворення рідини в...» допущена стилістична помилка. Потрібно писати «При цьому швидкість збільшення загальної пористості сировинної суміші вогнетривких зразків постійно зменшується і є максимальною наприкінці першого етапу – в момент перетворення рідини в...».

7. Ст. 237. У реченні «Перед виробництвом сировина підвергалася помелу у млинах». Неправильно висловлена думка. Потрібно писати «Перед виробництвом сировина підлягала подрібненню у млинах».

7.1. У реченні «Ступінь подрібнення дорівнювала більше сотні (тонкий помел)». Не зрозуміло який розмір подрібнення має сировина?

7.2. У реченні «Поверхня пресу була розроблена таким чином, щоб при пресуванні плит у них обраховувалися отвори 4x15 мм». Неправильно висловлена думка. Потрібно - «Поверхня пресу була розроблена таким чином, щоб при пресуванні плит у них утворювалися отвори 4x15 мм».

7.3. У реченні «Це здійснювалося шляхом варки металевих пластин по поверхні пресу». Не зрозуміло про який технологічний процес іде мова?

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. Основні положення роботи та висновки обґрунтовані та аргументовані,

містять наукову новизну та практичну цінність. На підставі виконаних автором експериментальних та аналітичних досліджень вирішується важлива наукова задача і отримано нові наукові результати, які є суттєвими для подальшого розвитку актуальних напрямків у галузі технічної теплофізики та промислової теплоенергетики і для вирішення прикладних задач, спрямованих на створення нових теплоізоляційних матеріалів. Результати роботи достатньо повно опубліковані в науково-технічній літературі, доповідалися та обговорювалися на міжнародних наукових конференціях. Вважаю, що дисертація у повній мірі відповідає вимогам, що пред'являються до докторських дисертацій за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика, а її автор – Чейлитко Андрій Олександрович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук.

Офіційний опонент
доктор технічних наук, професор,
провідний науковий співробітник
Національний науковий центр
«Харківський фізико-технічний інститут»
Національної академії наук України



В. О. Кутовий