

64-72-68/1
30.05.19

ВІДГУК

офіційного опонента **Дешка Валерія Івановича** на дисертаційну роботу

Чейлитко Андрія Олександровича

**«Розвиток теоретичних основ формування теплофізичних властивостей
теплоізоляційних матеріалів шляхом управління процесами
тепломасообміну в пористих структурах»**

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова
теплоенергетика

Дисертаційна робота складається із анотації, змісту, основної частини, списку використаних джерел, додатків. Загальний об'єм дисертаційної роботи становить 375 сторінок, з них 274 сторінок основного тексту, 122 рисунка, 21 таблиця. Список використаних літературних джерел складає 278 найменувань.

1. Структура дисертації

У *вступі* обґрунтовано вибір теми дослідження; сформульовано мету і задачі досліджень; перелічені зв'язки роботи з науковими програмами, планами, темами; наведено мету і завдання дослідження відповідно до предмета та об'єкта дослідження; перелічені методи дослідження; зазначено новизну, а також практичне значення отриманих результатів; наведено особистий внесок здобувача; наведено відомості про апробацію результатів дисертації та дані про структуру та обсяг дисертації.

У *першому розділі* згідно з викладеними метою та задачами досліджень, проведено аналіз наукових джерел по впливу пористої структури на теплофізичні властивості матеріалу та методам формування пористої структури.

Визначено комплексні показники, які повною мірою відображають пористу структуру і тепломасообмінні процеси у ній: пористість, кількість пір, розташування пір в просторі, форма пори та показники стану газу у порах. Для визначення енергоємності створених пористих теплоізоляційних матеріалів та

даних комплексних показників дозволяє створити технології керованого структуроутворення теплоізоляційного матеріалу з заданими теплофізичними властивостями.

У *другому розділі* викладено обґрунтування зародження пір, кінетику і механізм розвитку структурованих пористих систем. Запропонована класифікація генезису пір у теплоізоляційних матеріалах та конструкціях теплового захисту енергетичного обладнання. Сформульована гіпотеза зміни комплексних показників пористої структури при формуванні теплоізоляційного матеріалу з вологої сировинної суміші.

У *третьому розділі* дисертаційної роботи проведено експериментальні дослідження пористих структур вогнетривких теплоізоляційних матеріалів на основі глинозему. Досліджено вплив вмісту оксиду алюмінію у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу на формування пористої структури вогнетриву та знайдено основні шляхи керування розмірами пір за допомогою хімічних реакцій. Для визначення залежностей формування пористої структури теплоізоляційних матеріалів на інших етапах проведено серії експериментів.

У *четвертому розділі* дисертаційної роботи зроблено математичний опис формування пористої структури для побудови математичної моделі зміни пористої структури у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу при підведенні теплової енергії до неї. Встановлено умови термодинамічної фазової рівноваги агента-пороутворювача в сировинній суміші матеріалу при формуванні пористої структури. Знайдено критичний радіус ядра пори, при якому можливе формування пори. Проаналізовано можливість існування та формування пір у суміші, що спучується. Складено підсумкову модель, що описує зміну пористості в матеріалі на основі глинозему від комплексних показників. Модель верифіковано.

У *п'ятому розділі* дисертаційної роботи проведено дослідження впливу розміру, розташування та форми пір на теплопровідність матеріалів. Було розроблено та запатентовано установку по визначенню теплопровідності пористих електропровідних матеріалів методом електро-теплової аналогії. Встановлено існування відношення габаритного розміру пори до градієнту

температури, при якому розташування пір по відношенню до теплового потоку не впливає на тепловий опір теплоізоляційного матеріалу. Також експериментально виявлено вид залежності коефіцієнта теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів від температури. Знайдено узагальнене рівняння залежності ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих матеріалів від визначених комплексних показників (з урахуванням емпірично визначених особливостей), яке дозволяє розраховувати тепловий опір високопористих матеріалів від основних показників пористої структури.

Шостий розділ дисертаційної роботи присвячено створенню нових високопористих теплоізоляційних матеріалів. Створено високопористий теплоізоляційний матеріал на основі глинозему. Створено вогнетрив шлікерним литтям з раціональною структурою. Створено керамзит з покращеними теплофізичними властивостями для використання в якості засипки. Також для особливих умов підприємства було виготовлено гідросилікати з сировини, що була в наявності на підприємстві. Створено наповнювач для бетонів та вогнетривких бетонів на основі білої глини. Також запропоновано хімічний склад та спосіб приготування суміші для виготовлення композиційного вогнетривкого бетону.

У *сьомому розділі* дисертаційної роботи розглянуто методологію формування теплофізичних властивостей матеріалів і створення прогнозованих пористих структур та складено практичні рекомендації по створенню елементів теплового захисту енергетичного обладнання з металу та композиційних матеріалів з особливими умовами експлуатування.

Восьмий розділ присвячений створенню математичної моделі передачі теплової енергії крізь тіла з пористою структурою. Отримано рівняння, що описує передачу теплової енергії флюїдами у відкритих пористих структурах. Знайдено геометричні характеристики пористої структури та теплову проникність чотирнадцяти пористих матеріалів, що широко використовують у промисловості.

Дисертаційна робота Чейлитко А.О. характеризується логічною послідовністю та завершеністю. Висновки за окремими розділами, а також

загальні висновки по роботі відповідають поставленим завданням та отриманим науковим і практичним результатам.

2. Актуальність теми дисертації

Одним з завдань енергетичної стратегії України на період до 2030 року є зниження питомих витрат енергоносіїв в виробництві та енергоємності продукції за рахунок впровадження енергозберігаючого обладнання та використання сучасних засобів збереження енергії. До таких засобів відносяться елементи теплового захисту енергетичних установок та сучасні теплоізоляційні матеріали, такі як: вогнетриви, керамзит, піноскло, пінобетон.

Як правило сучасні засоби теплового захисту енергетичного обладнання відрізняються високою вартістю та вузькою спеціалізацією щодо умов роботи обладнання. Тому виконання наукових досліджень спрямованих на розробку універсальних високоефективних матеріалів для теплового захисту та розвиток теоретичних основ для формування теплофізичних властивостей та розробку нових типів цих матеріалів залишається актуальною проблемою.

3. Мета і завдання досліджень

Мета дисертаційної роботи - розвиток теоретичних основ формування теплофізичних властивостей макропористих теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкцій теплового захисту шляхом регулювання процесів тепломасообміну при створенні пористих структур, теоретичне обґрунтування особливостей процесів енергообміну у пористому середовищі, створення нових типів макропористих матеріалів та елементів теплового захисту. Основні завдання, які підлягали вирішенню для досягнення поставленої мети, можна сформулювати таким чином:

3.1 провести аналіз закономірностей впливу макропористої структури на теплофізичні властивості матеріалу та визначити комплексні показники, які повною мірою відображають пористу структуру і тепломасообмінні процеси у ній;

3.2 емпірично дослідити особливості процесу тепломасообміну при формуванні пористої структури, вплив методів формування пористої структури

функціональні залежності показників структури теплоізоляційних матеріалів від підведеної енергії;

3.3 емпірично дослідити функціональний зв'язок параметрів процесу утворення пористої структури різних гідросилікатів від технологічних параметрів для розробки розрахункової моделі прогнозування пористих структур;

3.4 дослідити зміну процесів енергообміну при варіюванні комплексних показників в пористому середовищі та знайти функціональну залежність коефіцієнта теплопровідності пористих матеріалів й виробів від комплексних показників пористої структури з врахуванням впливу конвекції в порах для знаходження таких рівнів варіювання комплексних показників пористої структури, що включали б екстремальні функціональні значення коефіцієнту теплопровідності пористого теплоізоляційного матеріалу;

3.5 отримати узагальнене рівняння залежності ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих матеріалів від визначених комплексних показників (з урахуванням знайдених областей визначення), яке дозволить розраховувати термічний опір теплопровідності високопористих теплоізоляційних матеріалів та виробів залежно від комплексних показників пористої структури;

3.6 знайти умову термодинамічної фазової рівноваги пори та час її виникнення в початковій сировинній суміші для прогнозування теплофізичних властивостей пористого матеріалу на першій стадії утворення пір;

3.7 розробити розрахункову математичну модель, яка описує пористу структуру матеріалу на стадії формування пір у сировинній суміші завдяки підведенню теплоти з урахуванням хімічних реакцій;

3.8 розробити методологію формування теплофізичних властивостей матеріалів шляхом управління процесами тепломасообміну в пористих структурах та скласти практичні рекомендації щодо створення ізоляційних високопористих матеріалів (вогнетриву з мінімальним коефіцієнтом теплопровідності та з достатньою міцністю; керамзиту для домішування у бетонну суміш та для використання в якості засипки; ізоляційних виробів з металу та композиційних матеріалів з особливими умовами експлуатування);

3.9 розробити розрахункову модель перенесення теплової енергії крізь пористі та волокнисто-пористі структури.

4. Наукова новизна дисертаційної роботи

Серед наукових результатів дисертацій, одержаних вперше, можна відзначити такі:

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

Виявлено характеристики поетапної зміни 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 пір та вперше знайдено узагальнюючий показник зміни кількості пір для глиноземистих матеріалів.

4.2. Отримали подальший розвиток відомі 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 електронну складову коефіцієнта теплопровідності.

Визначено 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.

4.3. Розвинуто теоретичні уявлення щодо впливу комплексних показників пористої структури на ефективний коефіцієнт теплопровідності

матеріалу та отримано нове рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності пористого матеріалу, яке враховує градієнт температури вздовж пори, теплопровідність матеріалу без пір, розмір пори вздовж теплового потоку, розмір пори перпендикулярний тепловому 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 в залежності від структурних показників закритих пір та градієнта температури по матеріалу, який впливає на конвективні потоки всередині пір. Отримане рівняння надає можливості визначити тепловий опір пористого матеріалу або конструкції для визначених умов експлуатування та структури.

4.4. Отримало подальший розвиток 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.

Модель відрізняється врахуванням зміни густини сировинної суміші та тиску агента-пороутворювача у сировинній суміші матеріалу в залежності від умов термообробки. Це дає можливість обґрунтовано визначити кількість пір та об'єм пір, що утворюються в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу.

4.5. Вперше визначена залежність ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих структур із відкритою пористістю від коефіцієнта теплової проникності та геометричних характеристик пористої структури.

4.6. Надано розвитку теорії формування теплофізичних властивостей теплоізоляційних та будівельних матеріалів за рахунок визначення впливу процесів тепломасообміну в пористих структурах.

Регулювання процесів тепломасообміну в пористих структурах здійснюється за рахунок градієнту температури, розміру та кількості пір. Раніше подібні залежності в теплоізоляційних матеріалах не враховували

розроблені комплексні показники, що повною мірою відображають пористу структуру і тепломасообмінні процеси у порах.

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

5. Практична цінність дисертаційної роботи

Практична цінність роботи полягає у вирішенні важливої проблеми підвищення ефективності теплоізоляційних матеріалів та елементів теплового захисту промислового обладнання, а також розроблено та впроваджено нові теплоізоляційні матеріали на наступних підприємствах і організаціях України: ВАТ «Мотор Січ», ТОВ «Екסקавація», ТОВ «Тера-Гарант», ЗМЗ ім. В.І.Омельченко АТ «МОТОР СІЧ», ПАТ «МК Запоріжсталь». Реалізація матеріалів дисертації в промисловості дозволила отримати сумарний економічний ефект в розмірі 12 277 189,83 грн на рік, що підтверджено актами впровадження.

6. Достовірність результатів дисертаційної роботи

Достовірність наукових результатів підтверджена зіставленням з результатами інших авторів, застосуванням сучасних методик експериментальних та теоретичних досліджень, коректністю фізичних припущень та позитивним досвідом впровадження результатів дисертаційної роботи.

Основні наукові положення і результати роботи, що відповідають тематиці дисертації, знайшли апробацію на міжнародних та вітчизняних науково-технічних та науково-практичних конференціях. За результатами роботи отримано 3 патенти України.

7. Повнота викладу основних результатів роботи в опублікованих працях

Основні результати роботи опубліковані в 48 друкованих працях, у тому числі: 3 монографіях; 33 статтях в спеціалізованих журналах (22 в фахових; 8 міжнародних виданнях; 1 в електронному ресурсі), з них 5 статей входять до

конференцій. Персональний внесок дисертанта в роботах, опублікованих у співавторстві, відображено в авторефераті та анотації дисертаційної роботи.

Зміст автореферату й основних положень дисертації ідентичні.

Зауваження та пропозиції до дисертації

1. В роботі більше уваги слід було б приділити впливу складу суміші на пороутворення і керування розмірами пір за допомогою хімічних реакцій, а також на показники впливу на міцність на стискання при створенні високопористих матеріалів. Доцільно було б провести дослідження ролі радіаційного теплообміну в пористих елементах захисту енергетичного обладнання.

2. Для ефективного використання результатів роботи доцільно було б мати схему оптимізації створення теплоізоляційного матеріалу виходячи із інтегрованої вартості виробництва та заощадженого тепла, у рамках життєвого циклу, та аналогічно – для екологічних або енергетичних критеріїв. По-друге, поєднувати питання тепломасообміну в пористих структурах та у пічному середовищі.

3. Зміст розділу «3.2 Регулювання процесу пороутворення в матеріалах на основі екзотермічної реакції» та його висновки не в повній мірі відповідають його назві.

4. Відсутнє визначення термінів «Константа швидкості пороутворення і константа зростання пористості, стор.122». Яке співвідношення їх поверхневих та об'ємних значень?

5. Аналіз матеріалів розділу 4 ускладнює використання різних позначень без пояснень, наприклад P , P_{σ} , P_{Γ} – тиск (навколишньої сировинної суміші?).

6. Для визначення теплопровідності електропровідних пористих матеріалів через число Лоренца, стор.159, використано електротеплову аналогію, тому висновок «Електромагнітне поле, що виникає в отворах електропровідних структур під час протікання струму крізь них, впливає на коефіцієнт теплопровідності», на наш погляд, потребує підтвердження прямими теплотехнічними вимірюваннями

7. При визначенні впливу конвекції на теплоперенос у порах: в розділі 5.3, стор.184, яким було значення товщини модельної пластини? У чому причина різниці теплових потоків на зовнішніх поверхнях теплообміну розрахункової моделі, стор.199, рис.5.29? На стор.200 зазначено, що при невеликому тепловому потоку 10 Вт/м^2 тепловий опір менший за тепловий опір при тепловому потоку 100 Вт/м^2 , що не відповідає рис.5.30. Позначення до таб.5.14, стор.224, потребують додаткових пояснень. Доцільно було б провести дослідження впливу на конвекцію у порах відносних напрямів теплового потоку та сили тяжіння.

8. Використання вимірювача теплопровідності ИТП-МГ4 фірми «СКБ Стройприбор» для визначення теплопровідності модельного зразка з порами великого розміру, стор.202, потребує обґрунтувань.

9. Модель теплового потоку крізь пористе тіло з тепловими трубками, стор. 290, рис. 8.1, потребує додаткових пояснень та обґрунтувань. Доречно було б співставити запропоновані «Характеристики пористої структури та теплову проникність» (таб.8.1, стор.317) з традиційними даними теплопровідності пористих структур теплоізоляційних матеріалів.

10. Розроблена пустотна цегла та гідросилікатні блоки розглядаються у роботі тільки в якості теплового захисту для промисловості, хоча можлива їх галузь застосування набагато ширше.

11. Потрібні деякі редакційні правки, це вживання некоректної термінології, україномовної науково-технічної лексики: рівність нулю приватних похідних, стор. 251; питомий тепловий потік, стор. 290; водяні пари, стор. 127; позначення коефіцієнту теплопровідності у закодованому і розкодованому вигляді, стор. 225, мабуть потрібні різні та ін.

Наведені зауваження не є принциповими, певною мірою можуть бути віднесені до пропозицій і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, яка рецензується.

Дисертаційна робота Чейлитко Андрія Олександровича «Розвиток теоретичних основ формування теплофізичних властивостей теплоізоляційних

структурах» є повністю завершеною науковою роботою, у якій вирішується важлива науково-технічна проблема формування теплофізичних властивостей шляхом управління процесами тепломасообміну в пористих структурах та створення нових теплоізоляційних матеріалів та конструкцій.

За актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, висновків та рекомендацій, отриманими новими науковими результатами та їх практичною цінністю дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» та відповідає вимогам п.9,10 «Порядку присудження наукових ступенів» до докторських дисертацій, а її автор Чейлитко Андрій Олександрович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика».

Офіційний опонент
завідувач кафедри теплотехніки
та енергозбереження Національного
технічного університету України
"Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського" МОН України
доктор технічних наук, професор



В.І. Дешко

Підпис Дешка Валерія Івановича, засвідчую:
Вчений секретар
КПІ ім. Ігоря Сікорського



А.А. Мельниченко