

ВІДГУК

офіційного опонента – доктора технічних наук, професора

ГАНЖІ Антона Миколайовича

на дисертаційну роботу **Чейлитко Андрія Олександровича**

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

яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – “Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика”

1. Актуальність обраної теми

Дисертаційна робота є закінченим науковим дослідженням і присвячена комплексному вирішенню проблем формування теплофізичних властивостей теплоізоляційних матеріалів шляхом управління процесами тепломасообміну в пористих структурах з метою створення нових та покращенню вже існуючих пористих теплоізоляційних матеріалів та конструкцій з них для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок.

В умовах економічної кризи та курсу до енергетичної незалежності України покращення теплофізичних характеристик елементів теплового захисту енергетичного обладнання є актуальною проблемою. До пористих елементів теплового захисту енергетичного обладнання відносять спінені матеріали, газобетони, деякі високовогнетривкі матеріали, піноскло, керамзит, деякі композити, тощо. При докладному аналізуванні технології виготовлення будь-якого з наведених матеріалів можливо зробити висновок, що існує залежність між теплофізичними властивостями пористого матеріалу та його пористою структурою. Але питання про достатність основних ознак пористості до сих пір не піднімалося.

Експериментальні дані, як дослідницькі, так і виробничі, з оптимальних технологічних вимог спучення сировинної суміші теплоізоляційних матеріалів для теплового захисту енергетичного обладнання також відмінні, тому що не існує теорії, яка узагальнює тепломасообмінні процеси, що відбуваються при формуванні пористої структури. Вищезазначене доводить необхідність розробки узагальнюючих комплексних показників пористої структури, достатніх для управління теплофізичних властивостей пористого матеріалу та створення методології визначення оптимальних режимів технологічних процесів створення пористих теплоізоляційних матеріалів.

2. Основні наукові положення, висновки і рекомендації, що сформульовані у дисертації, ступінь їх обґрунтованості і достовірності

Наукові положення, висновки і рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі Чейлитко А.О. є достатньо обґрунтованими із застосування інноваційних методів дослідження, базуються на математичному моделюванні з залученням сучасних прикладних програм, експериментальних лабораторних дослідженнях, узагальнені та аналізі результатів моделювання та отриманих експериментальних даних.

Наведені в роботі теоретичні положення є обґрунтованими, експериментальні дослідження виконанні коректно на достатньо високому науковому рівні.

Висновки, які сформульовані в дисертаційній роботі, містять нові наукові положення щодо особливостей використання та створення пористих теплоізоляційних матеріалів та елементів теплового захисту енергетичного обладнання. У висновках обґрунтована доцільність використання комплексного підходу до перенесення енергії крізь пористу структуру, що дозволяє досягти підвищення якості існуючих теплоізоляційних матеріалів з визначеними умовами експлуатації й створити нові вогнетривкі матеріали та конструкції.

3. Наукова новизна дисертаційної роботи.

Автором отримані наступні основні наукові результати:

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.

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 вплив електромагнітного поля на електронну складову коефіцієнта теплопровідності.

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.

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.

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

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

4. Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення роботи полягає в наступному: на основі узагальнення запропонованих автором теоретичних та експериментальних результатів підвищено ефективність теплоізоляційних матеріалів та елементів теплового захисту промислового обладнання, а також розроблено та впроваджено метод формування оптимального коефіцієнта теплопровідності пористих матеріалів завдяки зміні пористої структури під час підведення теплової енергії до сировинної суміші, що дозволяє запропонувати технологічні процеси для створення високоякісної продукції вогнетривів та керамзиту.

Результати дослідження та розроблені нові теплоізоляційні матеріали впроваджені на таких підприємствах і організаціях України: ВАТ «Мотор Січ», ТОВ «Екסקавация», ТОВ «Тера-Гарант», ЗМЗ ім. В.І.Омельченко АТ «МОТОР СІЧ», ПАТ «МК Запоріжсталь». Реалізація матеріалів дисертації у промисловості дозволила отримати очікуваний сумарний економічний ефект в розмірі 12 277 189,83 грн на рік, що підтверджено актами впровадження.

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.

5. Повнота викладення наукових положень, висновків та рекомендацій в опублікованих працях.

Основні результати досліджень автора опубліковані в 48 друкованих працях, зокрема: 3 монографіях; 33 статтях в спеціалізованих журналах (22 у фахових; 8 міжнародних виданнях; 1 в електронному ресурсі), з них 5 статей входять до бази SCOPUS; 3 патентів; 9 у матеріалах і працях міжнародних наукових конференцій. Матеріали наукової праці автора пройшли широку і регулярну апробацію на міжнародних конференціях та семінарах протягом 2012 – 2018 років.

Також результати дисертаційної роботи доповідалися на науковому семінарі кафедри будівельної фізики й відновлюваних джерел енергії Свентокшинської політехніки (Politechnika Świętokrzyska, м. Кельце, Польща), на міжкафедральному науковому семінарі Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" та на міжкафедральному науковому семінарі Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

6. Аналіз змісту дисертації

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 додатків. Список використаних літературних джерел становить 278 найменувань.

У вступі автором 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.

В першому розділі дано аналіз стану проблеми створення, використання і експлуатації пористих теплоізоляційних матеріалів та конструкцій теплового захисту, здатних забезпечити високу енергетичну ефективність енергетичного обладнання. Висвітлено проблему формування теплофізичних властивостей теплоізоляційних матеріалів шляхом управління процесами тепломасообміну в пористих структурах з метою створення нових та покращенню вже існуючих пористих теплоізоляційних матеріалів та конструкцій.

Сформована робоча гіпотеза керованого структуроутворення матеріалів та формування його теплофізичних властивостей. На основі робочої гіпотези 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.

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, яка дозволяє відокремити пористі структури по технологічним ознакам їх створення та тепломасообмінним процесам, що протікають у даних структурах.

Визначені рівняння швидкості пороутворення і кількості пір для розрахунку кількості пір та їх об'єму на першому етапі утворення пір у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу.

Висунута допоміжна гіпотеза про поетапну зміну кількості пір та об'єму пір у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу під час формування його структури та визначені рівняння швидкості пороутворення і кількості пір у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу для першого етапу формування пористої структури. Отримані залежності надали можливість визначити емпіричні дослідження, які необхідні провести для кожного окремого випадку пороутворення.

У третьому розділі представлені результати експериментальних досліджень пористих структур теплоізоляційних матеріалів. Описано принципову схему пороутворення у сировинній суміші гранули керамзиту. Отримано рівняння зміни питомого тепловиділення основи газобетону в часі, що дозволяє спрогнозувати тепловиділення суміші, що спучується. Також підтверджується висунуту додаткову гіпотезу про поетапну зміну кількості пір в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу. Емпірично досліджено особливості процесу тепломасобміну при формуванні пористої структури, вплив методів формування пористої структури на кінцеві теплофізичні характеристики глиноземистих матеріалів та визначено функціональні залежності показників структури теплоізоляційних матеріалів від підведеної енергії.

Одержані результати використані для визначення основних закономірностей зміни кількості пір і пористості в глиноземистих матеріалах під час їх термообробки, що дозволяє прогнозувати характеристики підсумкової пористості матеріалу та управляти теплофізичними властивостями глиноземистого теплоізоляційного матеріалу змінюючи технологічні режими процесу термообробки та склад сировинної суміші.

У четвертому розділі наведено математичний опис формування пористої структури для побудови математичної моделі зміни пористої структури у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу під час підведення теплової енергії до неї. Знайдено умову термодинамічної фазової рівноваги пори та час її виникнення в початковій сировинній суміші для прогнозування теплофізичних властивостей пористого матеріалу на першій стадії утворення пір. Розроблено розрахункову математичну модель, яка описує пористу структуру матеріалу на стадії формування пір у сировинній суміші за рахунок підведення теплоти з урахуванням можливості виділення енергії за рахунок хімічних реакцій.

Запропоновано узагальнюючий показник пористої структури, що чисельно дорівнює кількості центрів пороутворення. Знайдено критичний радіус ядра пори,

за якого можливе формування пори. Визначено рівняння збільшення об'єму пори у сировинній суміші на різних етапах утворення пір.

Одержані аналітичні залежності дозволили створити метод оцінки впливу пористої структури на енергоємність виробництва пористих теплоізоляційних матеріалів. Для визначення кількості енергії, що необхідно підвести до сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу для формування необхідних теплофізичних властивостей, визначене підсумкове рівняння теплового балансу зростаючої пори в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу під час його термообробки з урахуванням ізотермічної стадії.

У п'ятому розділі наведено результати дослідження впливу розміру, розташування та форми пір на теплопровідність матеріалів.

Шляхом числового моделювання досліджено зміну процесів енергообміну при варіюванні комплексних показників в пористому середовищі та знайдено 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 до себе екстремальні функціональні значення коефіцієнту теплопровідності пористого теплоізоляційного матеріалу.

За допомогою методу планування експерименту отримано узагальнене рівняння залежності ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих матеріалів від визначених комплексних показників (з урахуванням емпірично визначених особливостей тепломасообмінних процесів), яке дозволяє розраховувати тепловий опір високопористих теплоізоляційних матеріалів та виробів від комплексних показників пористої структури.

Використання результатів досліджень дозволило значно зменшити коефіцієнт теплопровідності сучасних теплоізоляційних матеріалів та елементів теплового захисту промислових енергетичних установок, що підвищить енергоефективність промисловості держави. Данні результати також дозволять сформувати необхідний коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу, задаючи характеристики пористої структури.

У шостому розділі представлені результати експериментальних досліджень по створенню нових високопористих теплоізоляційних матеріалів на основі гідроксилатів. Розроблено 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).

Використовуючи розроблену методологію та в результаті розв'язання задачі оптимізації описано спосіб виготовлення вогнетривкої цегли набором пластин з заданими структурними характеристиками; керамзиту з покращеними теплофізичними властивостями для використання в якості засипки; наповнювачу для бетонів та вогнетривких бетонів на основі білої глини та знайдено оптимальні параметри термообробки; вогнетриву шлікерним литтям з раціональною структурою та визначено його оптимальні технологічні параметри виготовлення; гідросилікату для теплової ізоляції будівель, споруд та енергетичного обладнання; запропоновано новий хімічний склад та спосіб приготування суміші для виготовлення композиційного вогнетривкого бетону.

У сьомому розділі представлено методи формування теплофізичних властивостей матеріалів шляхом створення прогнозованих пористих структур та складено практичні рекомендації зі створення елементів теплового захисту енергетичного обладнання з металу та композиційних матеріалів з особливими умовами експлуатування. Методом регуляторного симплексу отримано оптимальні геометричні значення комірки елемента теплового захисту з композиційного матеріалу.

Отримані результати можуть бути впроваджені у вже існуючі технології виробництва композиційних сендвіч-панелей, або служити базисом для розробки сучасніших матеріалів.

У восьмому розділі запропоновано нову розрахункову модель перенесення теплової енергії крізь пористі та волокнисто-пористі структури, завдяки чому стало можливим визначити коефіцієнт теплової проникності та геометричну характеристику пористої структури теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкцій теплового захисту.

Раніше використовувались численні емпіричні характеристики та поправки для розрахунку 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, з врахуванням умов експлуатації. Так, знайдено добутки констант інтегрування рівняння перенесення енергії флюїдами та геометричних характеристик пористої структури, та теплової проникності чотирнадцяти пористих матеріалів, що використовуються як елементи теплового захисту.

Мова та стиль написання дисертації відповідають вимогам до науково-технічних текстів та публікацій.

Текст автореферату повністю відображає зміст дисертації та сформульовані у ній положення.

Результати кандидатської дисертації автора не були використані у його докторській дисертації.

7. Дискусійні положення та зауваження щодо дисертаційного дослідження.

Разом з тим, при ознайомленні з дисертаційною роботою виникли деякі зауваження:

7.1. В кінці першого розділу наведено енергетичний баланс процесу утворення пір у сировинній суміші під час підведення теплової енергії у загальному вигляді. Враховуючі, що не всі складові теплової енергії мають місце в конкретних процесів створення теплоізоляції, бажано було б розглянути і частинні енергетичні баланси: окремо для вогнетривів, окремо для піноскла, окремо для газобетону, тощо.

7.2. У п. 3.2 з тексту до таблиці 3.5 незрозуміло, яким чином визначались експериментальні дані по температурах на поверхні і всередині зразка з газобетону та тепловий потік, що наведені у цій таблиці. Також відсутні розділи з оцінки похибки експериментальних досліджень.

7.3. На мою думку твердження автора, приведені на стор. 126, 130 «Це підтверджує висунуту додаткову гіпотезу та робить її теоремою» не досить коректне.

7.4. У п'ятому розділі наведено узагальнене рівняння теплопровідності пористих матеріалів, знайдене методом планування експерименту, але не наведена його довірча ймовірність.

7.5 У п. 5.2 говориться про комп'ютерне моделювання та теплові розрахунки, але не приведені вихідне диференціальне рівняння крайової задачі з граничними умовами. Те саме стосується п. 5.3, але тут також не приведені граничні умови теплообміну у порах.

7.6. Для розробленої математичної моделі, яка описує пористу структуру гідросилікату на стадії формування пір у сировинній суміші за рахунок підведення теплоти, бажано б було вказати довірчий інтервал.

7.7. При визначенні теплофізичних характеристик розроблених вогнетривів, бажано б було навести коефіцієнт теплопровідності кладки.

7.8. Не співпадають розмірності лівої і правої частин у формулах для різниці температур на стор. 292, а також у формулах на стор. 294.

7.9. З виводу рішення диференціального рівняння (формули (8.7) – (8.13) тільки в кінці становиться зрозуміло, чому коефіцієнт b дорівнює c (тобто з умови $K \rightarrow 1$). Незрозуміло, як прийняте припущення $c^2 = -ad$ впливає на кінцевий результат.

7.10. Теплофізичні характеристики матеріалів, які були отримані у результаті роботи та які пройшли апробацію на підприємствах, доцільно було б розглянути з точки зору їх зміни в часі.

7.11. По тексті дисертацій зустрічаються орфографічні помилки, описки у написанні деяких формул.

8. Висновок

На основі вивчення змісту дисертаційної роботи, автореферату та основних публікацій за темою досліджень вважаю, що дисертація є завершеною науковою працею автора, в якій поставлена та розв'язана важлива науково-практична проблема, що є вагомим внеском в енергозберігаючі технології та підвищення енергоефективності теплоенергетичної галузі. Автор вперше створив науково-обґрунтовану методологію енергоефективного створення пористих теплоізоляційних матеріалів та конструкцій з врахуванням умов їх експлуатації.

Загальна оцінка дисертаційної роботи позитивна, вона виконана на високому науковому рівні, має вагомим практичне значення. Вважаю, що дисертація задовольняє вимогам п. 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567, які пред'являються 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 енергоефективних технологій
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»,
доктор технічних наук за спец. 05.14.06,
професор

А.М. Ганжа

