Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

Чейлитко Андрій Олександрович

УДК 536.2.022+536.24.023+691.421-478

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

Спеціальність 05.14.06 - технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів - 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теплоенергетики в Запорізькій державній інженерній академії Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Павленко Анатолій Михайлович
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри будівельної механіки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дешко Валерій Іванович
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", завідувач кафедри теоретичної та промислової теплотехніки

доктор технічних наук, професор
Ганжа Антон Миколайович
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій.

доктор технічних наук, професор
Кутовий Володимир Олександрович
Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут”
Національної академії наук України, провідний науковий співробітник

Захист відбудеться «14» червня 2019 р. о 14 годині 00 хвилині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04, Національний університет «Львівська політехніка», 79013, м. Львів, вулиця Степана Бендери, 12, а.226

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці національного університету «Львівська політехніка» за адресою 79013, м. Львів, вулиця Професорська, 1

Автореферат розісланий «__» _____ 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент Ю.З. Вашкурак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. 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.

Здебільшого у сучасних наукових роботах, що розглядають пористі матеріали, вирішуються завдання пов'язані з конкретними пористими структурами, але в них відсутній єдиний метод описання комплексних показників пористої структури та невизначено пористість як середовище з особливими умовами протікання теплової енергії крізь нього.

Серед робіт науковців, що описують теплофізичні характеристики різноманітних теплоізоляційних пористих матеріалів, а також тепломасообмінні процеси у них, варто виділити роботи вчених Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України, Київського політехнічного інституту ім. Сікорського, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», національного університету «Львівська політехніка». Але в даних роботах основна увага приділена конкретним пористим матеріалам з визначеною пористою структурою. Тому необхідно експериментально дослідити динаміку формування пористої структури теплоізоляційних матеріалів та визначити методологію знаходження функціонального зв'язку технологічних параметрів і структурних характеристик для пористих матеріалів. Маючи методи формування теплофізичних властивостей шляхом створення прогнозованих пористих структур та знання тепломассообміних процесів, що протікають у цих структурах, можна покращити якість будь-яких високопористих матеріалів які використовуються для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок.

Для формування заданого термічного опору теплопровідності пористих матеріалів необхідне узагальнене рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності для високопористих матеріалів, якого досі не існує. Також узагальнене рівняння ефективного коефіцієнту 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 задачею, корисною для промисловості України.

Також необхідні основні практичні рекомендації для технологів підприємств, які будуть справедливі для широкого спектру виробництва будь-якого пористого матеріалу з відомими умовами експлуатації. На даний час, загальних практичних рекомендацій по формуванню таких пористих структур з метою створення високоякісної ізоляції не існує. Для цього необхідно знайти умови формування замкнутої пористої структури та термодинамічні параметри газу в закритій порі, що формується у сировинній суміші. Необхідно отримати рівняння розрахунку ефективного коефіцієнту теплопровідності та створити методологічні

основи формування прогнозованої пористої структури із заданими теплофізичними характеристиками для будівельних та теплоізоляційних матеріалів.

Оскільки на даний час Україна переживає кризу та являється енергетично залежною від інших країн, то зниження енергоємності продукції шляхом створення високоякісної теплової ізоляції енергетичного обладнання з заданими теплофізичними властивостями вирішує актуальну проблему енергетики.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами 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.

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.

Дисертаційна робота виконана відповідно до енергетичної стратегії України на період до 2035 року (затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України 18 серпня 2017 р. № 605-р). Результати роботи скеровані на вирішення завдань, поставлених в «Державній цільовій програмі модернізації комунальної теплоенергетики на 2012–2016 роки» та «Концепції Державної цільової науково-технічної програми розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу України на період до 2020 року», в галузевих і регіональних програмах підвищення енергоефективності та зниження споживання енергоресурсів. Тематика дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри «Теплоенергетика та гідроенергетика» Запорізької державної інженерної академії (ЗДІА). Питання і проблеми, розглянуті в дисертаційній роботі, відповідають Державній програмі енергозбереження та планам Міністерства освіти і науки України.

Мета і завдання дослідження. *Мета дисертаційної роботи* - розвиток теоретичних основ формування теплофізичних властивостей макропористих теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкцій теплового захисту шляхом регулювання процесів тепломасообміну в пористих структурах, а також теоретичне обґрунтування особливостей процесів енергообміну у пористому середовищі.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі *завдання:*

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;

2) емпірично дослідити особливості процесу тепломассобміну при формуванні пористої структури, вплив методів формування пористої структури на кінцеві теплофізичні характеристики глиноземистих матеріалів та визначити функціональні залежності показників структури теплоізоляційних матеріалів від підведеної енергії;

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

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;

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;

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;

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

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);

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

Об'єктом дослідження є теплофізичні властивості пористих теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкцій теплового захисту.

Предметом дослідження є закономірності формування теплофізичних властивостей матеріалу від комплексних показників макропористих структур та енергообмінні процеси, що відбуваються у пористих теплоізоляційних матеріалах та елементах теплового захисту.

Методи дослідження. Дослідження проблем, що розглядаються у дисертації, ґрунтуються на уявленнях класичної термодинаміки та теорії тепломасообміну у пористих середовищах. Для аналітичного розв’язання систем диференційних рівнянь застосовувалися методи диференціального і інтегрального числення, методи оптимізації (метод Лагранжа, метод пошуку за симплексом) та методи розв’язування задач нелінійного програмування (метод Лагранжа з умовами Куна – Такеру).

Експериментальні методи дослідження були лабораторними доводочними, лабораторними дослідницькими та лабораторними контрольними.

Для статистичної обробки експериментальних даних використовувалася програма Statistica 10.0. Для побудови комп'ютерних моделей використовувалася програма Solid Works. Для комп'ютерного моделювання фізичних процесів використовувалася програмна продукція Ansys.

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

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.

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 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 від структурних показників закритих пір та градієнту 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, а також надає можливості розв'язувати зворотну задачу імітації для прогнозування теплового опору пористого теплоізоляційного матеріалу.

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

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

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, лише визначивши попередньо два напівемпіричних коефіцієнта.

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.

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. Для особливих умов експлуатації споруд та енергетичного обладнання 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 високоякісної продукції вогнетривів та керамзиту: для вогнетривкої цегли, виготовленої набором пластин з заданими структурними характеристиками (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 підсушується до вологості 38 % та формуються гранули шляхом пресування сіткою з коміркою 6 × 20 мм; сушка та формування структури - 15 хв. за 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 наповнювачу бетонів та вогнетривких бетонів на основі білої глини (температура термообробки 200 ºС, час термообробки 15 хв., початкова вологість суміші 50 %), коефіцієнт теплопровідності 0,035 Вт/(м·К); для вогнетривів, створених шлікерним литтям з раціональною структурою (попередня термообробка у печі протягом 15 хв. за температури 272 °С; основна термообробка - протягом 1,5 год. за температури 1200 °С), коефіцієнт теплопровідності 0,44 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 таких підприємствах і організаціях України: ВАТ «Мотор Січ», ТОВ «Екскавация», ТОВ «Тера-Гарант», ЗМЗ ім. В.І.Омєльченко АТ «МОТОР СІЧ», ПАТ «МК Запоріжсталь».

6. Розроблено методологію, а також експериментальну установку для знаходження добутків констант інтегрування рівняння перенесення енергії флюїдами та геометричних характеристик пористої структури, та теплової проникності пористих матеріалів.

7. 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.

8. Реалізація матеріалів дисертації у промисловості дозволила отримати очікуваний сумарний економічний ефект в 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 напряму Запорізької державної інженерної академії, а також під час виконання індивідуальних курсових завдань, магістерських робіт та для дослідницьких робіт аспірантів.

Особистий внесок здобувача. Основні методи досліджень розроблені автором самостійно. У спільних опублікованих роботах особистий внесок автора полягає у: [5, 8] проведенні дослідження впливу пористості на теплопровідність

матеріалу; [6] аналітичних розрахунках та визначенні загальних принципів пороутворення; [7,11] розробці методології дослідження та схеми установки; [12] розробці методології дослідження та проведення експериментів в розрахунку ефективного коефіцієнту теплопровідності; [13, 14] розрахунку умов рівноваги пори в суміші матеріалу та критичного радіусу ядра пори; [17] розрахунку термодинамічних параметрів ядра пори; [19] розробці концепції та методів дослідження впливу форми пір на термічний опір теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів; [20] розробці методів дослідження, проведення експериментів, оптимізації цільової функції; [21] комп'ютерному моделюванню теплового потоку крізь металеві перфоровані пластини з урахуванням конвекції; [22] розробці методу дослідження впливу форм пори на теплопровідність матеріалів; [23] розробці методу створення високопористого вогнетриву та проведенні експериментів; [25] розрахунку енергетичного балансу; [27] розробці методу створення керамзиту заданого хімічного складу з мінімальним коефіцієнтом теплопровідності, [28] розробці розрахункової моделі перенесення теплової енергії крізь закриті пористі структури, [29, 30] проведенні експериментальних дослідів теплової ізоляції та знаходження оптимальних геометричних розмірів запропонованої конструкції; [31] проведені та обробці експериментальних дослідів та аналітичного вирішення поставленої задачі; [32] оптимізації фізичних властивостей сплаву; [33] проведені експериментальних кінетичних дослідів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи докладалися на таких міжнародних конференціях: VIII Міжнар. наук.–практ. конф. присвячена 40–літтю КарГУ ім. Е.А. Букетова «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент» (Казахстан, Караганда 18 – 20 червня 2012; 8 Міжнар. наук.–практ. конф. «Охорона навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку України» (Запоріжжя, ЗДІА, грудень 2012); наук.–практ. конф. студентів і молодих вчених «Молода академія 2013» (Дніпро, НМетАУ, 2013); Міжнар. наук.–практ. конф. «Наукові підсумки 2013 р.» (Харків, грудень, 2013); XVII Міжнародна конференція «Теплотехника и энергетика в металлургии» (Дніпро, НМетАУ 7–9 жовтня 2014); Міжнародна наук.–практ. конф. «Современное общество, образование и наука» (Тамбов, 30 червня 2014); I Міжнародна науково-технічна конференція «Aktualne Zagadnieniaa Energetyki, Budownictwa i Inźynierii Środowiska» (Польща, Кошалін, 26-28 січня 2016); VI Міжнар. наук.–практ. конф. «Интегрированные технологии и энергосбережение «ИТЭ-2016»» (Харків, 28-30 грудня 2016); XXVII Міжнародна науково-технічна конференція «Стародубівські читання 2017» (Дніпро, 19-20 квітня 2017); II Міжнародна науково-технічна конференція «Aktualne Zagadnieniaa Energetyki, Budownictwa i Inźynierii Środowiska» (Польща, Кєльце, 23-25 листопада 2017); XXVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Стародубівські читання 2018» (Дніпро, 19-20 квітня 2018).

Також результати дисертаційної роботи доповідалися на науковому семінарі кафедри будівельної фізики й відновлюваних джерел енергії Свентокшинської політехніки (Politechnika Świętokrzyska, м. Кєльце, 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".

Публікації. Основні результати роботи 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.

Структура роботи. 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

На початку роботи наведено анотацію українською та англійською мовами для ознайомлення зі змістом та результатами дисертації де наведено узагальнений короткий виклад її основного змісту. В анотації дисертації стисло представлені основні результати дослідження із зазначенням наукової новизни та практичного значення.

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 проведено аналіз наукових джерел та сформульовані мета та задачі досліджень по впливу пористої структури на теплофізичні властивості матеріалу та методам формування пористої структури. Так, для виробництва пористих теплоізоляційних матеріалів та виробів, по-перше, необхідно визначити комплексні показники пористої структури, функціональні залежності структури від підведеної енергії та зв'язок пористої структури з режимами термообробки сировинної суміші. Це надасть можливість виділити та дослідити етапи формування пористої структури та рівні варіювання комплексних показників конструкцій теплового захисту. Знаходження узагальненого рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих виробів гіпотетично дозволить прогнозувати теплофізичні характеристики кінцевих виробів, що необхідно для виробництва теплоізоляційних матеріалів та виробів заданої якості. Для того, щоб розпочати вирішувати поставлені завдання, потрібно розуміти як впливає пориста структура на теплофізичні властивості матеріалу за різних умов його експлуатування, таких як: температура; динаміка зміни температури; тривалість

її впливу; вологість тощо. Тому сформована робоча гіпотеза керованого структуроутворення матеріалів та формування його теплофізичних властивостей.

Гіпотеза: вплив структурних параметрів на теплофізичні характеристики пористого матеріалу дозволяє створити теоретичні основи керованого структуроутворення теплоізоляційних матерів з заданими теплофізичними властивостями.

Для підтвердження гіпотези розглянуто вплив структурних характеристик пористих матеріалів на інтенсивність тепломасообмінних процесів у ньому. Виявлено, що структура з мінімальним коефіцієнтом теплопровідності має шахове розташування витягнутих перпендикулярно тепловому потоку пір. Але дане припущення не враховує розмір пір що, як було доведено, теж впливатиме на ефективний коефіцієнт теплопровідності завдяки виникненню конвективних потоків всередині пір. Також проаналізовані роботи не враховують умови експлуатування пористих матеріалів.

Традиційно в технологіях формування пористої структури використовують процеси газоутворення в сировинній суміші. Проаналізовано та наведено основні пороутворювачі у сировинній суміші теплоізоляційних матерів. Так, основними пороутворювачами у теплоізоляційних матеріалах є: вуглецеві пороутворювачі, водяна пара, водень. Зазначені гази можна отримати шляхом підведення енергії в пластичну сировинну суміш для реалізації хімічних реакцій.

Запропоновано рівняння теплового балансу для формування пористого матеріалу, яке враховує методи і види підведеної енергії.

$$\overline{c}\,\overline{\rho}\,\overline{V}\left(T_{мат}-T_0\right)+Q_{нагрівання(пари)}+Q_{конденсації}+Q_{кристалізації}+Q_{нагрівання(р)}=$$

$$=\int_{\tau_1}^{\tau_2}\int_{(S)}\lambda S\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)dSd\tau+Q_{плавлення}+Q_{випаровування}+T_{пори}dS+\varphi_{пор}dM_{пор},$$

де $T_{пор}$ – температура за якої здійснюється хімічна реакція утворення газу агента-пороутворювача, або температура пароутворення рідини;

T_0 – початкова температура вихідної суміші;

dS – зміна ентропії під час утворення пори;

$\varphi_{пор}$ – хімічний потенціал пороутворюючого газу;

$M_{пор}$ – маса газу-пороутворювача.

Так, на формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу з сировинної суміші має вплив хімічний потенціал і дифузія газів агентів пороутворення, які під час формування пористих структур не розглядаються в проаналізованих роботах. Тому для визначення енергії, яку потрібно затратити на формування пористої структури матеріалу, необхідно знайти залежності комплексних показників пористої структури від зміни хімічного потенціалу та перенесення ентальпії завдяки дифузії.

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. Для визначення енергоємності створених пористих теплоізоляційних матеріалів та конструкцій теплового захисту елементів промислових енергетичних установок використовується енергія формування пористої структури. Використання даних комплексних показників дозволяє створити технології керованого структуроутворення теплоізоляційного матеріалу з заданими теплофізичними властивостями.

Для необхідних умов експлуатації визначено необхідність дослідити основні три напрямку формування пористої структури: у теплоізоляційному матеріалі, у теплоізоляційному виробі та у конструкції теплового захисту. Для формування структури теплоізоляційного матеріалу необхідно визначити термодинамічні параметри газу під час формування пори, що надасть можливість побудувати модель зміни пористості у теплоізоляційних матеріалів. Для формування пористого теплоізоляційного виробу та конструкції теплового захисту необхідно знайти узагальнене рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності, за допомогою якого можна оптимізувати структури елементів конструкцій теплового захисту. Розвиток теорії формування теплофізичних властивостей у цих напрямках дозволить покращити якість існуючих теплоізоляційних матеріалів, композиційних матеріалів та металевих конструкцій теплового захисту спеціального призначення.

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 тепломасообміним процесам, що протікають у даних структурах. Сформульована гіпотеза зміни комплексних показників пористої структури під час формування теплоізоляційного матеріалу з вологої сировинної суміші. Додаткова гіпотеза: існує три періоди зміни комплексних показників пористої структури теплоізоляційного матеріалу під час формування його структури завдяки підведення теплової енергії до сировинної суміші.

До дифузійного генезису пір віднесено утворення пір завдяки хімічним реакціям, ступеню насичення газами, пароутворення. До генезису деструкції пір віднесено утворення пір завдяки термодеструкції, деформації та випромінювання.

Для спрощення прогнозування пористої структури теплоізоляційних матеріалів висунуто допоміжні гіпотези з формування пористої структури та поетапної зміни кількості пір та об’єму пір у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу під час підведення теплової енергії до суміші. Для розрахунку кількості пір та їх об’єму на першому етапі утворення пір у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу визначені рівняння швидкості пороутворення і кількості пір. Наприклад, кількість пір під час їх утворення у сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу шляхом виникнення газу агенту-пороутворювача внаслідок бінарної хімічної реакції

$$n_0(\tau) = n_0(\tau_0) + \int_{\tau_0}^{\tau} K_{0j}(\tau) \cdot \exp\left(-\frac{E_{aj}}{R \cdot T(\tau)} \right) c_1^{\vartheta}(\tau) c_2^{\vartheta}(\tau) d\tau \,,$$

де – ϑ порядок реакції по речовині;

c_1 і c_2 – концентрації першого і другого компонента реакції, що беруть участь в реакції утворення газу агента-пороутворювача;

E_{aj} – енергія розриву хімічних зв'язків;

K_0 – узагальнюючий показник;

R – універсальна газова стала.

Або для утворення пір під час кристалізації сировинної суміші

$$n_0(\tau) = n_0(\tau_0) + K_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \cdot c_0 \cdot \left[\frac{1-k_c}{k_c} \int_{\tau_0}^{\tau} e^{-\frac{x w_{фк}}{D}} d\tau + (\tau - \tau_0)\right],$$

де $w_{фк}$ – швидкість фронту кристалізації, залежить від градієнта температури;

k_c – коефіцієнт розподілу домішок (дорівнює відношенню розчинності газу в твердій фазі до розчинності газу в рідкій фазі);

D – коефіцієнт дифузії газу;

c_0 – початкова концентрація газу агента-пороутворювача;

x – координата фронту кристалізації.

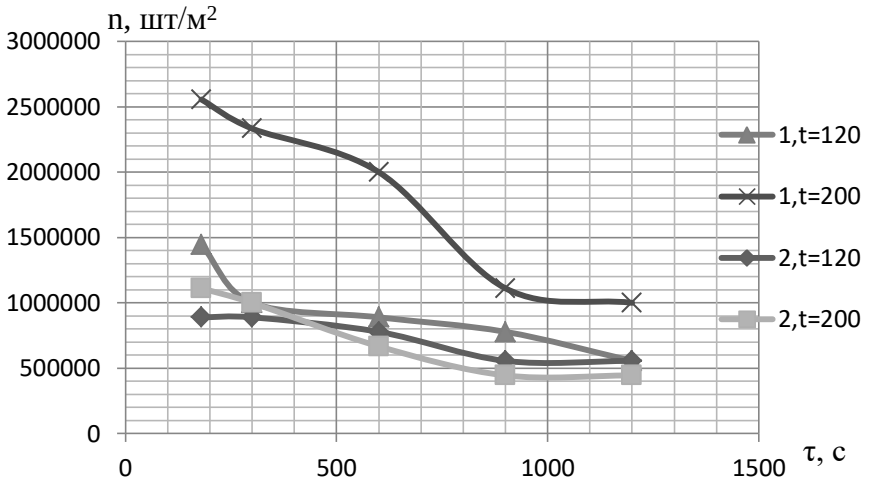
Аналогічні рівняння отримані й для інших типів дифузійного генезису пір з врахуванням комбінованого утворення пір.

На основі аналізу отриманих залежностей визначено напрями подальших емпіричних досліджень, які необхідні провести для кожного окремого випадку пороутворення. Так, для того щоб отримані рівняння мали розв'язок необхідно знайти енергію, що витрачається на формування пори та передекспоненційний показник. На наш погляд, K_0 чисельно дорівнює кількості центрів пороутворення. Так як термодинамічні умови формування пористої структури можуть бути різними, та й склад сировинної суміші, то K_0 буде узагальнюючим показником, що доведено у наступних розділах дисертаційної роботи.

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. Рівняння, що були представлені у другому розділі дисертаційної роботи верифіковані з результатами проведеного експерименту. Для вивчення впливу пористої структури вогнетривких теплоізоляційних матеріалів на вологостійкість та морозостійкість було експериментально визначено вологостійкість зразків в залежності від розміру та форми пір. Для конструкції теплового захисту з особливими умовами експлуатування визначено хімічний склад та структуру матеріалів з найбільшою морозостійкістю.

Експериментально було підтверджено висунуті допоміжні гіпотези та для визначення залежностей формування пористої структури теплоізоляційних матеріалів на інших етапах проведено серії експериментів.

Температури термообробки сировинної суміші обрані так, щоб враховувати пороутворення з врахуванням переходу гідраргіліта в беміт та без даного перетворення. Умовно виділено три періоди зменшення кількості пір після етапу їх утворення (рис.1). Перший період – етап зниження кількості пір, залежить від пластичності матеріалу і є самим короткочасним. У пластичнішого – незначне зниження кількості пір, а у суміші глину та шамоту – суттєве зменшення кількості пір. Зменшення кількості пір на даному етапі проходить за рахунок їх поєднання у біль великі пори.



1 – суміш глини та шамоту; 2- суміш глини, шамоту та пластифікаторів; t – температура термообробки, °С

Рис. 1. Зміна кількості пір у вогнетривкій суміші з часом

Для пластичнішого матеріалу характерне збільшення об'єму окремих пір та загальної пористості. Другий етап – рівномірне зменшення кількості пір в матеріалі. З підвищенням температури термообробки зменшення кількості пір відбувається інтенсивніше, завдяки інтенсивнішому збільшенню об'єму пір. Третій етап – етап заростання пір. Це підтверджує висунуту додаткову гіпотезу та робить її теоремою.

Швидкість пороутворення для першого зразка (рис. 2) відрізняється від всіх інших. Це пов'язано зі швидкістю дифузії вологи і швидкістю утворення поверхневої кірки. Оскільки температура і пластичність матеріалу малі, то водяні пари виходять з матеріалу раніше, ніж утворюють пори. Швидкість пороутворення на початку термообробки збільшується, а після – повільно згасає (рис. 2). При цьому швидкість збільшення пористості постійно зменшується і є максимальною в початковий момент часу – в момент пороутворення (рис. 3).

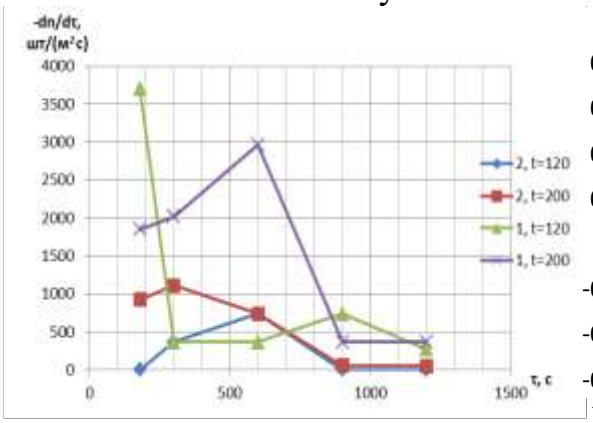


Рис. 2. Зміна швидкості утворення пір від часу у вогнетривкій суміші

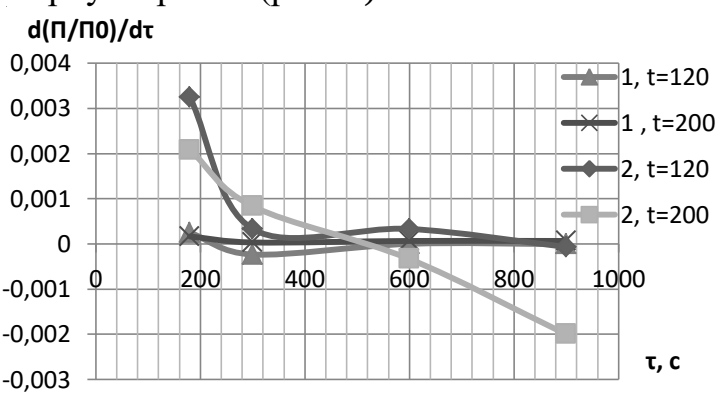


Рис. 3. Динаміка зміни пористості в вогнетривкій суміші

Проведені експерименти дозволяють підтвердити висунуту допоміжну гіпотезу про поетапну зміну комплексних показників в глиноземистих матеріалах під час їх термообробки. Порівнявши експериментальні данні з аналітичними розрахунками визначено залежність узагальнюючого показника K_0 від термодинамічних умов газу, що надало можливість прогнозувати характеристики пористої структури теплоізоляційних вогнетривких матеріалів.

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, які мають такий вигляд

$$\begin{cases} T^{(1)} = T^{(2)} \\ p^{(1)} - p^{(2)} = \dfrac{2\sigma}{r} \\ \varphi^{(1)}\left(p^{(1)}, T\right) = \varphi^{(2)}\left(p^{(2)}, T\right) \end{cases},$$

де φ - хімічний потенціал (індекс (1) відноситься до агента-пороутворювача, а (2) до початкової суміші).

r - габаритний розмір ядра пори.

Аналітично виведено тиск агенту-пороутворювача всередині замкнутої сферичної пори

$$p^{(1)} = p_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}},$$

де $E_a = 2\sigma \dfrac{v^{(1)}}{r}$ чи $E_a = \varphi^{(2)} - \varphi_\infty^{(1)}$ - енергія активації, що дорівнює різниці хімічних потенціалів матеріалу і агента-пороутворювача;

p_0 - тиск газу за тих самих фізичних умов поза матеріалом;

$v^{(1)}$ - питомий об'єм газу агента-пороутворювача.

Знайдено температуру газу агента-пороутворювача всередині замкнутої сферичної пори

$$T = T_0 + \frac{1}{R \ln\left|p^{(1)}\right|} \cdot \left(\frac{2\sigma v^{(1)}}{r}\right),$$

де T_0 - температура газу-пороутворювача за тих самих фізичних умов поза матеріалом.

Знайдено критичний радіус ядра пори, за якого можливе формування пори. Проаналізовано можливість існування та формування пір у суміші, що спучується. Зміна енергії Гіббса від радіусу за $\varphi^{(1)} - \varphi^{(pre)} < 0$ і малому r наведено на рис. 4. Для існування пори необхідно, щоб $\varphi^{(1)} - \varphi^{(pre)} < 0$ і $r^{(1)} > r_{kr}^{(1)}$. Під час цього критичний радіус прямо пропорційний коефіцієнту поверхневого натягу. Тобто пора в вихідній суміші з більшою ймовірністю виникне в місцях з малим поверхневим натягом (дані області можуть утворюватися завдяки флуктуацій густини). Також дані нерівності показують, що для виникнення пір у наслідок хімічної реакції необхідно зменшення хімічного потенціалу пороутворюючого газу.

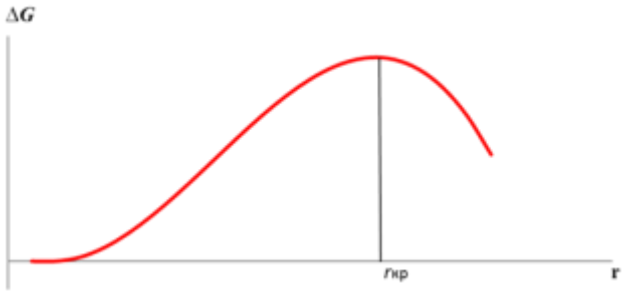


Рис. 4. Зміна енергії Гіббса від радіусу ядра пори за $\varphi^{(1)} - \varphi^{(pre)} < 0$ і малому r

Середній час реакції утворення ядра пори

$$\overline{\tau}_з = \frac{n_{пор}}{N_1 \cdot K_0 \cdot e^{-\frac{l_{кр}^{(1)}}{k_B \cdot T}}} - \tau_P$$

де τ_p - час релаксації системи, зумовлений генезисом пір;

$n_{пор}$ - кількість пір в одиницю часу спостереження;

k_B - постійна Больцмана.

N_1 - число молекул агента-пороутворювача в одиниці об'єму;

$\frac{l_{кр}^{(1)}}{k_B \cdot T}$ - відносна висота бар'єру вільної енергії під час утворення ядра пори, даний член рівняння можна розглядати як параметр стійкості матеріалу пороутворенню;

$l_{кр}^{(1)} = \frac{16}{3}\pi \frac{\sigma^3}{\left(p_{кр}^{(1)} - p\right)^2}$ - робота утворення ядра пори критичного розміру.

Для визначення радіусу пори під час термообробки сировинної суміші визначено рівняння збільшення об’єму пори у сировинній суміші на різних етапах утворення пір

$$\begin{cases} w = \dfrac{\alpha\left[\left(w_0-\alpha\right)e^{-\frac{1,5\rho\tau}{\rho_г R}}+w_0+\alpha\right]}{w_0+\alpha-\left(w_0-\alpha\right)e^{-\frac{1,5\rho\tau}{\rho_г R}}} & ;\alpha=\sqrt{\dfrac{P_n(T)-P_г}{1,5\rho}};\ \dfrac{P_n(T)-P_г}{1,5\rho}>0, \\ w = \dfrac{\sqrt{\left|\dfrac{1,5\rho}{P_n(T)-P_г}\right|}w_0 - tg\dfrac{1,5\rho\tau}{\rho_г R}}{\sqrt{\left|\dfrac{1,5\rho}{P_n(T)-P_г}\right|}+\left|\dfrac{1,5\rho}{P_n(T)-P_г}\right|w_0 tg\dfrac{1,5\rho\tau}{\rho_г R}}; & \dfrac{P_n(T)-P_г}{1,5\rho}<0, \\ w=\dfrac{w_0\rho_г R}{1,5\rho w_0\tau-\rho_г R}; & P_n(T)-P_г=0, \end{cases}$$

де w – швидкість зростання пори у суміші;

τ – час зростання пори;

ρ – густина;

$P_{\text{п}}$ – тиск всередині пори;

$P_{\text{г}}$ – тиск у навколишньої сировинної суміші;

T – температура;

R – радіус пори.

З урахуванням отриманих результатів у третьому розділі про зміну кількості пір під час спучення глиноземистих матеріалів складено підсумкову модель, що описує зміну кількості пір в матеріалі на основі глинозему. Особливістю моделі є емпірично визначений вид функціональної залежності другого та третього етапу зміни кількості пір для глиноземистих матеріалів

$$\begin{cases} n_{pore} = \tau_{\text{s}} \cdot N_1 \cdot K_0 \cdot e^{-\dfrac{16\cdot\pi\cdot\sigma^3}{3\cdot k_B\cdot T\cdot\left(p_{kr}^{(1)}-p\right)^2}} & коли \quad \tau_{\text{s}} < \tau_1 \\ n_{pore} = \tau_{\text{s}} \cdot \xi_1 \cdot (1-P) & коли \quad \tau_1 < \tau_{\text{s}} < \tau_2 \\ n_{pore} = \tau_{\text{s}} \cdot \xi_2 \cdot P & коли \quad \tau_{\text{s}} > \tau_2 \end{cases},$$

де ξ_1, ξ_2 - емпіричні коефіцієнти, що знаходяться апроксимацією кривої динаміки зміни пористості під час спучення сировинної суміші;

K_0 - узагальнюючий показник пористої структури;

P - загальна пористість матеріалу.

За ізотермічного підведення енергії

$$K_0 = \frac{1}{\exp\left(-\frac{L_{пари}}{R \cdot T(\tau)}\right) - \exp\left(-\frac{16 \cdot \pi \cdot \sigma^3}{3 \cdot k_B \cdot T \cdot \left(p_{kr}^{(1)} - p\right)^2}\right)}.$$

Модель верифікована з даними рис. 1, що робить робочу гіпотезу доведеною теорією.

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

$$\Delta T \cdot \lambda_l \cdot \left(\frac{2}{\delta} + \frac{1}{r}\right) = -\mathrm{p}_0 \cdot e^{-\frac{\mathrm{Ea}}{\mathrm{RT}}} \cdot \frac{dr}{d\tau'} - C \cdot \Delta T \cdot \frac{\left(\mu \cdot c_p\right)^m}{\lambda^{m-1}} \cdot \frac{\left(\frac{\tau^2}{\tau - \tau'} \cdot \sqrt{\frac{p - p_0}{\rho}}\right)^{n-1}}{v^n} w^n,$$

де δ – поточна товщина теплового прикордонного шару;

λ_l – коефіцієнт теплопровідності суміші;

C – константа інтегрування;

τ' – час протікання ізотермічного етапу росту пори.

Константи, що входять до рівняння теплового балансу знайдені експериментально для глиноземистих теплоізоляційних матеріалів. Це дозволило створити метод оцінки впливу пористої структури на енергоємність виробництва пористих теплоізоляційних матеріалів. Використовуючи розроблений метод створено нові теплоізоляційні матеріали.

Отже, з’ясовано якою може бути структура матеріалу та як її отримати. Наступним завданням є уточнення впливу пористої структури та умов експлуатації на ефективний коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

У п’ятому розділі дисертаційної роботи проведено дослідження впливу розміру, розташування та форми пір на теплопровідність матеріалів. Для визначення впливу комплексних показників пір на електрону складову ефективного коефіцієнта теплопровідності матеріалів було досліджено вплив розміру та розташування пір у електропровідних виробах. Було розроблено та запатентовано установку з визначення теплопровідності пористих електропровідних матеріалів методом електро-теплової аналогії. Також підтверджується та уточнюється висунута гіпотеза: магнітні поля в електропровідному матеріалі з порами меншими за 6 мм, що виникають під час проходження струму 100 А скрізь нього, збільшують

коефіцієнт теплопровідності до 2 % завдяки створенню додаткового градієнту фазових напруг на поверхні пори.

Встановлено, що на коефіцієнт теплопровідності у високопористих електропровідних виробах суттєво впливає форма пір (рис. 5). Так, для пір у вигляді еліпса, який розташовано перпендикулярно тепловому потоку більшим розміром, й для розташування вздовж теплового потоку різниця в електронній складовій коефіцієнта теплопровідності становила 59 %. Під час заміни форми пір з кола на еліпс перпендикулярно тепловому потоку теплопровідність металів знизилась на 27 %. Для шахового та коридорного розташуванням пір у формі кола різниця становила усього 0,66 %. Найліпшою формою пір є форма витягнутого еліпса, розміщеного перпендикулярно тепловому потоку (рис. 5).

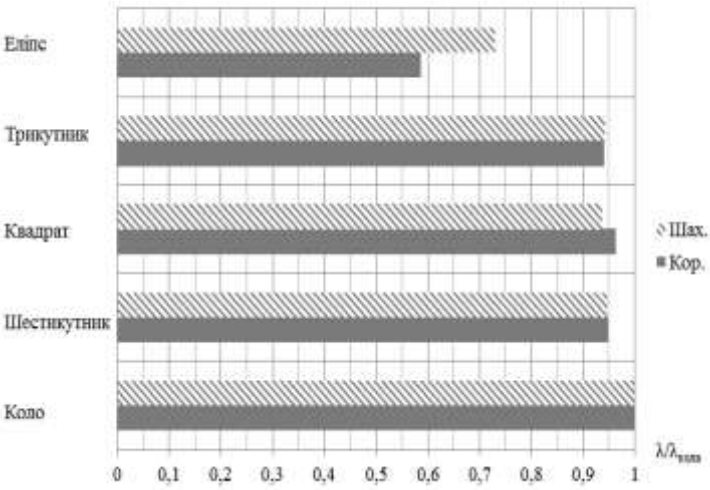


Рис. 5. Відношення теплопровідності дослідних зразків з різною формою отворів до теплопровідності зразків з формою отворів у вигляді кола

Раніше було визначено, що на ефективний коефіцієнт теплопровідності пористих матеріалів значно впливатимуть конвективні потоки всередині пір. Для врахування її впливу під час проходження теплового потоку скрізь пористу структуру було проведено дослідження конвективної складової ефективного коефіцієнту теплопровідності електропровідних конструкцій теплового захисту. Для цього розроблено моделі, в яких враховувався повний ефективний коефіцієнт теплопровідності з врахуванням конвективної та радіаційної складової. За отриманими даними різниця конвективної складової ефективного коефіцієнту теплопровідності між коридорним та шаховим розташуванням каналів та у порах розміром до 2 мм в структурах теплового захисту практично відсутня (рис. 6). Дані дослідження дозволили знайти раціональний алгоритм побудови складних комплексних моделей для розрахунку ефективного коефіцієнта теплопровідності пористих матеріалів.

Завдяки комп'ютерному моделюванню було також виявлено, що за температури більше 31 °С повітря в отворах 8 мм конвекція сприяє перенесенню теплоти, а за нижчих температур – пори збільшують тепловий опір, оскільки конвекція дуже мала, або відсутня. Перенесення енергії випромінюванням за низьких температур у даних порах практично відсутнє.

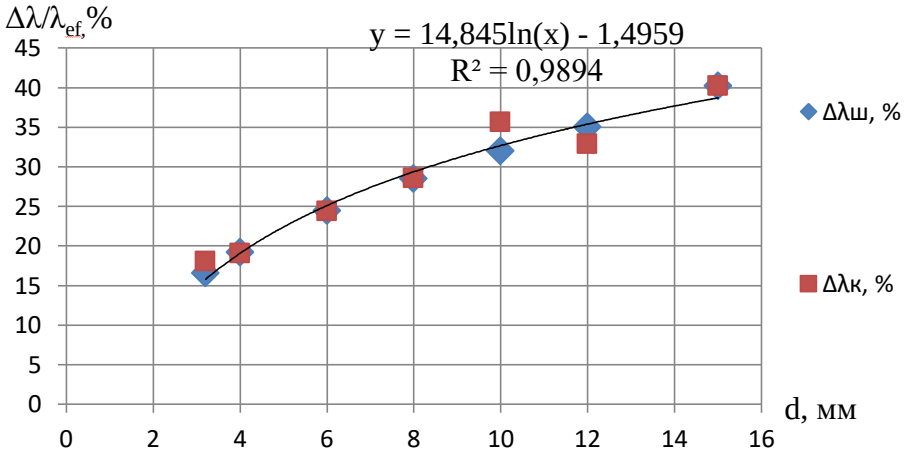


Рис. 6. Залежність відношення конвективної складової до повного ефективного коефіцієнта теплопровідності від діаметра пір для комп'ютерних моделей пористих структур

Для вдосконалення існуючих теплоізоляційних матеріалів були проведені дослідження впливу форми пір на тепловий опір високопористих теплоізоляційних матеріалів.

Комп'ютерна модель пір з розрахунковою сіткою та розподіл теплового потоку по пористому теплоізоляційному матеріалу відображено на рис. 7.

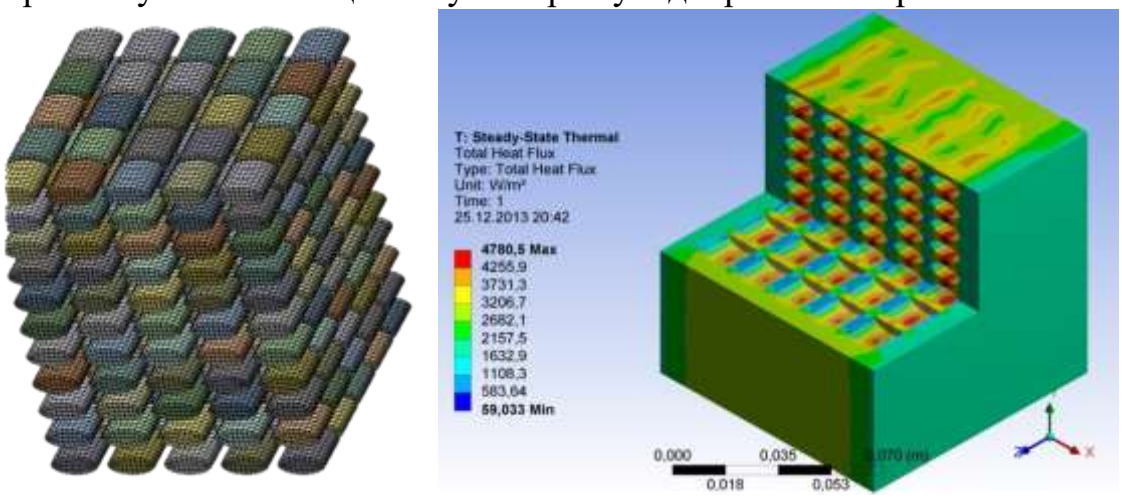


Рис. 7. Комп'ютерна модель пір та розподіл теплового потоку по теплоізоляційному матеріалу

Встановлено існування відношення габаритного розміру пори до градієнту температури, за якого розташування пір по відношенню до теплового потоку не впливає на тепловий опір теплоізоляційного матеріалу.

Для знаходження узагальненого рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів та виробів, які використовуються для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок, визначено рівні варіювання вхідних параметрів моделі. Для цього за знайденим раціональним алгоритмом змодельовані комп'ютерні моделі (рис. 8), в яких враховувався повний ефективний коефіцієнт теплопровідності з врахуванням конвективної та радіаційної складової. Фізична перевага надавалася методу розрахункової гідродинаміки. Був змодельований куб зі сторонами 0,04 м. У центрі куба розташована сферична пора. Пора моделювалася різного діаметру. На одну з поверхонь куба задавався тепловий потік 100 Вт/м^2 та 10 Вт/м^2. Протилежна повер-

хня куба задавалася з конвективним охолодженням з початковою температурою 22 °С. Інші поверхні куба – адіабатні. Матеріал у порі – ідеальний газ (повітря) з тиском 1 атм. Тепловий потік задавався перпендикулярно силі тяжіння. Розрахункова сітка складалася з тетрайдерів. Пограничні шари сітки вибиралися в кількості п’яти, як для пори, так і для матеріла. Матеріал та пору діаметром 20 мм з нанесеною сіткою відображено на рис. 8

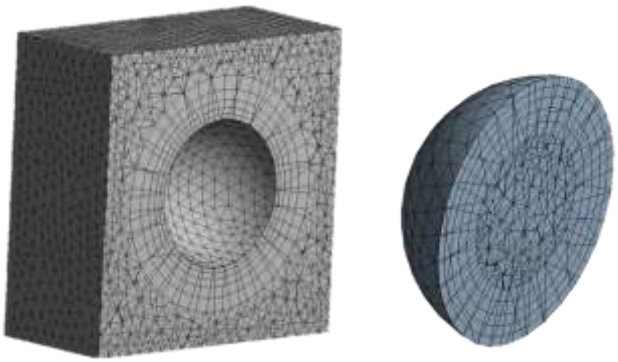


Рис. 8. Розрахункова сітка на теплоізоляційному матеріалі та порі по перерізу навпіл

Визначено, що під час зменшення діаметра сферичної пори у теплоізоляційному матеріалі змінюється рух ліній току повітря у порі на спіральний, а швидкість руху конвективних потоків повітря у порі зменшується. Спіральність руху ліній току пояснюється самоорганізацією конвективної комірки подібно до комірки Бенара. Максимального значення тепловий потік у високопористому теплоізоляційному матеріалі набуває на фронтальній поверхні сферичної пори й стає більшим за тепловий потік у самому матеріалі. Збільшення теплового потоку пояснюється тим, що тепловий потік під впливом конвекції розгортається від полюсів й частково прямує у зворотній бік. Там сумується з тепловим потоком, що йде на фронтальну частину пори (рис. 9).

Рис. 9. Вектори теплового потоку у матеріалі зі сферичною порою діаметром 20 мм

На рис. 10 відображені результати комп’ютерного моделювання для пір та пустот з абсолютним вакуумом; з повітрям за нормальних фізичних умов, без конвекції та з різними тепловими потоками. Суцільною горизонтальною лінією вказано термічний опір теплопровідності самого матеріалу без пір. За відсутності конвекції - збільшення діаметру пори/пустоти (як і загальної пористості матеріалу) збільшує термічний опір теплоізоляційних матеріалів, але за наявності конвекції - конвективні рухи усередині пори значно знижують термічний опір. Для діаметру пори у 2 мм конвекція практично відсутня. Для діаметру пори/пустоти у 5 мм виникає конвекція, але загальний опір теплоізоляційного матеріалу з порою вище за опір теплоізоляційного матеріалу без пори. Для даного діаметру пори суттєвим є вплив температури. Так, за невеликого теплового потоку 10 Вт/м^2 термічний опір теплопровідності менший за термічний опір теплопровідності при тепловому потоку100 Вт/м^2. Це пояснюється різницею температур на поверхні

пори. Для діаметру пустоти у 10 мм й більше конвекція стає суттєвою та зменшує термічний опір настільки, що він стає менший за термічний опір теплопровідності матеріалу без пір.

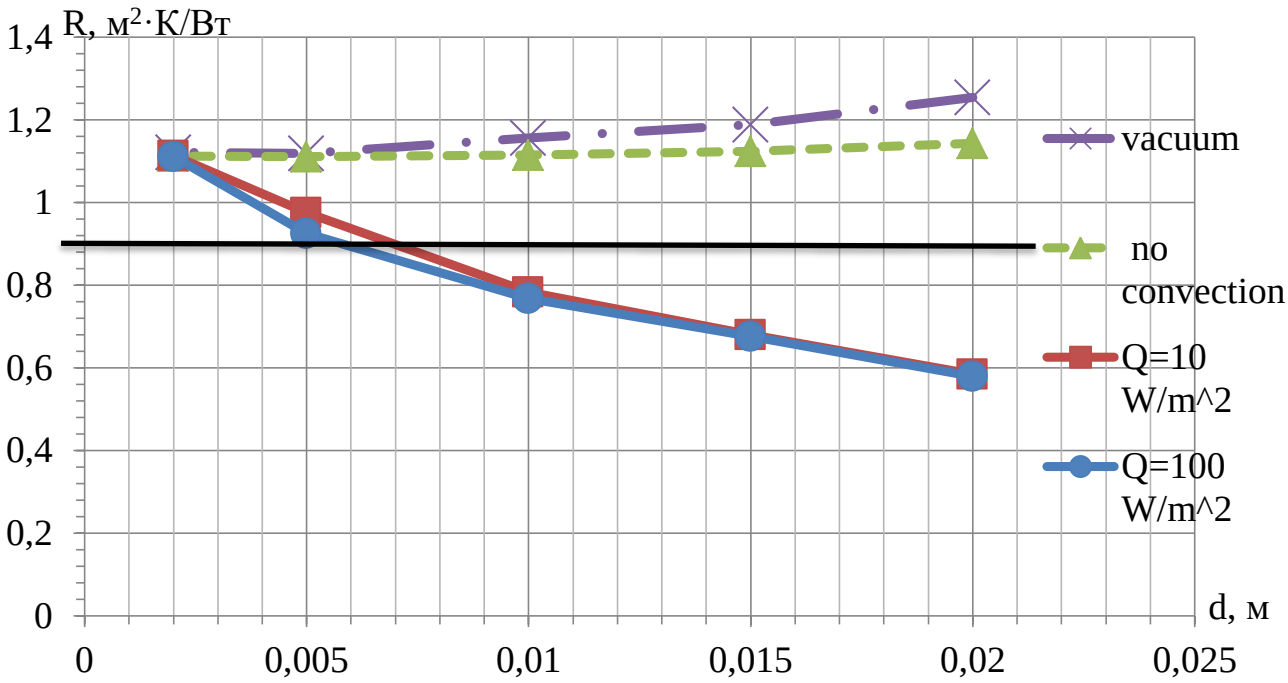


Рис. 10. Залежність термічного опору теплопровідності теплоізоляційного матеріалу від діаметру пори/пустоти

Для підтвердження отриманих залежностей було проведено лабораторний експеримент на базі лабораторії енергоефективних технологій ЗДІА. Використовувалися зразки з пінополістиролу фірми «ТехноНіколь екопліт» з теплопровідностью 0,035 Вт/(м·К), густиною 2,6 кг/м^3 та теплоємністю 1,45 кДж/(кг·К). Теплопровідність вимірювалась вимірювачем теплопровідності «ИТП-МГ4». Зразки вироблялися як з закритою пористістю, так й з відкритою. Відкрита пористість була наскрізною. Діаметр пір та отворів в зразках становив 4, 6, 7, 8 та 10 мм.

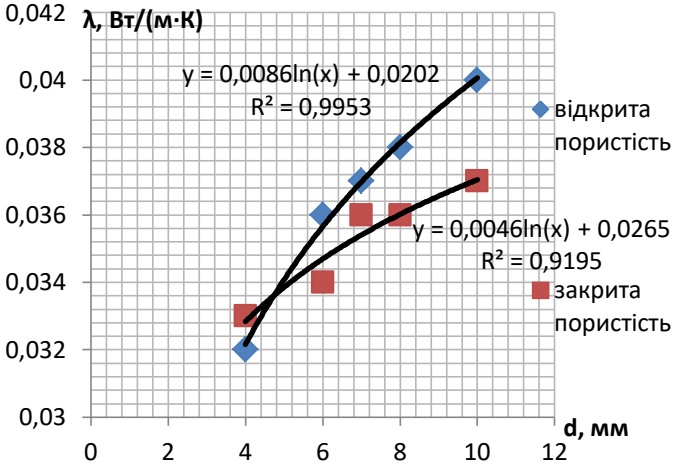


Рис. 11. Залежність коефіцієнту теплопровідності пінополістиролу від діаметру пор

За результатами експерименту побудовано залежність теплопровідності від діаметру пір (рис. 11). Отримані залежності підтверджують, що пори з розміром повздовж теплового потоку менше 7 мм збільшують термічний опір теплоізоляційних матеріалів. В проведеному експерименті пори з розміром 7 та 8 мм збільшили коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу на 2,86 %.

Лабораторним експериментом було підтверджено отримані залежності, а також визначено, що залежність коефіцієнту теплопровідності від діаметра пори є логарифмічною. Використання логарифмічних залежностей зміни коефіцієнту теплопровідності від діаметра пори спрощує формування граничних умов та кількість дослідів для формування плану експерименту з визначення регресійного рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів та конструкцій теплового захисту енергетичних установок.

Також експериментально встановлено залежність коефіцієнту теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів від температури (рис. 12). Пориста структура у цих матеріалах значно впливає на їх коефіцієнт теплопровідності (різниця досягає 29,9 %). Визначення залежності коефіцієнту теплопровідності пористого теплоізоляційного матеріалу від температури є необхідною умовою незалежності факторів методу планування експерименту для знаходження регресійного рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності.

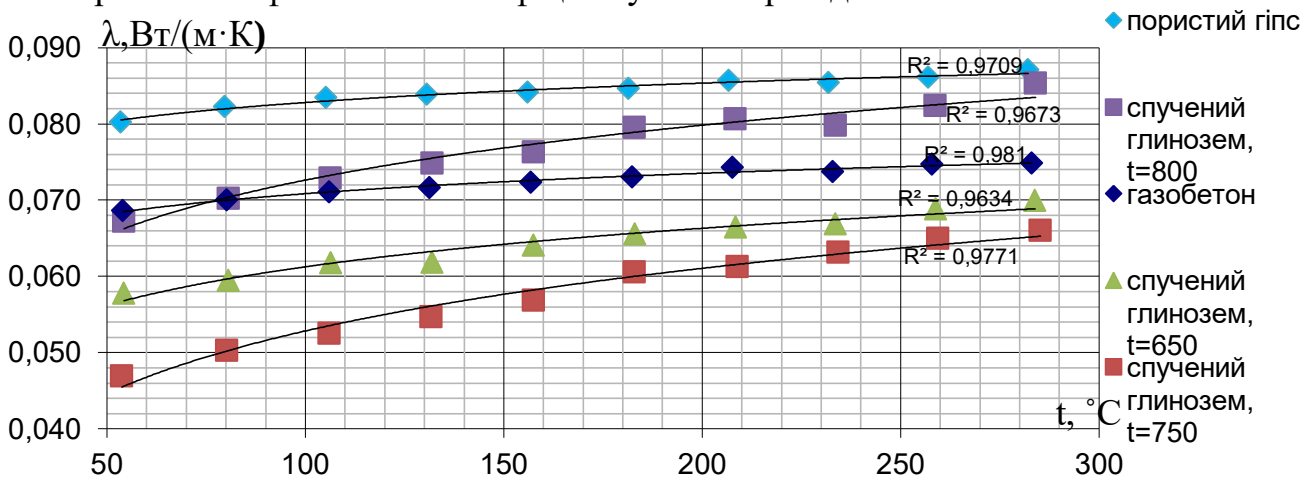


Рис. 12. Залежність теплопровідності пористих теплоізоляційних будівельних зразків від температури

Проведені групи досліджень знаходження функціональної залежності коефіцієнту теплопровідності високопористих матеріалів від комплексних показників пористої структури та знаходження впливу конвекції в порах на загальний термічний опір таких матеріалів надали змогу знайти рівні варіювання комплексних показників пористої структури (табл. 1) для знаходження узагальненого рівняння теплопровідності пористих матеріалів методом планування експерименту.

Таблиця 1. Умови проведення експериментів

Фактор	Код	Рівні факторів			
		-1	0	1	Δ
Логарифм розміру пори вздовж теплового потоку $\ln(d_1)$, мм	X_1	1,386 (ln4)	1,733 (ln5,63)	2,079 (ln8)	0,347
Логарифм розміру, перпендикулярний тепловому потоку $\ln(d_2)$, мм	X_2	1,386 (ln4)	1,733 (ln5,63)	2,079 (ln8)	0,347
Градієнт температури пори *grad*T, ºС/м	X_3	10	50	90	40
Теплопровідність матеріалу без пір λ_m, Вт/(м·К)	X_4	0,05	0,5	0,95	0,45
Кількість пір на одиницю об'єму n, шт./$(6{,}4\cdot10^{-5})$м^3	X_5	1	5	9	4

Оскільки залежність функції від факторів X_1 та X_2 буде лінійною, то для цих факторів достатньо плану другого порядку, для інших факторів прийнятий третій порядок плану. Отже, було складено змішаний композиційний план другого та третього порядку та ймовірнісно-статистичними методами проведено аналіз коефіцієнтів рівняння регресії у trial версії програми Statistica. Отриманий план складався з 54 експериментів. Кількість пір змінювалась у площині, перпендикулярній тепловому потоку. За допомогою методу планування експерименту знайдено узагальнене рівняння залежності ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих матеріалів від визначених комплексних показників (з урахуванням емпірично визначених особливостей та виключення не значимих факторів), яке дозволяє розраховувати термічний опір теплопровідності високопористих матеріалів від основних показників пористої структури

$$\lambda_{ef} = 0,04065 + 0,014\ln(d_1) - 0,00527 \cdot grad(t) + 0,03423grad(t)^2 + 0,00751\lambda_m$$
$$-0,00947\ln(d_1)\lambda_m + 0,01143 \cdot \ln(d_2) \cdot n + 0,01697 \cdot grad(t) \cdot n.$$

З аналізу розподілу Паретто впливу факторів на ефективний коефіцієнт теплопровідності слідує, що найбільший вплив чинитиме розмір пори вздовж теплового потоку. Також значною мірою впливають розмір пори, перпендикулярний тепловому потоку, та градієнт температури. Зроблено SWOT аналіз результатів дослідження. Використання результатів дослідження дозволяє значно зменшити коефіцієнт теплопровідності сучасних макропористих теплоізоляційних матеріалів та елементів теплового захисту промислових енергетичних установок, що підвищить енергоефективність промисловості держави. Данні результати також дозволяють сформувати необхідний коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу, задаючи характеристики пористої структури. Використовуючи розроблений метод створено нові теплоізоляційні матеріали. Так, для створення нових крупнопористих теплоізоляційних матеріалів необхідно дотримуватися таких параметрів: габаритний розмір пори вздовж теплового потоку 2 – 4 мм; габаритний розмір пори перпендикулярний тепловому потоку 8 – 15 мм; кількість пір 9 шт. на $6,4 \cdot 10^{-5}$ м^3.

Шостий розділ дисертаційної роботи присвячений створенню нових високопористих теплоізоляційних матеріалів на основі гідросилікатів. Створено високопористий теплоізоляційний матеріал на основі глинозему шляхом пресування пластин з наступним їх спіканням. Технологічні параметри: температура дід час пресування становила 200 °С; час витримки за даної температурі 10 хвилин; після пресування цегла обпалюється у печі за температури 1250 °С протягом 2 годин. Серед недоліків варто зазначити слабку міцність прошарку цегли. Пустоти по пластинам виконувалися на основі вище викладених рекомендацій (рис. 13). Пластини розташовувались так, щоб отвори не були наскрізними (закрита пористість). Теплопровідність виробленої цегли дорівнювала 0,45 Вт/(м·К), а міцність на стискання 7,1 МПа.

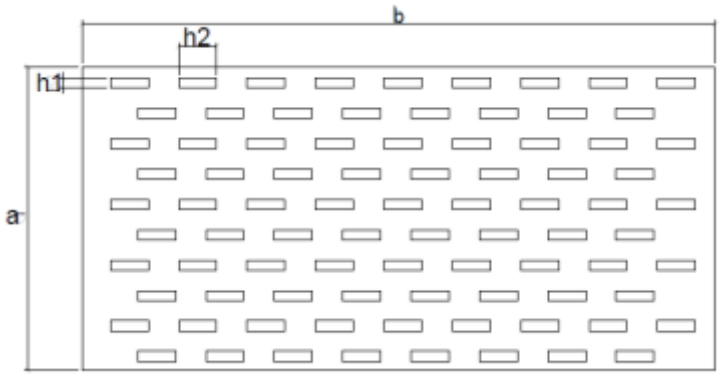


Рис. 13. Варіанти розміщення пустот по пластинам глинозему.

Вогнетривка цегла у формі прямокутного паралелепіпеда з пустотами, яка відрізняється тим що, вона має не менш 81 наскрізних рівномірно розташованих пустот з розмірами у наступному співвідношенні h1/a=1:30 та h2/b=3:50, де h1 – ширина пустоти; a – ширина цегли; h2 – довжина пустоти; a – ширина цегли; b – довжина цегли.

Створено вогнетрив шлікерним литтям з раціональною структурою (рис. 14).

Рис. 14. Фото експериментального зразка вогнетриву

Шлікер створювався з сировини з такими показниками якості: вміст SiO_2 – 52 %; Al_2O_3 - 8 %; вміст Fe_2O_3 менше 5 %, вміст CaO менше за 10 %. Для мінімізації усадки додавався шамот у кількості 30%. Для виготовлення зразка вогнетривкої цеглини, шлікер заливається у гіпсову форму. Глибина форми 90 мм. Форма мала стрижні 4×15 мм, розташовані по її об'єму. Схема розташування стрижнів форми відповідала рис. 13. Після розлиття шлікеру, форма містилася до печі на 15 хвилин за температури 272 °С. Після чого цегла обпалювалася 1,5 години за температури 1200 °С для досягнення необхідного рівня спікання і завершеності протікання фізико-хімічних процесів між компонентами вихідних матеріалів. Теплопровідність виробленої цегли дорівнювала 0,44 Вт/(м·К), а міцність на стискання 5,8 МПа.

Створено керамзит з покращеними теплофізичними властивостями для використання засипкою (рис. 15). Технологія створення: глиняна суміш підсушується до вологості 38 % та формується у гранули (шляхом пресуванням сіткою з коміркою 6×20 мм); після цього піддон з гранулами розміщується у нагрівальній печі на 15 хвилин за 270 °С; після нагрівальної печі гранули засипаються до барабанної печі, де обпалюються за температури 1250 °С протягом 1,5 години.

Також для особливих умов підприємства було виготовлено гідросилікати з сировини, що була наявною на підприємстві. Гідросилікат, виготовлений в промислових умовах закладався у форму та заливався розчином цементу, а отриманий виріб (рис. 16) використовувався тепловою ізоляцією будівель, споруд та енергетичного обладнання з урахуванням особливих умов підприємств Запоріжжя, про що є відповідний акт впровадження. Отримана теплоізоляція мала такі теплофізичні характеристики: коефіцієнт теплопровідності (0,114…0,119) Вт/(м·К), питома теплоємність за 22 °С становила (1,33…1,41) кДж/(кг·К).

Рис. 15. Фото готової продукції керамзиту

Рис. 16. Фото блоку гідросилікату

Створено наповнювач для бетонів та вогнетривких бетонів на основі білої глини. Методом планування експерименту знайдено регресійне рівняння коефіцієнту теплопровідності від параметрів термообробки. Цільова функція

$$\lambda_{ef} = 0,0676 + 0,005375X_1 - 0,007375X_2 - 0,015125X_3 - 0,001625X_1X_2 +$$
$$0,009125X_1X_3 + 0,002875X_2X_3 \to \min;$$
$$X_1 \geq -1; \qquad X_2 \leq 1; \qquad X_3 \leq 1;$$

де X_1 - температура, ºС; X_2 - час термообробки, хв.; X_3 - вологість, %.

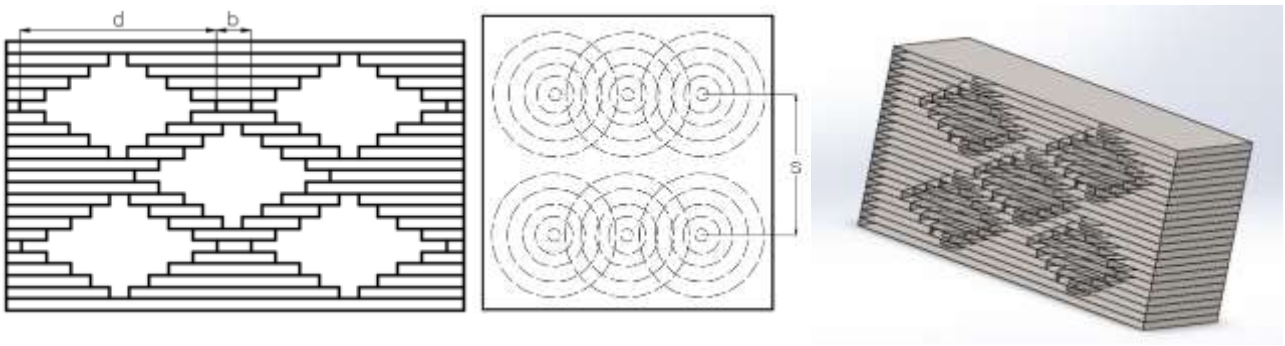
Методом Лагранжа з використанням умов Куна-Таккера знайдено оптимальні параметри термообробки: температура термообробки 200 ºС, час термообробки 15 хв., початкова вологість суміші 50 %. Зроблено SWOT аналіз результатів дослідження. Серед сильних сторін даного дослідження необхідно відзначити можливість створення бетонної суміші з розробленими теплоізоляційними добавками, використання яких знизить питомі витрати на опалення державних закладів та установ. Отримані результати та використаний метод може бути застосовані в подальших дослідженнях та служити базисом для створення досконалішого керамзиту. Для промисловості виробництво високоякісного матеріалу дасть змогу конкурувати на ринку, тим паче, що переобладнання вже існуючих цехів підприємств виробництва керамзиту непотрібно.

Також запропоновано новий хімічний склад та спосіб приготування суміші для виготовлення композиційного вогнетривкого бетону.

Сьомий розділ дисертаційної роботи присвячений створенню методу 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.

Одна з розроблених конструкцій – це конструкція теплового захисту, котра складається з перфорованих металевих листів. Для знаходження залежності міцності та ефективного коефіцієнту теплопровідності від визначальних розмірів було використано метод планування експерименту. Кріплення пластин між со-

бою можна здійснювати спіканням під тиском, склеюванням або за допомогою болтів. За холодним способом з'єднання як діелектрик у порах можна застосовувати діелектричний папір. Через те, що контактний тепловий опір між пластинами значно зменшуватиме тепловий потік, пластини слід збирати, щоб лінії їх з'єднання були розташовані перпендикулярно до теплового потоку. Групи отворів розташовують рядами на відстані s від центру пір, чим досягають великої загальної пористості. Зменшення діаметрів отворів необхідно здійснювати за такою послідовністю: 0,75d; 0,5d; 0,3d; 0,1d (рис. 17). Оптимізація отриманого рівняння регресії проводилася методом Лагранжа з умовами Куна-Таккера (одна з умов - міцність на стискання більше за 100 МПа). Отримано оптимальні розміри перфорації металевих пластин, за яких коефіцієнт теплопровідності склав 20,77 Вт/(м·К), а межа міцності на стискання 100,2 МПа.



а) *б)* *в)*

Рис. 17. Зібрані металеві перфоровані пластини: вид збоку (а); вид зверху (б); аксонометричний розріз комп'ютерної тривимірної моделі (в)

Технологія виробництва такої ізоляції є простою і дозволяє мінімізувати фінансові витрати на покупку технологічного обладнання.

Також проведено емпіричні дослідження композиційної теплової ізоляції з різними параметрами пористості (рис. 18). Розраховано рівняння регресії коефіцієнту теплопровідності матеріалу від геометричних характеристик. Методом регуляторного симплексу отримано оптимальні геометричні значення комірки композиційного матеріалу, які становлять: довжина – 7,6 мм; товщина – 12,5 мм, за яких досягається коефіцієнт теплопровідності 0,226 Вт/(м·К).

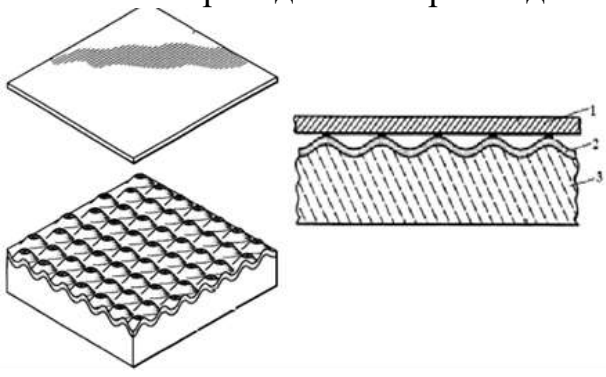


Рис. 18. Композиційна теплова ізоляція з металевого листа (1), металевого покриття (2) та керамічної ізоляції (3).

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

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

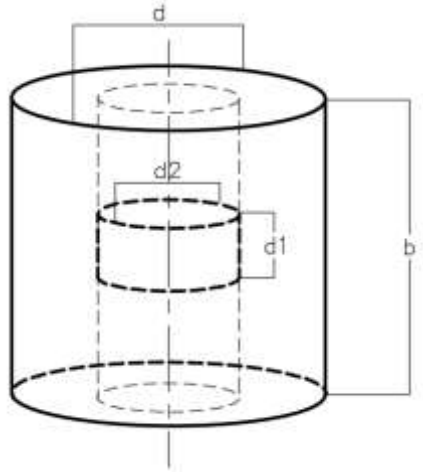


Рис. 19. Трубка току з порою

Для макропористого тіла перенесення енергії характеризуватиметься ефективним коефіцієнтом теплопровідності або термічним опором теплопровідності. Представимо теплову енергію як флюїд. Тоді тепловий потік крізь пористе тіло можна розбити на безліч теплових трубок, бічні границі яких утворені проекцією бічної поверхні пори діаметром d_2. Сама пора знаходиться у тепловій трубці та має розміри, вказані на рис. 19.

Було доведено, що для закритих пористих структур справедливо

$$Q = \lambda \cdot \phi \cdot \Gamma \cdot \Delta T ,$$

де ϕ – теплова проникність пористого матеріалу, $\phi_i = \dfrac{\Pi_b}{n_b}$

де $\overline{n_b}$ – середня кількість пір по товщі матеріалу *b* вздовж теплового потоку;

Π_b - загальна пористість матеріалу;

Γ - геометрична характеристика пористого матеріалу з закритими порами, яка дорівнює відношенню довжини лінії поперечного перетину пори до площі поверхні матеріалу у розрізі з порою (розмірність цієї величини $м^{-1}$, чим вона більше, тим менша різниця між тепловим каналом та тепловою трубкою)

$$\Gamma = \frac{\pi d_2}{S - n\dfrac{\pi \overline{d}_2^{\,2}}{4}},$$

де S - площа перетину теплової трубки.

Тоді, ефективний коефіцієнт теплопровідності для закритих пористих структур можна записати так

$$\lambda_{ef} = \lambda_m \frac{\Pi_b}{\overline{n_b}} \cdot \frac{2\pi r_2}{\Delta S}.$$

Зменшення коефіцієнту теплопровідності пористого матеріалу за рахунок пір буде залежати від коефіцієнту теплової проникності та геометричної характеристики пористої структури.

Для знаходження рівнянь перенесення теплової енергії через відкриті пористі структури (з урахуванням конвекції) було вирішене диференційне рівняння конвективного теплообміну Фур'є-Кіргхофа з урахуванням закону Дарсі та рівнянь Навьє-Стокса. Для вирішення даної моделі запропоновано представити одиницю енергії що передається через пористу структуру як флюїд. Тоді диференційне рівняння енергії Фур'є-Кіргхофа в пористому тілі виглядає так

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial \tau} + (\rho c)_f \vec{w} \nabla T = \lambda_{ef} \nabla^2 T ,$$

де m – індекс, що відноситься до всього пористого матеріалу;

f – індекс, що відносить до флюїдів;

$\vec{w}\nabla T$ – швидкість зміни температури в елементарному об'ємі флюїду завдяки конвективних потоків всередині пористої структури.

Розглянемо перенесення флюїдів по пористому тілу уздовж осі y. З урахування гравітаційних сил, які направлені протилежно до осі y та з урахуванням проникності пористого матеріалу за законом Дарсі, отримаємо диференційні рівняння для усталеного режиму

$$\begin{cases} w_y \dfrac{\partial w_y}{\partial y} = -g - \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial (\mathrm{P})}{\partial y} + \nu \dfrac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} \\ w_y = -\dfrac{K}{\mu}\dfrac{\partial (\mathrm{P} + \rho g h)}{\partial y} \end{cases}.$$

Приймаючи сталими коефіцієнт фільтрації по об'єму тіла, після деяких перетворень отримаємо

$$\left(\frac{K}{\mu}\right)^2 \frac{\partial (\mathrm{P} + \rho g y)}{\partial y} \frac{\partial^2 (\mathrm{P} + \rho g y)}{\partial y^2} = -\left[g + \frac{1}{\rho}\frac{\partial (\mathrm{P})}{\partial y} + \frac{K}{\rho}\frac{\partial^2 (\mathrm{P} + \rho g y)}{\partial y^2} \right].$$

З даного рівняння розподіл тиску по об'єму пористого тіла залежить лише від властивостей флюїду, сили гравітації та коефіцієнта фільтрації. Після розв'язування даного рівняння шляхом заміни змінних та інтегруванням з пониженням порядку рівняння отримано коефіцієнт дифузійного потоку маси та, підставивши його в диференційне рівняння теплопровідності, отримаємо

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial \tau} + (\rho c)_f \nu \frac{dT}{dy} = \lambda_{ef} \frac{d^2T}{dy^2} + L \cdot \frac{A}{\frac{\rho g \left(\frac{K}{\mu}\right)^2 + \nu \frac{K}{\mu}}{2\left(\frac{K}{\mu}\right)^2} y^2 + C_1 y + C_2} \cdot B \cdot T^n \cdot c_f \cdot \frac{dT}{dy}.$$

Розглядаючи передачу теплової енергії як рух флюїду у порі можна сказати, що $\frac{K}{\mu}$ характеризує теплову проникність тіла завдяки фононів. Добуток ρg відображає перенесення енергії природною конвекцією, яка залежить від квадрату геометричної довжини пори (оскільки для канальної пористості за граничних умов $y=b$, $b=d_1$, то $y^2 = {d_1}^2$). Концентрація виражає собою кількість флюїду в одиниці об'єму й можливо представити її як добуток об'ємної теплоємності на температуру та на константу. Причому, теплоємність та густину флюїду за атмосферного тиску можна розписати як величини, залежні тільки від температури. Добуток густини флюїду на елементарний об'єм дорівнюватиме масі флюїду. Об'єднуючи емпіричні коефіцієнти та константи, диференційне рівняння теплопровідності виглядатиме так

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{ef} \frac{d^2T}{dy^2} + \left[C_3 \frac{f(T)}{\chi y^2 + C_1 y + C_2} - C_{ТФХ} \right] \frac{dT}{dy},$$

де C – емпіричні коефіцієнти.

Приймемо, що маса елементарного флюїду є величиною сталою. Враховуючи те, що ефективний коефіцієнт теплопередачі у даному випадку не враховує передачу енергії конвекцією та випромінюванням, отримаємо

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \cdot \phi \cdot \Gamma \frac{d^2T}{dy^2} + C_5 \left[C_4 \frac{f(T)}{\chi y^2 + C_1 y + C_2} - 1 \right] \frac{dT}{dy},$$

де $\chi = \frac{\rho g \left(\frac{K}{\mu}\right)^2 + \upsilon \frac{K}{\mu}}{2\left(\frac{K}{\mu}\right)^2}$ - коефіцієнт, що виражає теплову проникність матеріалу для природних конвективних токів.

Введемо додаткове умовне позначення – геометричну характеристику відкритої пористості

$$\Gamma_O = \frac{1}{\chi \overline{d_1}^2 + C_1 \overline{d_1} + C_2}.$$

Дана функція є сталою для конкретного матеріалу з відомою структурою пір. Після деяких спрощень на основі раніше проведених експериментів отримаємо рівняння, що описує перенесення теплової енергії флюїдами у відкритих пористих структурах

$$Q = \lambda \cdot \phi \cdot \Gamma \Delta T + \Gamma_O \left(C_7 T^2 + C_8 T \right).$$

Рівняння описує не тільки перенесення теплової енергії у канальних порах, а й також враховує існуючі закриті пори у матеріалі. Для знаходження констант рівняння перенесення теплової енергії флюїдами у відкритих пористих структурах спочатку знаходився добуток $\phi \cdot \Gamma$ для матеріалу. Потім для волокнистих матеріалів знайдено добутки $C_7 \cdot \Gamma_O$ та $C_8 \cdot \Gamma_O$, змінюючи температуру за сталої структури матеріалу та змінюючи товщину матеріалу та довжину пір за сталої температури.

Фото запатентованої установки для знаходження характеристик пористої структури та теплової проникності пористих теплоізоляційних матеріалів, у якої металева губка зі сталі 12Х17, наведено на рисунку 17.

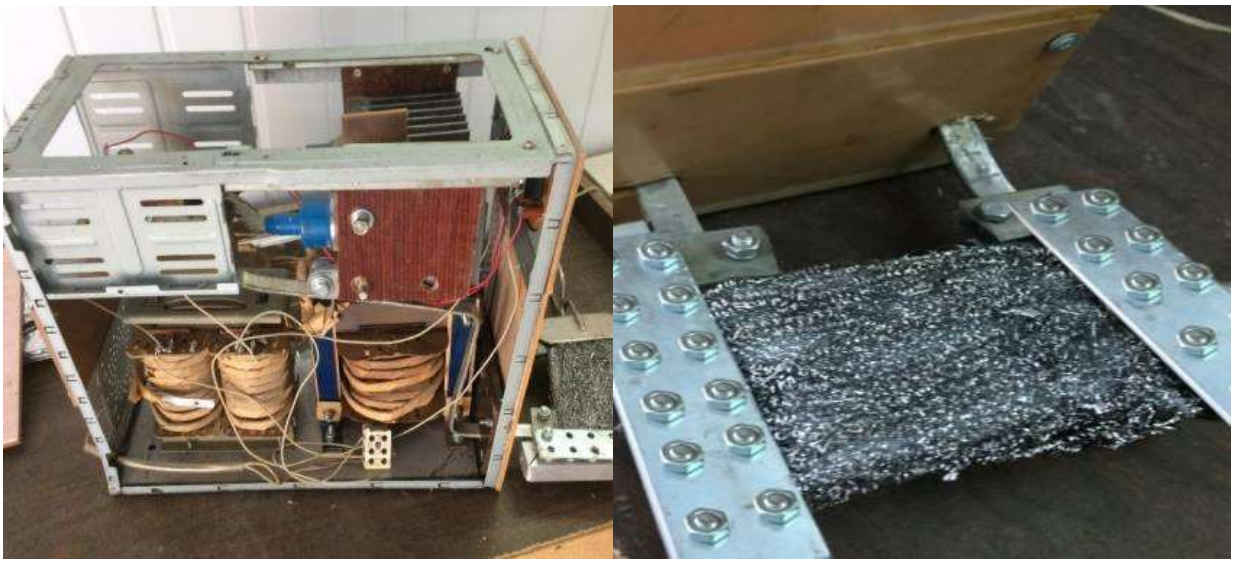


Рис. 17. Фотографія розробленої установки та пористо-волоконного зразка сталі 12Х17 у затискачах

Знання коефіцієнту проникності систем та ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих матеріалів є дуже важливим для розрахунку теплоенергетичного обладнання, тому було знайдено значення теплової проникності для розповсюджених теплоізоляційних матеріалів. Для вимірювання теплопровідності зернистих та порошкових матеріалів найкраще використовувати установки, розроблені за принципом коаксіальних циліндрів, розробленим Дешко В.І. Вимірювання теплопровідності пористих будівельних матеріалів з закритими порами здійснювалось вимірювачем теплопровідності ИТП-МГ4.

Після проведення експериментів були визначені геометричні характеристики пористої структури та теплова проникність пористих теплоізоляційних матеріалів. Результати експериментів занесені до таблиці 2. Використання даних характеристик дозволяє визначити ефективний коефіцієнт теплопровідності будь-якої пористої структури знаючи коефіцієнт теплопровідності матеріалу та геометричні характеристики пористої структури. Так, розроблена методика дозволяє знизити трудомісткість робіт при визначенні ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих структур. Похибка методу складає менше 8 %.

Таблиця 2. Характеристики пористої структури та теплова проникність пористих теплоізоляційних матеріалів

Пористий матеріал	$\phi \cdot \Gamma \cdot \delta$	$\Gamma_O C_7$, Вт/(м^2 ·К^2)	$\Gamma_O C_8$, Вт/(м^2 ·К)
Металева губка з 12Х17 П=70%	0,529	0,241	104,76
Металева губка з 12Х17 П=50%	0,529	0,16148	70,19
Металева губка з 12Х17 П=30%	0,529	0,0583	25,34
Пінобетон	0,434	0	0
Піно-пемзобетон	0,388	0,011	17,35
Газобетон	0,681	0	0
Вогнетривка цегла	0,824	0	0
Вогнетривка цегла порожнеча 22%	0,824	0,18962	81,24
Вогнетривка цегла порожнеча 40%	0,824	0,2734	116,18
Черепашник	0,712	0	0
Шамотна цегла	0,871	0	0
Термоізоляція ISOVER	0,482	0,162	68,24
Мінеральна скловата	0,473	0,188	72,39
Засипка керамзиту	0,878	0,037	54,36

Знайдено геометричні характеристики пористої структури та теплову проникність чотирнадцяти пористих матеріалів, що широко використовують у промисловості.

ВИСНОВКИ

Вирішена актуальна проблема формування теплофізичних властивостей макропористих теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкцій теплового захисту шляхом регулювання процесів тепломасообміну в пористих структурах, для відомих умов експлуатації, а також теоретично обґрунтовано особливості процесів енергообміну у пористому середовищі.

1. Проведено аналіз закономірностей впливу макропористої структури на основні теплофізичні властивості матеріалу та визначено такі комплексні показники (пористість, кількість пір, розташування пір в просторі, форма пори та показники стану повітря у порах), які повною мірою відображають пористу структуру і тепломасообмінні процеси у ній, що дало можливість виконати системні дослідження теплофізичних властивостей пористих структур теплоізоляційних

матеріалів. Для визначення енергоємності створених пористих теплоізоляційних матеріалів використовується енергія формування пористої структури.

2. Визначено можливості формування пористої структури дифузійним та деструкційним генезисом пір. Генезис пористої структури матеріалу впливає на швидкість утворення пір та швидкість їх зростання у суміші матеріалів. На основі експериментального дослідження особливостей процесу формування пористої структури у глиноземистих теплоізоляційних матеріалів визначено функціональні залежності ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів від підведеної енергії.

Висунуто та підтверджено гіпотезу про поетапну зміну кількості пір та їх об'єму під час термообробки сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу. Запропоновані рівняння розрахунку кількості пір для процесів утворення пір при бінарній хімічній реакції, при кристалізації, при пароутворенні.

3. Емпірично встановлено функціональний зв'язок параметрів процесу утворення пористої структури гідросилікатів від технологічних параметрів термічної обробки, що дало можливість розробити розрахункову модель прогнозування пористих структур елементів теплового захисту енергетичного обладнання.

а) Так, існує три періоди зміни комплексних показників пористої структури теплоізоляційного матеріалу під час формування його структури завдяки підведенню теплової енергії до сировинної суміші. Перший період – етап зниження кількості пір, що залежить від пластичності матеріалу. Другий етап – рівномірне зменшення кількості пір в матеріалі, за рахунок їх поєднання. Третій етап – етап заростання об'єму пір.

б) Вперше знайдено узагальнюючий показник зміни кількості пір для глиноземистих матеріалів, що чисельно дорівнює кількості центрів пороутворення.

в) Проведені експерименти дозволяють визначити основні закономірності 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 (температура термообробки в діапазоні 120… 1250 °С та час термообробки до 2,5 год) та склад сировинної суміші.

4. Вперше досліджено зміну процесів енергообміну під час варіювання комплексними показниками в пористому середовищі. Знайдено функціональну залежність коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних пористих матеріалів від комплексних показників пористої структури та визначено ступінь впливу конвекції в порах на загальний термічний опір теплопровідності теплоізоляційних матеріалів та пористих конструкцій теплового захисту, що дало можливість знайти рівні варіювання комплексними показниками пористої структури, які включають екстремальні значення коефіцієнту теплопровідності.

а) Збільшення розміру каналів у тепловому захисті енергетичного обладнання з 3,2 мм до 15 мм сприяє збільшенню конвективної складової ефективного коефіцієнту теплопровідності у 2,5 рази.

б) За різницею температур по порі більше ніж 31 °С, повітря в каналах 8 мм конструкції теплового захисту енергетичного обладнання сприяє перенесенню теплоти конвекцією, а при нижчих температурах – збільшує термічний опір теплопровідності.

в) Габаритний розмір пори менше за 7 мм не сприяє зміні ефективного коефіцієнту теплопровідності теплоізоляційного матеріалу від форми цієї пори.

г) Для діаметру пори у 2 мм наявна лише мікроконвекція, що не впливає на перенесення теплової енергії. Для діаметру пори/пустоти у 5 мм виникає конвекція, але загальний опір те-

плоізоляційного матеріалу з порою вище за опір теплоізоляційного матеріалу без пори. Для діаметру пустоти у 10 мм й більше конвекція стає суттєвою та зменшує термічний опір настільки, що він стає менший за термічний опір теплопровідності матеріалу без пір.

д) Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності від розміру пори є логарифмічною.

е) Кількість пір для матеріалів однакової пористості значно впливає на ефективний коефіцієнт теплопровідності (для глиноземистих теплоізоляційних матеріалів різниця досягає 29,9 %).

5. Використовуючи метод планування експерименту, вперше знайдено узагальнене рівняння залежності ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих матеріалів від визначених комплексних показників (з урахуванням емпірично знайдених областей визначення), яке дозволяє розраховувати термічний опір теплопровідності високопористих матеріалів та виробів від розміру, форми та кількості пір.

Теплопровідність початкового матеріалу без пір $\lambda_{мат}$ у дослідженому діапазоні від 0,05 до 0,95 Вт/(м·К) найменше впливає на ефективний коефіцієнт теплопровідності кінцевого матеріалу. Розмір пір вздовж теплового потоку більше за 4 мм збільшує ефективну теплопровідність матеріалу. Коефіцієнт теплопровідності кінцевого матеріалу має нелінійну залежність від градієнту температури по порі. Кількість пір через коефіцієнти парних взаємодій прямопропорційно впливають на ефективний коефіцієнт теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок.

6. Знайдено умову термодинамічної фазової рівноваги пори з урахуванням поверхневого натягу та час її виникнення в початковій сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу, що надало можливість управляти процесом пороутворення у сировинній суміші матеріалу.

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

7. Вперше розроблено розрахункову математичну модель, яка описує пористу структуру матеріалу на стадії формування пір у сировинній суміші завдяки підведенню теплоти з урахуванням хімічних реакцій.

8. Розроблену методологію формування теплофізичних властивостей елементів теплового захисту та теплоізоляційних матеріалів шляхом регулювання процесів тепломасообміну, за рахунок зміни градієнту температури в пористих структурах, запропоновано до виробництва, а також наведено практичні рекомендації для створення теплоізоляційних матеріалів.

а) Створена вогнетривка цегла набором пластин з заданими структурними характеристиками. Технологічні параметри: температура під час пресування складала 200 °С; час витримки за даної температури 10 хв.; після пресування цегла поміщалася у піч, де обпалювалася при температурі 1250 °С протягом 2 годин. Теплопровідність виробленої цегли склала 0,45 Вт/(м·К), питома теплоємність 0,93 кДж/(кг·К), а міцність на стискання 7,1 МПа.

б) Створено керамзит з покращеними теплофізичними властивостями для використання в якості засипки. Технологія створення: глиняна суміш підсушується до вологості 38 % та формуються гранули (шляхом пресування сіткою з коміркою 6×20 мм); перша термообробка у печі - 15 хвилин за 270 °С; після нагрівальної печі гранули засипаються до барабанної печі, де обпалюються за температури 1250 °С протягом 1,5 години. Коефіцієнт теплопровідності отриманого керамзиту склав 0,0415 Вт/(м·К), питома теплоємність (насипна) при 25 °С

0,81 кДж/(кг·К). Теплоізоляційні властивості по відношенню до існуючих матеріалів покращено на 59 %.

в) Створено наповнювач для бетонів та вогнетривких бетонів на основі білої глини. Знайдено оптимальні параметри термообробки: температура термообробки 200 ºС, час термообробки 15 хв., початкова вологість суміші 50 %.

г) Створено вогнетрив шлікерним литтям з раціональною структурою. Технологічні параметри: попередня термообробка у печі проводиться протягом 15 хв. за температури 272 ºС; основна термообробка - протягом 1,5 годин за температури 1200 ºС. Міцність на стискання такої цегли 7,3 МН/м^2, а коефіцієнт теплопровідності 0,44 Вт/(м·К).

д) Запропоновано новий хімічний склад та спосіб приготування суміші для виготовлення композиційного вогнетривкого бетону.

е) Гідросилікат, виготовлений в промислових умовах закладався у форму та заливався розчином цементу, а отриманий виріб використовувався тепловою ізоляцією будівель, споруд та енергетичного обладнання. Отримана теплоізоляція мала такі теплофізичні характеристики: коефіцієнт теплопровідності (0,114…0,119) Вт/(м·К), питома теплоємність за 22 ºС становила (1,33…1,41) кДж/(кг·К).

9. Розроблено розрахункову модель перенесення теплової енергії крізь пористі та волокнисто-пористі структури, завдяки чому стало можливим знизити трудомісткість робіт при визначенні ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих структур. Похибка методу складає менше 8 %.

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, лише визначивши попередньо два напівемпіричних коефіцієнта. 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.

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

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Чейлытко, А.А. Управление теплофизическими характеристиками пористого теплоизоляционного материала [Текст]/ А.А. Чейлытко // Металлургическая теплотехніка. – 2012. – № 4 (19). – С. 183 – 189. (Фахова).

2. Чейлытко, А.А. Исследование влияния пор на теплопроводность материалов [Текст] / А.А. Чейлытко // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – № 10. – С. 14 – 17. (Фахова).

3. Чейлытко, А.А. Исследование формирования пор во вспучивающемся материале [Текст] / А.А. Чейлытко // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – № 13. – С. 38 – 40. (Фахова).

4. Чейлытко, А.А. Влияние геометрических размеров вихревого аппарата на его аэродинамическое сопротивление [Текст] / А.А. Чейлытко // Вос-

точноевропейский журнал передовых технологий. – 2013. – №6/8 (66). – С. 45 – 49. (Фахова).

5. Павленко, А.М. Експериментальні дослідження впливу пористості на теплопровідність матеріалу [Текст] / А.М. Павленко, І.Г. Яковлева, А.О. Чейлитко, С.В. Ільїн // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія. – 2014. – № 6 – с.79-84 (Фахова).

6. Pavlenko, A. The rate of formation pores in the material which swells [Text] / A. Pavlenko, A. Cheylyitko // Energy, Energy saving and ration Nature Use. Kazimierz Pułaski University of Technology and Humanities in Radom, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. – 2014. p. 31 – 37. (Міжнародне видання, Biblioteka Narodowa).

7. Чейлытко, А.А. Определение коэффициента теплопроводности пористых металлических изделий [Текст] / А.А. Чейлытко, М.А. Носов // Научный вестник. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком» – 2014. – №1. – С. 111 – 118. (Міжнародне видання, РИНЦ).

8. Pavlenko, A. Basis of forming pores in the material based on argil and their effect on thermal conductivity [Text] / A. Pavlenko, A. Cheylyitko // Energy, Energy saving and ration Nature Use. Kazimierz Pułaski University of Technology and Humanities in Radom, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. – №2(3). – 2014. p. 81 – 84. (Міжнародне видання, Biblioteka Narodowa)

9. Чейлитко, А.О. Зародження пор та їх вплив на властивості матеріалу [Текст] / А.О. Чейлитко // Технологический аудит и резерві производства. – 2015. – № 5/1 (25). – С. 30 – 35.(Фахова).

10. Чейлытко, А.А. Влияние синтеза исходной смеси и пенообразователей на образование пористой структуры [Текст] / А.А. Чейлытко // Восточно–европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №5/8 (77). – С. 35 – 38. (Фахова, Scopus).

11. Павленко, А.М. Влияние расположения пор на электронную теплопроводность пористого металлического материала [Текст] / А.М. Павленко, А.В. Кошлак, А.А. Чейлытко, М.А. Носов // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика : збірник наукових праць. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія. – 2015. – № 7 – С. 142 – 149.(Фахова).

12. Pavlenko, A. Investigation of the process of pore formation based materials Hydrosilicates [Text] / A. Pavlenko, A. Cheylitko // Energy, Energy saving and ration Nature Use. Kazimierz Pułaski University of Technology and Humanities in Radom, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. – №2(5). – 2015. – p. 87 – 98. (Міжнародне видання, Biblioteka Narodowa).

13. Павленко, А.М. Параметры газа агента-порообразователя внутри замкнутой сферической поры в состоянии равновесия [Текст] / А.М. Павленко, А.А. Чейлытко, А.В. Кошлак, М.А. Носов // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2015. – № 62 (1171) – С. 28 – 35. (Фахова).

14. Pavlenko, A. Dimensions of the nucleus agent pore former closed spherical pores [Text] / A. Cheilytko, A. Pavlenko, H.Kochlak // Journal of New Technologies in Environmental Science. - 2016. No. 3, vol. 1. P. 101–112. (Міжнародне видання, Biblioteka Narodowa).

15. Cheylyitko, A. A study of the rates of pore nucleation and pore growth in alumina-based thermal insulation materials [Текст] / A. Cheylyitko // Восточно–европейский журнал передовых технологий. – 2016. – №8 (80). – С. 56 – 62. (Фахова, Scopus).

16. Чейлитко, А.О. Дослідження можливості зміни коефіцієнту теплопровідності металів шляхом зміни розмірів та розташування пор [Текст] / А.О. Чейлитко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2016. – № 2– С. 82 – 89.(Фахова).

17. Pavlenko, A. Study of the formation of gas-vapor in the liquid mixture [Text] / A. Pavlenko, H. Koshlak, A. Cheilytko, M. Nosov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics. Materials science. – 2016. – Vol 4. – №5(82). – P. 58–65. (Фахова, Scopus).

18. Cheilytko, A. Finding of the generalized equation of thermal conductivity for porous heat-insulating materials [Text] // Technology audit and production reserves. – 2016. – Т. 5. – №. 1 (31). – С. 4-10. (Фахова).

19. Чейлитко, А.О. Дослідження впливу форми пор на тепловий опір пористих теплоізоляційних матеріалів [Текст] / А.О. Чейлитко, А.А. Чейлитко // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 3– С. 3 – 9.(Фахова).

20. Павленко, А.М. Композиційна високопориста теплова ізоляція з ефективними параметрами пористості [Текст] / А.М. Павленко, А.О. Чейлитко, М.А. Носов // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 42 (1214) – С. 92 – 96.(Фахова).

21. Pavlenko, A.M. Research of effective thermal conductivity and its parts in porous metallic materials with different parameters of porosity [electronic resource]/ A.M. Pavlenko, H.V. Koshlak, A.O. Cheilytko, M.A. Nosov, A.V. Syzonenko // Metal journal, Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – № 12. – P. 66 – 75.

22. Pavlenko, A.M. Research Of Influence Of The Perforation Form In Metal Products On Their Thermal Conductivity [Text] / A. M. Pavlenko, A.V. Koshlak, A.A. Cheilytko, M.A. Nosov // Journal of New Technologies in Environmental Science. - 2016. No. 3, vol. 1. P. 108–112. (Міжнародне видання, Biblioteka Narodowa).

23. Павленко, А.М. Створення високопористого вогнетривкого теплоізоляційного матеріалу [Текст] / А. М. Павленко, І. Г. Яковлєва, А. О. Чейлитко, Р. Р. Матказіна // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229) – С. 91 – 97. (Фахова).

24. Чейлитко, А.О. Комплексные показатели пористой структуры и их связь с теплофизическими характеристиками теплоизоляционных материалов [Текст] / А.О. Чейлитко // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць. – Дніпро: Нова ідеологія. – 2016. – № 8 – с.184-192. (Фахова).

25. Белоконь, Ю.А. Исследование условий взаимодействия интерметаллидных систем при нестационарных температурных процессах [Текст] / Ю.А. Белоконь, А.А. Жеребцов, К.В. Белоконь, А.А. Чейлитко // Будівництво, матеріалознавство, машинобудування: зб. науч. праць. – Дніпро: ДВНЗ «Пріднепр. держ. академія буд-ва і архітектури. – 2017. – Вип.95. – С.35-40. (Фахова).

26. Чейлитко, А.О. Дослідження ефективності створення систем охолодження електронних компонентів на основі пористих металевих виробів [Текст] / А.О. Чейлитко // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – №1– С. 34 – 41 (Фахова).

27. Pavlenko, A. Development of a new method for obtaining claydite with a minimal thermal conductivity coefficient [Text] / A. Pavlenko, A. Cheilytko, O. Lymarenko, O. Taranenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – №87. – P. 11–16. (Фахова, Scopus).

28. Pavlenko, A.M. Mathematical description of heat transfer through the body with a closed porosity [Text] / A. M. Pavlenko, A.A. Cheilytko, M.A. Nosov // Energy, Energy saving and ration Nature Use. Kazimierz Pułaski University of Technology and Humanities in Radom. – №1-2(7,8). – 2017. p. 43 – 50. (Міжнародне видання)

29. Яковлєва, І.Г. Розробка структури нової теплової ізоляції на основі металевих перфорованих пластин [Текст] / І.Г. Яковлєва, А.О. Чейлитко, Ю.О. Бєлоконь, М.А. Носов // Металургія : Збірник наукових праць. – Запоріжжя: ЗДІА, 2017. – Вип. 2 (38). – С. 94-100. (Фахова).

30. Cheilytko, A.A. Creation of effective metallic thermal insulation constructions [Text] / A.A. Cheilytko, S.V. Ilin, M.A. Nosov // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2017. – №6 (162). – P. 103–109. (Scopus).

31. Pavlenko A. Finding equation constants transfer heat fluids in open porous structure [Text] / A. Pavlenko, A. Cheilytko, S. Ilin // II International Scientific-Technical Conference Actual problems of power engineering, construction and environmental engineering – Kielce: Kielce University of Technology. – 2017. – p.123-131(Міжнародне видання)

32. Белоконь, Ю.А. Оптимизация состава интерметаллидного γ-TiAl сплава [Текст] / Ю.А. Белоконь, А.А. Жеребцов, А.А. Чейлитко, К.В. Белоконь // Будівництво, матеріалознавство, машинобудування: зб. науч. праць. – Дніпро: ДВНЗ «Пріднепр. держ. академія буд-ва і архітектури». – 2018. – Вип.104. – С.48-53. (Фахова).

33. Жеманюк П.Д. Исследования кинетики образования интерметаллидных γ-TiAl сплавов при нестационарных температурных условиях [Текст] / П.Д. Жеманюк, Ю.А. Белоконь, А.А. Чейлитко, З.В. Леховицер, А.А. Жеребцов // Металургія : Збірник наукових праць. – Запоріжжя: ЗДІА, 2018. – Вип. 1 (39). – С. 74-79. (Фахова).

Монографії

34. Чейлытко А.А., Павленко А.М. Вспучивание пористого кремнеземистого материала: моногр. Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 130 с. ISBN 978–3–659–46789–9.

35. Чейлытко А.А. Особенности влияния пористости на теплопроводность глиноземистых материалов: моногр. Дніпропетровськ: Середняк Т.К., 2015. – 76 с. ISBN 978–617–7257–62–1.

36. Чейлытко, А.А. Формування теплофізичних властивостей елементів конструкцій теплового захисту шляхом створення прогнозованих пористих структур [Текст]: монографія / А. О. Чейлитко. — Запоріжжя: ЗДІА, 2017. — 318 с. ISBN 978–617–7120–11–6

Тези доповідей

37. Павленко, А.М. Уменьшение неоднородности при структурообразовании пористого материала как фактор улучшения теплофизических характеристик теплоизоляции [Текст] / А.М. Павленко, А.В. Кошлак, А.А. Чейлытко // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент : Матер. 8–й междунар. науч. конф. посвященной 40–летию КарГУ имени академика Е.А. Букетова. (Казахстан, Караганда 18 – 20 июня 2012). – Караганды. – 2012. – С.546 – 550.

38. Чейлытко, А.А. Пути создания экологически чистых пористых теплоизоляционных материалов [Текст] / А.А. Чейлытко // Охорона навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку україни : Матеріали 8 наук.–практ. конф. (Запоріжжя, ЗДІА, грудень 2012). – ЗДІА. – 2012. – С. 3 – 4.

39. Чейлитко, А.О. Вплив форми включень графіту в чавуні на його теплофізичні властивості [Текст] / А.О Чейлитко, А. А. Андрушишина // Молода академія 2013: Всеукраїнська науково–технічна Конференція студентів і молодих вчених (Дніпропетровськ, НМетАУ, 2013) в 2 т. Т. 1. – Дніпро: НМетАУ – 2013. – С. 175.

40. Чейлытко, А.А. Влияние пористости на теплофизические свойства материала [Текст] / А.А. Чейлытко , И.Г. Жовниренко // Молода академія 2013: Всеукраїнська науково–технічна конференція студентів і молодих вчених (Дніпропетровськ, НМетАУ, 2013) в 2 Т. 1. – Дніпро: НМетАУ. – 2013. – С. 187 – 188.

41. Чейлытко, А.А. Исследование формирования пор во вспучивающимся материале [Текст] / А.А. Чейлытко // Технологический аудит и резервы производства «НАУКОВІ ПІДСУМКИ 2013 р.»: Матеріали міжнар. наук.–практ. конф.(Харьков, 2013). – Харків: Технологический центр – 2013. – №4 (13). – С. 38 – 40. ISSN: 2226–3780.

42. Павленко, А.М. Особливості процесу пороутворення в матеріалах, які спучуються на основі глинозему [Текст] / А.О. Чейлитко, А.М. Павленко // Теплотехника и энергетика в металлургии : Труды XVII международной конференции (Дніпро, НМетАУ 7–9 октября 2014). – Дніпро: НМетАУ. – 2014. – С. 138 – 139.

43. Павленко, А.М. Особенности процесса порообразования в вспучивающихся материалах на основе глинозема [Текст] / А.А. Чейлытко, А.М. Павленко, М.А. Носов // Современное общество, образование и наука: сборник нау-

чных трудов по материалам Междунар. науч.–практ. конф. (Росія, Тамбов, 30 июня 2014) в 9 т. Т. 4. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком». – 2014. – С. 114 – 116.

44. Pavlenko A. Dimensions of the nucleus agent pore former closed spherical pores [Text] / A. Cheylyitko, A. Pavlenko // Aktualne Zagadnieniaa Energetyki, Budownictwa i Inżynierii Środowiska: I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-techniczna (Koszalin, 26-28 stycznia 2016). – Koszalin: Politechnika koszalińska. – 2016. – p.75-83

45. Чейлитко, А.О. Дослідження ефективності створення систем охолодження електронних компонентів на основі пористих металевих виробів [Текст] / А.О. Чейлитко // Интегрированные технологии и энергосбережение «итэ-2016»: Материалы VI-й междунар. науч.–практ. конф. (Харьков, 28-30 декабря 2016). – Х:НТУ «ХПІ». – 2016. – с.10

Патенти

46. Спосіб одержання пористого гранульованого матеріалу на основі кремнезему : пат. 76027 Україна / А.О. Чейлитко, А.М. Павленко. – № 2012 0568; заявл. 10.05.2012 ; опублік. 25.12.2012, Бюл. № 24. – 2 с.

47. Вимірювач питомої електропровідності: пат. 107151 Україна : G01R 27/00 / А.О.Чейлитко, М.А. Носов. – № 2000105737 ; заявл. 13.11.2015 ; опублік. 25.05.2016, Бюл. № 10. – 4 с.

48. Вимірювач електронної теплопровідності: пат. 115604 Україна : G01R 27/00 / А.О.Чейлитко, М.А. Носов. – № 201610109 ; заявл. 04.10.2016 ; опублік. 25.04.2017, Бюл. № 8. – 4 с.

АНОТАЦІЯ

Чейлитко А. О. Розвиток теоретичних основ формування теплофізичних властивостей теплоізоляційних матеріалів шляхом управління процесами тепломасообміну в пористих структурах – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2019.

Дисертація 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.

Отримали подальшого розвитку дослідження динаміки формування пористої структури глиноземистих матеріалів. Визначено функціональний зв'язок технологічних параметрів обробки сировинної суміші зі структурними характеристиками пористого матеріалу (кількістю та розміром пор).

Реалізовано математичну модель формування замкнутої сферичної пори яка утворилася завдяки хімічній реакції та зміни термодинамічних параметрів газу у ній. Виконано комплексне експериментальне дослідження з комп'ютерним моделюванням впливу пористої структури на ефективний коефіцієнт теплопровідності високопористих матеріалів. Знайдено узагальнене рівняння ефективної теплопровідності пористого матеріалу, що дозволило розробити методи прогнозування теплофізичних параметрів від пористої структури.

У роботі розроблена методологія створення пористих матеріалів з оптимальними теплофізичними властивостями завдяки зміні пористої структури на стадії формування матеріалів та запропоновані технологічні процеси для створення високоякісної продукції вогнетривів та керамзиту. Також запропоновано для особливих умов експлуатації спосіб створення елемента конструкції теплового захисту з металу та композиційних матеріалів.

Отримані рівняння для визначення ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих структур з закритою та відкритою пористістю які включають розрахунок коефіцієнта теплової проникності та геометричних характеристик пористої структури й базуються на теорії перенесення теплової енергії флюїдами. Знайдено геометричні характеристики пористої структури та теплову проникність чотирнадцяти пористих теплоізоляційних матеріалів.

Ключові слова: Пориста структура, форма пори, розмір пори, ефективний коефіцієнт теплопровідності, конвекція, вогнетриви, керамзит, температурний опір теплопровідності, теплоізоляція, композиційні пористі матеріали.

АННОТАЦИЯ

Чейлытко А. А. Развитие теоретических основ формирования теплофизических свойств теплоизоляционных материалов путем управления процессами тепломассообмена в пористых структурах - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специ-ностью 05.14.06 «Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика». – Национальный университет «Львовская политехника», Львов, 2019.

Диссертация посвящена комплексному решению проблем формирования теплофизических свойств теплоизоляционных материалов путем управления процессами тепломассообмена в пористых структурах с целью создания новых и улучшению уже существующих пористых теплоизоляционных материалов и конструкций из них тепловой защиты элементов промышленных энергетических установок.

Получили дальнейшего развития исследования динамики формирования пористой структуры глиноземистых материалов. Определены функциональные связи технологических параметров обработки сырьевой смеси и структурных характеристик пористого материала (количеством и размером пор).

Реализовано математическое описание формирования замкнутой сферической поры которая образовалась за счет химической реакции и термодинамических параметров газа в ней.

Выполнено комплексное экспериментальное исследование с компьютерным моделированием влияния пористой структуры на эффективный коэффициент теплопроводности высокопористых материалов. Найдено обобщенное уравнение эффективной теплопроводности пористого материала, что позволило разработать методи прогнозирования теплофизических параметров от пористой структуры.

В работе разработана методология создания пористых материалов с оптимальными теплофизическими свойствами за счет изменения пористой структуры на стадии формирования материалов и предложены технологические процессы для создания высококачественной продукции огнеупоров и керамзита. Также предложено для особых условий эксплуатации способ создания элемента конструкции тепловой защиты из металла и композиционных материалов.

Полученные уравнения для определения эффективного коэффициента теплопроводности пористых структур с закрытой и открытой пористостью включающих расчет коэффициента тепловой проницаемости и геометрических характеристик пористой структуры и базируются на теории передачи тепловой энергии флюидами. Найдено геометрические характеристики пористой структуры и тепловую проницаемость четырнадцати пористых теплоизоляционных материалов.

Ключевые слова: Пористая структура, форма времени, размер поры, эффективный коэффициент теплопроводности, конвекция, огнеупоры, керамзит, тепловое сопротивление, теплоизоляция, композиционные пористые материалы.

ANNOTATION

Cheilytko A. A. Development of theoretical foundations for the formation of thermophysical properties of heat-insulating materials by controlling the processes of heat and mass transfer in porous structures - Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.14.06 "Technical Thermophysics and Industrial Thermal Power Engineering". – National University "Lviv Polytechnic", Lviv, 2019.

The dissertation is devoted to the complex problem solving of the formation of thermophysical properties of thermal insulation materials by controlling heat and mass transfer processes in porous structures with the purpose of creating new and improving existing porous heat-insulating materials and structures from them for thermal protection of elements of industrial power plants.

We have further developed the study of the dynamics of formation of the porous structure of alumina materials. Functional relationships of technological parameters and structural characteristics of a porous material (number and size of pores) are determined.

A mathematical description of the formation of a closed spherical pore that was formed due to the chemical reaction and the thermodynamic parameters of the gas in it was realized.

A complex experimental study was performed with computer simulation of the effect of the porous structure on the effective coefficient of thermal conductivity of highly porous materials. A generalized equation for the effective thermal conductivity of a

porous material was found, which made it possible to develop a technique for predicting thermophysical parameters from a porous structure.

In the work the methodology of creating porous materials with optimal thermophysical properties is developed due to the change of porous structure at the stage of formation of materials and the proposed technological processes for the creation of high-quality products of refractories and expanded clay. Also, for the special conditions of operation, the method of creating an element of thermal protection construction from metal and composite materials is proposed.

The obtained equations for determining the effective coefficient of heat conductivity of porous structures with closed and open porosity including the calculation of the thermal permeability coefficient and the geometric characteristics of the porous structure are based on the theory of heat energy transfer by fluids. The geometrical characteristics of the porous structure and the thermal permeability of fourteen porous heat-insulating materials were found.

Key words: porous structure, time form, pore size, effective coefficient of thermal conductivity, convection, refractories, expanded clay, thermal resistance, thermal insulation, composite porous materials.

Підписано до друку 24.04.19 Формат 60х84.
Папір офсетний. Умов. друк. арк. 1.1
Тираж 110 прим. Замов. № 122/11