

Запорізька державна інженерна академія,  
Міністерство освіти і науки України

Національний університет «Львівська політехніка»,  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Чейлитко Андрій Олександрович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 536.2.022+536.24.023+691.421-478  
(індекс)

## ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ  
ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ШЛЯХОМ  
УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ТЕПЛОМАСООБМІНУ В ПОРИСТИХ  
СТРУКТУРАХ  
(назва дисертації)

144 – Теплоенергетика

---

(шифр і назва спеціальності)

14 – Електрична інженерія

---

(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ А.О. Чейлитко  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант Павленко Анатолій Михайлович,  
доктор технічних наук, професор  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Запоріжжя – 2018

## АНОТАЦІЯ

*Чейлитко А.О.* Розвиток теоретичних основ формування теплофізичних властивостей теплоізоляційних матеріалів шляхом управління процесами тепломасообміну в пористих структурах. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» (144 - Теплоенергетика). – Запорізька державна інженерна академія, Національний університет «Львівська політехніка», Львів 2018.

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.

У дисертаційній роботі обґрунтовано вибір теми дослідження; сформульовано мету і задачі досліджень; перелічені зв'язки роботи з науковими програмами; зазначено новизну отриманих результатів, а також практичне значення роботи; наведено відомості про апробацію роботи і публікації автора.

На основі експериментальних та теоретичних досліджень встановлено існування якісних та кількісних залежностей впливу структури різних пористих матеріалів на їх теплофізичні властивості в визначених умовах використання цих матеріалів. Передбачається, що подальші дослідження дисертаційної роботи дозволить створити теоретичні основи узагальнюючі даний вплив й розробить нові ефективні матеріали й технології їх виробництва.

Сформована робоча гіпотеза керованого структуроутворення матеріалів та формування його теплофізичних властивостей. Для підтвердження гіпотези розглянуто вплив структурних характеристик пористих матеріалів на інтенсивність тепломасообмінних процесів у ньому. Виявлено, що структура з

мінімальним коефіцієнтом теплопровідності є 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 показано відсутність єдиного підходу до комплексного впливу пористої структури на теплофізичні властивості матеріалу.

Для визначення енергетичних затрат на формування пористої структури теплоізоляційних матеріалів шляхом підведення до сировинної суміші теплоти, запропоновано рівняння теплового балансу, яке враховує методи і види підведеної енергії. 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 передбачається дослідити основні три напрямку формування пористої структури: у теплоізоляційному матеріалі, у теплоізоляційному виробі та у конструкції теплового захисту енергетичного обладнання.

Для формування 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.

Для відокремлення пористої структури теплоізоляційних матеріалів по технологічним ознакам їх створення та тепломасообміним процесам що протікають у даних структурах запропонована нова класифікація генезису пір у теплоізоляційних матеріалах та конструкціях теплового захисту енергетичного обладнання. Особливістю класифікації є відокремлення дифузійного генезису пористості та генезису деструкцією. Для спрощення формування теплофізичних властивостей теплоізоляційних матеріалів висунуто додаткову гіпотезу по формуванню пористої структури та поетапну зміну комплексних показників пористої структури у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу при підведенні теплової енергії до неї. 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. На основі аналізу отриманих залежностей визначено напрями подальших емпіричних досліджень, які необхідні провести для кожного окремого випадку пороутворення.

Для дослідження особливостей формування пористої структури вогнетривких матеріалів досліджено вплив вмісту оксиду алюмінію у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу на формування пористої структури вогнетриву та знайдено основні шляхи керування розмірами пір за допомогою хімічних реакцій. Для підтвердження висунутих гіпотез стосовно вогнетривких сумішей проведено серії експериментів по дослідженню динаміки зміни пористості від часу термообробки глиноземистих матеріалів. Проведені експерименти дозволяють підтвердити висунуту гіпотезу про поетапну зміну комплексних показників в глиноземистих матеріалах під час їх

термообробки. Порівнявши експериментальні данні з аналітичними розрахунками визначено залежність узагальнюючого показника від термодинамічних умов газу, що надало можливість прогнозувати характеристики пористої структури теплоізоляційних вогнетривких матеріалів.

Для побудування підсумкової моделі зміни пористої структури в сировинній суміші теплоізоляційних матеріалів під час підведення теплової енергії до неї проведено математичний опис формування пористої структури.

Аналітично розраховані умови формування замкнутої сферичної пори, яка утворилася завдяки хімічній реакції у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу. Знайдено початкову температуру та тиск газу в утвореній порі. Встановлено умови термодинамічної фазової рівноваги агента-пороутворювача в сировинній суміші матеріалу під час формування пористої структури, з урахуванням поверхневого натягу. Знайдено критичний радіус ядра пори, при якому можливе формування пори. Проаналізовано можливість існування та формування пір у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу, що спучується. З урахуванням емпіричних досліджень залежності кількості пір під час спучення глиноземистих матеріалів, складено підсумкова модель, що описує зміну пористості в теплоізоляційному матеріалі на основі глинозему. За допомогою отриманих рівнянь можливо управління процесом пороутворення у теплоізоляційних матеріалів.

Для визначення кількості енергії що необхідно підвести до сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу для формування необхідних теплофізичних властивостей розраховане підсумкове рівняння теплового балансу зростаючої пори в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу під час його термообробки з урахуванням ізотермічної стадії. Константи, що входять до рівняння теплового балансу знайдені експериментально для глиноземистих теплоізоляційних матеріалів. Це дозволило створити методи оцінки впливу пористої структури на енергоємність виробництва пористих теплоізоляційних матеріалів. Використовуючи розроблений метод створено нові теплоізоляційні матеріали.

Таким чином з'ясовано якою може бути структура матеріалу та як її отримати. Наступним завданням є уточнення впливу структури на ефективний коефіцієнт теплопровідності. Проведено дослідження впливу розміру, розташування та форми пір на теплопровідність матеріалів. Встановлено, що на коефіцієнт теплопровідності у високопористих електропровідних виробках суттєво впливає форма пір. Так, при формі пір у вигляді еліпса, який розташовано перпендикулярно тепловому потоку більшим діаметром й при розташуванні вздовж теплового потоку різниця в електронній складовій коефіцієнта теплопровідності склала 59%.

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 змодельовані комп'ютерні моделі, в яких враховувався повний ефективний коефіцієнт теплопровідності з врахуванням конвективної та радіаційної складової. Встановлено, що при зменшенні діаметра сферичної пори у теплоізоляційному матеріалі змінюється рух ліній току повітря у порі на спіральний, при цьому швидкість руху конвективних потоків повітря у порі зменшується. Знайдено габаритні розміри пори у теплоізоляційних пористих структурах при яких виникає конвекція, а також знайдена залежність опору теплоізоляційного матеріалу від розмірів пір з врахуванням конвективних потоків в середині пір. Також виявлено вплив температури на конвективну складову ефективного коефіцієнту теплопровідності теплоізоляційних пористих матеріалів та виробів. Лабораторним експериментом було підтверджено отримані залежності, а також, що залежність теплового опору від діаметра пори є логарифмічною. Використання логарифмічних залежностей зміни теплового опору від діаметра пори спрощує формування граничних умов та кількість дослідів при формуванні плану експерименту по визначенню регресійного рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих

теплоізоляційних матеріалів та конструкцій теплового захисту енергетичних установок.

Було складено змішаний композиційний план другого та третього порядку та ймовірно-статистичними методами проведено аналіз коефіцієнтів рівняння регресії. Знайдено узагальнене рівняння залежності ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих матеріалів від визначених показників (з урахуванням емпірично визначених особливостей), яке дозволяє розраховувати тепловий опір конструкцій матеріалів з пористою структурою для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок від основних показників пористої структури. Данні результати дозволяють отримати необхідний коефіцієнт теплопровідності пористого теплоізоляційного матеріалу задаючи структурні характеристики, а також оптимізувати ефективний коефіцієнт теплопровідності конструкцій з матеріалів, що використовуються для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок. Використання результатів дослідження дозволяє значно зменшити коефіцієнт теплопровідності сучасних пористих теплоізоляційних матеріалів та елементів теплового захисту промислових енергетичних установок, що підвищить енергоефективність промисловості держави.

Створено високопористий теплоізоляційний матеріал на основі глинозему шляхом пресування пластин з наступним їх спіканням. Коефіцієнт теплопровідності виробленої цегли дорівнював  $0,45 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , питома теплоємність  $0,93 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , а міцність на стискання  $7,1 \text{ МПа}$ .

Створено пустотний вогнетрив шлікерним литтям з раціональною пористою структурою. Шлікер створювався з сировини з наступними показниками якості: вміст  $\text{SiO}_2$  – 52 %;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 8 %; вміст  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  менше 5 %, вміст  $\text{CaO}$  менше за 10 %. Коефіцієнт теплопровідності виробленої цегли дорівнював  $0,44 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , а міцність на стискання  $5,8 \text{ МПа}$ .

Створено керамзит з покращеними теплофізичними властивостями для використання в якості засипки. Технологія створення: глиняна суміш підсушується до вологості 38 % та формуються гранули, які проходять

двоступеневу термічну обробку. Коефіцієнт теплопровідності отриманого керамзиту склав  $0,0415 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , питома теплоємність (насіпна) при  $25 \text{ }^\circ\text{C}$   $0,81 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

Створено наповнювач для бетонів та вогнетривких бетонів на основі білої глини. Методом планування експерименту знайдено регресійне рівняння коефіцієнту теплопровідності від параметрів термообробки. Методом Лагранжа з використанням умов Куна-Таккера знайдено оптимальні параметри термообробки. Також запропоновано хімічний склад та спосіб приготування суміші для виготовлення композиційного вогнетривкого бетону.

Розроблено методологію формування теплофізичних властивостей матеріалів шляхом управління процесами тепломасообміну в пористих структурах та складено практичні рекомендації по створенню елементів теплового захисту енергетичного обладнання з металу та композиційних матеріалів з особливими умовами експлуатування. Отримано рівняння передачі кількості теплової енергії скрізь пористі структури теплоізоляційних елементів конструкції теплового захисту. Створено математичну модель перенесення теплової енергії крізь тіла з пористою структурою. Отримані рівняння для визначення ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих структур з закритою та відкритою пористістю, що включають розрахунок коефіцієнта теплової проникності та геометричних характеристик пористої структури й базуються на теорії перенесення теплової енергії флюїдами.

Використання коефіцієнту проникності систем та ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих матеріалів є дуже важливим при розрахунку теплоенергетичного обладнання. Після проведення експериментів були визначені геометричні характеристики пористої структури та тепла проникність поширених теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкцій теплового захисту.

**Ключові слова:** Термодинамічні параметри, теплоізоляція, пориста структура, кінетика спучування, ефективний коефіцієнт теплопровідності, мікроконвекція, вогнетриви, керамзит, тепла проникність.



Список публікацій здобувача.

**Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:**

1. Чейлытко, А.А. Управление теплофизическими характеристиками пористого теплоизоляционного материала [Текст]/ А.А. Чейлытко // *Металлургическая теплотехника*. – 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 // *Восточноевропейский 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. Чейлытко, 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. р. 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. Cheylyitko // 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. – р. 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. Cheilytko, A. A study of the rates of pore nucleation and pore growth in alumina-based thermal insulation materials [Текст] / A. Cheilytko // 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. Яковлева, 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

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

33. Жеманюк П.Д. Исследования кинетики образования интерметаллидных  $\gamma$ -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).

34. Павленко, А.М. Вспучивание пористого кремнеземистого материала [Текст] / А.М. Павленко, А.А. Чейлытко // монографія 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 [Текст]: монографія / А. О. Чейлытко. — Дніпро: ПП «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. Чейлытко. — Запоріжжя: ЗДІА, 2017. — 318 с. ISBN 978–617–7120–11–6

#### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

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. Чейлытко, А.О. Вплив форми включень графіту в чавуні на його теплофізичні властивості [Текст] / А.О. Чейлытко, 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 вспучивающемся 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. Особенности процесса порообразования в материалах, які спучуються на основі глинозему [Текст] / А.О. Чейлытко, 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 научных 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. Cheylytko, A. Pavlenko // Aktualne Zagadnienia Energetyki, Budownictwa i Inżynierii Środowiska: I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-techniczna (Koszalin, 26-28 stycznia 2016). – Koszalin: Politechnika koszalińska. – 2016. – p.75-83

45. Чейлытко, А.О. Дослідження ефективності створення систем охолодження електронних компонентів на основі пористих металевих виробів [Текст] / А.О. Чейлытко // Интегрированные технологии и энергосбережение

«ИТЭ-2016»: Материалы VI-й междунар. науч.–практ. конф. (Харьков, 28-30 декабря 2016). – Х:НТУ «ХПИ». – 2016. – с.10

**Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

**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.

**SUMMARY**

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

The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.14.06 «Technical thermophysics and industrial heat power engineering» (144 – Heat power engineering). Zaporizhzhya State Engineering Academy, National university "Lviv Polytechnic", Lviv 2018.

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



In the dissertation work the choice of research topic is substantiated; the purpose and tasks of the research are formulated; listed links to work with scientific programs; the novelty of the received results, as well as the practical value of the work, are indicated; The information about testing of work and publication of the author is given.

On the basis of experimental and theoretical studies, the existence of qualitative and quantitative dependencies of the influence of the structure of various porous materials on their thermophysical properties under certain conditions of the use of these materials has been established. It is supposed that further researches of dissertation work will allow to create theoretical bases generalizing this influence and develop new effective materials and technologies of their production.

The working hypothesis of controlled structure formation of materials and formation of its thermophysical properties is formed. To confirm the hypothesis, the influence of structural characteristics of porous materials on the intensity of heat and mass exchange processes in it is considered. It was found out that the structure with a minimum coefficient of thermal conductivity is a chess arrangement of elongated perpendicular to the heat flux of pores. But this assumption does not take into account the size of the pore, which, as proved, will also affect the effective coefficient of thermal conductivity due to the occurrence of convective flows within the pore. It is also shown that there is no single approach to the complex influence of the porous structure on the thermophysical properties of the material.

To determine energy costs for the formation of the porous structure of thermal insulation materials by bringing to the raw material mixture of heat, the equation of thermal balance is proposed, which takes into account the methods and types of the supplied energy. Therefore, in order to determine the energy that needs to be spent on the formation of the porous structure of the material, it is necessary to find the dependence of the complex parameters of the porous structure on the change in the chemical potential and the transfer of enthalpy due to diffusion.

On the basis of the working hypothesis determined complex indicators that fully reflect the porous structure and the heat-mass-exchange processes in it: porosity,

number of pores, pore position in space, pore form, and gas state indicators in pores. To determine the energy content of porous heat insulation materials and thermal protection structures of industrial power plants, energy is used to form a porous structure. The use of data of complex indicators allows us to create technologies of controlled structure formation of heat-insulating material with given thermophysical properties.

For the required operating conditions it is supposed to investigate the main three directions of formation of the porous structure: in the insulation material, in the thermal insulation product and in the design of the thermal protection of the power equipment.

To form the heat-insulating material, it is necessary to determine the thermodynamic parameters of the gas during pore formation, which will enable to construct a model of porosity change in heat-insulating materials. To form a porous heat-insulating product and a thermal protection design, it is necessary to find a generalized equation of an effective coefficient of thermal conductivity, by which it is possible to optimize the structures of elements of thermal protection structures. The development of the theory of the formation of thermophysical properties in these areas will improve the quality of existing heat-insulating materials, composite materials and metal structures of thermal protection of special purpose.

For the separation of the porous structure of heat-insulating materials on the technological features of their creation and heat-mass-exchange processes occurring in these structures, a new classification of genesis of pores in thermal insulation materials and thermal protection structures of power equipment is proposed. A distinctive feature of the classification is the separation of the diffusion genesis of porosity and the genesis of degradation. To facilitate the formation of the thermophysical properties of insulation materials, an additional hypothesis has been put forward on the formation of a porous structure and a phased change in the complex parameters of the porous structure in the raw material mix of the heat-insulating material when heat energy is supplied to it. To calculate the number of pores and their volume in the first stage of formation of pores in the raw material

mixture of heat-insulating material, the equation of the velocity of pore formation and the number of pores is determined. On the basis of the analysis of the obtained dependences, the directions of further empirical studies, which are necessary for each particular case of powder formation, have been determined.

To study the peculiarities of the formation of the porous structure of refractory materials, the influence of the content of aluminum oxide in the raw material mixture of the heat-insulating material on the formation of the porous refractory structure was investigated and the main methods for controlling pore sizes by chemical reactions were found. A series of experiments on the dynamics of porosity change from the time of heat treatment of alumina materials has been carried out to confirm the hypotheses put forward in relation to refractory mixtures. The conducted experiments allow us to confirm the hypothesis about the phased change of complex indicators in alumina materials during their heat treatment. Comparing experimental data with analytical calculations, the dependence of the generalizing parameter on the thermodynamic conditions of the gas was determined, which made it possible to predict the characteristics of the porous structure of heat-insulating refractory materials.

To construct the final model of the change in the porous structure in the raw mix of heat-insulating materials during the heat energy upgrading, a mathematical description of the formation of the porous structure was carried out for it.

The conditions for the formation of a closed spherical pore formed by the chemical reaction in the raw material mixture of the heat-insulating material are calculated analytically. The initial temperature and gas pressure in the formed pore are found. The conditions of the thermodynamic phase equilibrium of the powder-forming agent in the raw material mixture during the formation of the porous structure, taking into account the surface tension, were established. A critical radius of the nucleus of the pore is found, in which pore formation is possible. The possibility of the existence and formation of pores in the raw material mix of expanding heat-insulating material has been analyzed. Taking into account the empirical studies of the dependence of the number of pores on the development of

alumina materials, a final model describing the change in porosity in a heat-insulating material based on alumina is compiled. With the help of the obtained equations, it is possible to control the process of pore formation in thermal insulation materials.

To determine the amount of energy that must be brought to the raw material mixture of heat-insulating material to form the necessary thermophysical properties, the final equation of the thermal balance of the growing pore in the raw material mixture of the heat-insulating material during its heat treatment, taking into account the isothermal stage, is calculated. The constants included in the heat balance equation are found experimentally for alumina thermal insulation materials. This allowed to create a methodology for assessing the impact of the porous structure on the energy intensity of the production of porous heat-insulating materials. Using the developed technique new thermal insulation materials were created.

Thus it was determined what the structure of the material might be and how to obtain it. The next task is to clarify the effect of the structure on the effective coefficient of thermal conductivity. The study of the influence of size, location and shape of pores on the thermal conductivity of materials was carried out. Thus, in the form of a pore in the form of an ellipse, which is perpendicular to the heat flux with a larger diameter and when located along the heat flux, the difference in the electronic component of the thermal conductivity was 59 %.

To find the generalized equation of the effective thermal conductivity coefficient of porous heat-insulating materials and products used for thermal protection of elements of industrial power plants, the levels of variation of the input parameters of the model are determined. For this modeled computer models, which take into account the full effective coefficient of thermal conductivity, taking into account the convective and radiation component. It was established that when the diameter of the spherical pore decreases in the heat-insulating material, the movement of the lines of the air current in the pore over the spiral changes, with the speed of the convective air flows in the pores decreasing. The overall dimensions of the pores are found in the heat-insulating porous structures in which convection occurs, as well as the dependence of the resistance of the heat-insulating material on

the size of the pores, taking into account convective flows in the middle of the pore, is found. Also, the influence of temperature on the convective component of the effective thermal conductivity coefficient of the heat-insulating porous materials and products was found. The laboratory experiment confirmed the obtained dependences, and also that the dependence of the thermal resistance on the pore diameter is logarithmic. Using logarithmic dependences of thermal resistance change from the pore diameter simplifies the formation of boundary conditions and the number of experiments when forming an experiment plan to determine the regression equation of an effective coefficient of thermal conductivity of porous heat-insulating materials and thermal protection structures of power plants.

A mixed composition plan was drawn up for the second and third order and probabilistic-statistical methods carried out the analysis of the coefficients of the regression equation. The generalized equation of dependence of the effective coefficient of thermal conductivity of porous materials on the determined parameters (taking into account empirically determined features) is found, which allows to calculate the thermal resistance of constructions of materials with a porous structure for thermal protection of elements of industrial power plants from the basic indices of porous structure. The given results allow obtaining the necessary heat conductivity coefficient of a porous heat-insulating material by specifying structural characteristics, as well as optimizing the coefficient of thermal conductivity of structures from materials used for thermal protection of elements of industrial power plants. The use of research results can significantly reduce the thermal conductivity of modern porous heat-insulating materials and elements of thermal protection of industrial power plants, which will increase the energy efficiency of the state's industry.

A high-porous heat-insulating material based on alumina has been created by pressing the plates with subsequent sintering. The heat conductivity coefficient of the bricks produced was  $0,45 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , the specific heat was  $0,93 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ , and the compressive strength was  $7,1 \text{ MPa}$ .

The refractories are produced by casting castings with a rational porous structure. Mixture was created from raw materials with the following quality indicators:  $\text{SiO}_2$  content – 52 %;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 8 %;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  content is less than 5 %;  $\text{CaO}$  content is less than 10 %. The coefficient of thermal conductivity of the produced brick was  $0,44 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , and the compressive strength was 5,8 MPa.

Claydite with improved thermophysical properties was created for use as a filler. Creation technology: clay mixture is dried to a moisture content of 38 % and formed granules, which undergo two-stage heat treatment. The thermal conductivity coefficient of the obtained expanded clay was  $0,0415 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , the specific heat (bulk density) at  $25 \text{ }^\circ\text{C}$   $0,81 \text{ kJ} / (\text{kg}\cdot\text{K})$ .

A filler for concrete and refractory concrete based on white clay was created. The method of planning the experiment found the regression equation of the coefficient of thermal conductivity from the parameters of heat treatment. The optimal parameters of heat treatment were found using the Lagrange method using Kuhn-Tucker conditions. Also, the chemical composition and method of preparation of a mixture for the manufacture of composite refractory concrete are proposed.

The methodology of formation of thermophysical properties of materials by management of processes of heat and mass transfer in porous structures is developed and practical recommendations for creation of elements of thermal protection of power equipment from metal and composite materials with special exploitation conditions are worked out.

The equation of the transfer of the amount of thermal energy throughout the porous structure of the thermal insulation elements of the thermal protection design is obtained. A mathematical model for the transmission of heat energy through a body with a porous structure is created. The equations for determining the effective thermal conductivity coefficient of porous structures with closed and open porosity which include the calculation of the coefficient of thermal permeability and geometric characteristics of the porous structure and are based on the theory of heat transfer with fluids are obtained.

The use of the coefficient of permeability of systems and the effective coefficient of thermal conductivity of porous materials is very important in the calculation of heat and power equipment. After conducting experiments, geometrical characteristics of the porous structure and thermal permeability of the common heat-insulating materials and elements of thermal protection structures were determined.

**Key words:** Thermodynamic parameters, thermal insulation, porous structure, flux kinetics, effective coefficient of thermal conductivity, microconvection, refractories, claydite, thermal permeability.

**Scientific papers, in which the main scientific results of the dissertation are published:**

1. Cheilytko, A.A. Upravleniye teplofizicheskimi kharakteristikami poristogo teploizolyatsionnogo materiala [Tekst]/ A.A. Cheilytko // Metallurgicheskaya teplotekhnika. – 2012. – № 4 (19). – S. 183 – 189.

2. Cheilytko, A.A. Issledovaniye vliyaniya por na teploprovodnost' materialov [Tekst] / A.A. Cheilytko // Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva. – 2013. – № 10. – S. 14 – 17.

3. Cheilytko, A.A. Issledovaniye formirovaniya por vo vspuchivayushchemsya materiale [Tekst] / A.A. Cheilytko // Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva. – 2013. – № 13. – S. 38 – 40.

4. Cheilytko, A.A. Vliyaniye geometricheskikh razmerov vikhrevogo apparata na yego aerodinamicheskoye soprotivleniye [Tekst] / A.A. Cheilytko // Vostochnoyevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2013. – №6/8 (66). – S. 45 – 49.

5. Pavlenko, A.M. Yeksperimental'ni doslidzhennya vplivu poristosti na teploprovídníst' materialu [Tekst] / A.M. Pavlenko, Í.G. Yakovleva, A.O. Cheilytko, S.V. Íl'ín // Tekhníchna teplofizika ta promislova teployenergetika: zbirnik naukovikh prats'. – Dnípropetrovs'k : Nova ídeologíya. – 2014. – № 6 – c.79-84.

6. Pavlenko, A. The rate of formation pores in the material which swells [Text] / A. Pavlenko, A. Cheilytko // 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

7. Cheilytko, A.A. Opredeleniye koeffitsiyenta teploprovodnosti poristykh metallicheskih izdeliy [Tekst] / A.A. Cheilytko, M.A. Nosov // Nauchnyy vestnik. Tambov: OOO «Konsaltingovaya kompaniya Yukom» – 2014. – №1. – S. 111 – 118.

8. Pavlenko, A. Basis of forming pores in the material based on argil and their effect on thermal conductivity [Text] / A. Pavlenko, A. Cheylytko // 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.

9. Cheylytko, A.O. Zarodzhennya por ta їх vpliv na vlastivostí materialu [Tekst] / A.O. Cheylytko // Tekhnologicheskyy audit i rezervi proizvodstva. – 2015. – № 5/1 (25). – S. 30 – 35.

10. Cheylytko, A.A. Vliyanie sinteza iskhodnoy smesi i penoobrazovatelya na obrazovaniye poristoy struktury [Tekst] / A.A. Cheylytko // Vostochno-yeuropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2015. – №5/8 (77). – S. 35 – 38.

11. Pavlenko, A.M. Vliyanie raspolozheniya por na elektronnyuyu teploprovodnost' poristogo metallicheskogo materiala [Tekst] / A.M. Pavlenko, A.V. Koshlak, A.A. Cheylytko, M.A. Nosov // Tekhnichna teplofizika ta promislova teployenergetika : zbirnik naukovikh prats'. – Dniproperetovs'k : Nova ideologiya. – 2015. – № 7 – p. 142 – 149.

12. Pavlenko, A. Investigation of the process of pore formation based materials Hydrosilicates [Text] / A. Pavlenko, A. Cheylytko // 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.

13. Pavlenko, A.M. Parametry gaza agenta-poroobrazovatelya vnutri zamknutoy sfericheskoy pory v sostoyanii ravnovesiya [Tekst] / A.M. Pavlenko, A.A. Cheylytko, A.V. Koshlak, M.A. Nosov // Vestnik NTU «KHPI», Seriya: Novyye



resheniya v sovremennykh tekhnologiyakh. – Khar'kov : NTU «KHPI». – 2015. – № 62 (1171) – S. 28 – 35.

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

16. Cheilytko, A.O. Doslidzhennya mozhyvosti zminy koefitsiyentu teploprovodnosti metaliv shlyakhom zminy rozmiriv ta roztashuvannya por [Tekst] / A.O. Cheilytko // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. – 2016. – № 2– S. 82 – 89.

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.

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.

19. Cheilytko, A.O. Doslidzhennya vplyvu formy por na teplovyy opir porystykh teploizolyatsiynykh materialiv [Tekst] / A.O. Cheilytko, A.A. Cheilytko // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. – Kharkiv: NTU «KHPI». – 2016. – № 3– S. 3 – 9.(Fakhova).

20. Pavlenko, A.M. Kompozytsiyna vysokoporysta teplova izolyatsiya z efektyvnymy parametramy porystosti [Tekst] / A.M. Pavlenko, A.O. Cheilytko, M.A. Nosov // Visnyk NTU «KHPI», Seriya: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh. – Kharkiv: NTU «KHPI». – 2016. – № 42 (1214) – S. 92 – 96.

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. Pavlenko, A.M. Stvorennya vysokoporystoho vohnetryvkooho teploizolyatsiynoho materialu [Tekst] / A. M. Pavlenko, I. H. Yakovlyeva, A. O. Cheilytko, R. R. Matkazina // Visnyk NTU «KHPI», Seriya: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh. – Kharkiv : NTU «KHPI». – 2017. – № 7 (1229) – S. 91 – 97.

24. Cheilytko, A.O. Kompleksnye pokazately porystoy struktury y ykh svyaz' s teplofyzicheskyimi kharakterystykami teployzolyatsyonnykh materiyalov [Tekst] / A.O. Cheilytko // Tekhnichna teplofizyka ta promyslova teploenerhetyka: zbirnyk naukovykh prats'. – Dnipro: Nova ideolohiya. – 2016. – № 8 – c.184-192

25. Belokon', YU.A. Yssledovanye uslovyi vzaymodeystviya yntermetallydnykh system pry nestatsyonarnykh temperaturnykh protsessakh [Tekst] / YU.A. Belokon', A.A. Zherebtsov, K.V. Belokon', A.A. Cheilytko // Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannya: zb. nauch. prats'. – Dnipro: DVNZ «Pridnepr. derzh. akademiya bud-va i arkhitektury. – 2017. – Vyp.95. – S.35-40.

26. Cheilytko, A.O. Doslidzhennya efektyvnosti stvorennya system okholodzhennya elektronnykh komponentiv na osnovi porystykh metalevykh vyrobiv [Tekst] / A.O. Cheilytko // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. – Kharkiv: NTU «KHPI». – 2017. – №1– S. 34 – 41

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.

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.

29. Yakovlyeva, I.H. Rozrobka struktury novoyi teplovoyi izolyatsiyi na osnovi metalevykh perforovanykh plastyn [Tekst] / I.H. Yakovlyeva, A.O. Cheilytko, YU.O. Belokon', M.A. Nosov // Metalurhiya : Zbirnyk naukovykh prats'. – Zaporizhzhya: ZDIA, 2017. – Vyp. 2 (38). – S. 94-100.

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.

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

32. Belokon', YU.A. Optymyzatsyya sostava yntermetallydnoho g-TiAl splava [Tekst] / YU.A. Belokon', A.A. Zherebtsov, A.A. Cheilytko, K.V. Belokon' // Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannya: zb. nauch. prats'. – Dnipro: DVNZ «Pridnepr. derzh. akademiya bud-va i arkhitektury». – 2018. – Vyp.104. – S.48-53.

33. Zhemanyuk P.D. Yssledovannya kynetyky obrazovannya yntermetallydnykh g-TiAl splavov pry nestatsyonarnykh temperaturnykh uslovyyakh [Tekst] / P.D. Zhemanyuk, YU.A. Belokon', A.A. Cheilytko, Z.V. Lekhovytsler, A.A. Zherebtsov // Metalurhiya : Zbirnyk naukovykh prats'. – Zaporizhzhya: ZDIA, 2018. – Vyp. 1 (39). – S. 74-79.

34. Pavlenko, A.M. Vspuchyvanye porystoho kremnezemystoho materyala [Tekst] / A.M. Pavlenko, A.A. Cheilytko // monohrafiya Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 130 s. ISBN 978–3–659–46789–9.

35. Cheilytko, A.A. Osobennosty vlyyanyya porystosty na teploprovodnost' hlynozemystrykh materyalov [Tekst]: monohrafiya / A. O. Cheilytko. — Dnipro: PP «Serednyak T.K.», 2015. — 76 s. ISBN 978–617–7257–62–1.

36. Cheilytko, A.A. Formuvannya teplofizychnykh vlastyvostry elementiv konstruktsiy teplovoho zakhystu shlyakhom stvorenyya prohnozovanykh porystykh struktur [Tekst]: monohrafiya / A. O. Cheilytko. — Zaporizhzhya: ZDIA, 2017. — 318 s. ISBN 978–617–7120–11–6

### **Scientific works certifying the testing of the dissertation materials:**

37. Pavlenko, A.M. Umen'sheniye neodnorodnosti pri strukturoobrazovanii poristogo materiala kak faktor uluchsheniya teplofizicheskikh kharakteristik teploizolyatsii [Tekst] / A.M. Pavlenko, A.V. Koshlak, A.A. Cheilytko // Khaos i struktury v nelineynykh sistemakh. Teoriya i eksperiment : Mater. 8–y mezhdunar. nauch. konf. posvyashchenoy 40–letiyu KarGU imeni akademika Ye.A. Buketova. (Kazakhstan, Karaganda 18 – 20 iyunya 2012). — Karagandy. — 2012. — S.546 – 550.

38. Cheilytko, A.A. Puti sozdaniya ekologicheski chistykh poristykh teploizolyatsionnykh materialov [Tekst] / A.A. Cheilytko // Okhorona navkolishn'ogo seredovishcha promislovikh regioniv yak umova stalogo rozvitku ukraïni : Materiali 8 nauk.–prakt. konf. (Zaporizhzhya, ZDIA, gruden' 2012). — ZDIA. — 2012. — S. 3 – 4.

39. Cheilytko, A.O. Vpliv formi vklyuchen' grafitu v chavuní na yogo teplofizichní vlastivostí [Tekst] / A.O Cheilytko, A. A. Andrushishina // Moloda akademiya 2013: Vseukraïns'ka naukovo–tekhnichna Konferentsiya studentiv í molodikh vchenikh (Dnípropetrovs'k, NMetAU, 2013) v 2 t. T. 1. — Dnípro: NMetAU – 2013. — S. 175.

40. Cheilytko, A.A. Vliyaniye poristosti na teplofizicheskiye svoystva materiala [Tekst] / A.A. Cheilytko , I.G. Zhovnirenko // Moloda akademiya 2013: Vseukraïns'ka naukovo–tekhnichna konferentsiya studentiv í molodikh vchenikh (Dnípropetrovs'k, NMetAU, 2013) v 2 T. 1. — Dnípro: NMetAU. — 2013. — S. 187 – 188.

41. Cheilytko, A.A. Issledovaniye formirovaniya por vo vspuchivayushchimsya materiale [Tekst] / A.A. Cheilytko // Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva «NAUKOVÍ PÍDSUMKI 2013 r.»: Materiali mízhnar. nauk.–prakt. konf.(Khar'kov, 2013). – Kharkív: Tekhnologicheskii tsentr – 2013. – №4 (13). – S. 38 – 40. ISSN: 2226–3780.

42. Pavlenko, A.M. Osoblivostí protsesu poroutvorenniya v materialakh, yakí spuchuyut'sya na osnoví glinozemu [Tekst] / A.O. Cheilytko, A.M. Pavlenko // Teplotekhnika i energetika v metallurgii : Trudy XVII mezhdunarodnoy konferentsii (Dnipro, NMetAU 7–9 oktyabrya 2014). – Dnipro: NMetAU. – 2014. – S. 138 – 139.

43. Pavlenko, A.M. Osobennosti protsessa poroobrazovaniya v vspuchivayushchikhsya materialakh na osnove glinozema [Tekst] / A.A. Cheilytko, A.M. Pavlenko, M.A. Nosov // Sovremennoye obshchestvo, obrazovaniye i nauka: sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunar. nauch.–prakt. konf. (Rosíya, Tambov, 30 iyunya 2014) v 9 t. T. 4. Tambov: OOO «Konsaltingovaya kompaniya Yukom». – 2014. – S. 114 – 116.

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

45. Cheilytko, A.O. Doslídzhennya yefektivností stvorenniya sistem okholodzhennya yelektronnikh komponentív na osnoví poristikh metalevikh virobív [Tekst] / A.O. Cheilytko // Integrirovannyye tekhnologii i energosberezheniye «ite-2016»: Materialy VI-y mezhdunar. nauch.–prakt. konf. (Khar'kov, 28-30 dekabrya 2016). – KH:NTU «KHPÍ». – 2016. – s.10

**Scientific works, which additionally reflect the scientific results of the dissertation:**

**Patents:**

46. Sposib oderzhannya porystoho hranul'ovanoho materialu na osnovi kremnezemu : pat. 76027 Ukraine / A.O. Cheilytko, A.M. Pavlenko. – № 2012 0568; zayavl. 10.05.2012 ; opublik. 25.12.2012, Byul. № 24. – 2 s.

47. Vymiryuvach pytomoyi elektroprovidnosti: pat. 107151 Ukraine : G01R 27/00 / A.O.Cheilytko, M.A. Nosov. – № 2000105737 ; zayavl. 13.11.2015 ; opublik. 25.05.2016, Byul. № 10. – 4 s.

48. Vymiryuvach elektronnoyi teploprovidnosti: pat. 115604 Ukraine : G01R 27/00 / A.O.Cheilytko, M.A. Nosov. – № 201610109 ; zayavl. 04.10.2016 ; opublik. 25.04.2017, Byul. № 8. – 4 s.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	35
1. ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛУ З ПРОГНОЗОВАНИМИ ТЕПЛОФІЗИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ .....	47
1.1 Вплив структурних характеристик пористих матеріалів на інтенсивність тепломасообмінних процесів .....	48
1.2 Методи формування пористої структури та її зв'язок з теплофізичними характеристиками матеріалу .....	62
1.3 Вплив синтезу вихідної суміші та піноутворювачів на утворення пористої структури .....	69
1.4 Енергетичний баланс пороутворення .....	74
1.5 Комплексні показники пористої структури .....	78
1.6 Висновки до розділу 1 .....	81
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ВИКЛАДЕННЯ ЗАРОДЖЕННЯ ПІР ТА ШВИДКІСТЬ ЇХ УТВОРЕННЯ В СИРОВИННІЙ СУМІШІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	83
2.1 Генезис пір у теплоізоляційних матеріалах та конструкціях теплового захисту енергетичного обладнання .....	84
2.2 Швидкість пороутворення .....	93
2.3 Висновки до розділу 2 .....	103
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОРИСТИХ СТРУКТУР ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ .....	104
3.1 Дослідження процесу пороутворення у матеріалів на основі глини (вогнетриви та керамзит).....	104
3.2 Регулювання процесу пороутворення у матеріалів на основі екзотермічних реакцій .....	119
3.3 Емпіричні визначення швидкості пороутворення і швидкості збільшення об'єму пір .....	121

3.4 Висновки до розділу 3 .....	129
4 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ФОРМУВАННЯ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ .....	131
4.1 Умови рівноваги агента-пороутворювача в матеріалі під час формування пористої структури .....	132
4.2 Тиск газу агента-пороутворювача всередині замкнутої сферичної пори .....	134
4.3 Температура газу агента-пороутворювача всередині замкнутої сферичної пори .....	136
4.4 Розміри ядер агента-пороутворювача всередині замкнутої сферичної пори .....	139
4.5 Робота утворення і час виникнення ядра пори .....	142
4.6 Імовірність виникнення пори з ядра критичного радіуса .....	145
4.7 Швидкість зростання пори при підведенні теплової енергії .....	147
4.8 Теплообмін між зростаючою порою і навколишньою сумішшю .....	153
4.9 Висновки до розділу 5 .....	156
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗМІРУ, РОЗТАШУВАННЯ ТА ФОРМИ ПІР НА ЕФЕКТИВНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ ТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ .....	158
5.1 Вплив розміру та розташування пір у електропровідних пористих структурах (дослідження електронної теплопровідності) .....	158
5.2 Дослідження впливу форми пір на коефіцієнт теплопровідності пористих структур та конструкцій теплового захисту без врахування конвекції всередині пір .....	176
5.3 Дослідження зміни конвективної складової ефективного коефіцієнту теплопровідності електропровідних пористих структур від розміру та розташування пір .....	184
5.4 Дослідження впливу форми пір на тепловий опір пористих теплоізоляційних матеріалів .....	190



5.5 Дослідження впливу конвекції у порах на тепловий опір пористих теплоізоляційних матеріалів .....	194
5.6 Метод опису розташування пор .....	205
5.7 Визначення впливу температури на коефіцієнт теплопровідності пористого теплоізоляційного матеріалу .....	209
5.8 Знаходження узагальненого рівняння коефіцієнту теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок .....	220
5.9 Висновки до розділу 4 .....	229
<b>6 СТВОРЕННЯ НОВИХ ВИСОКОПОРИСТИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ГІДРОСИЛКАТІВ .....</b>	<b>233</b>
6.1 Створення високопористого теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему шляхом пресування пластин з наступним їх спіканням .....	237
6.2 Створення високопористого теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему шляхом спучення .....	240
6.2.1 Створення керамзиту з мінімальним коефіцієнтом теплопровідності .....	241
6.2.2 Створення вогнетривкої цегли шлікерним методом з мінімальним коефіцієнтом теплопровідності .....	253
6.3 Створення вогнетривких бетонів .....	257
6.4 Висновки до розділу 6 .....	260
<b>7 СТВОРЕННЯ ВИСОКОПОРИСТИХ МЕТАЛЕВИХ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ З ПРОГНОЗОВАНИМИ ТЕПЛОФІЗИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ .....</b>	<b>262</b>
7.1 Створення ефективних металевих конструкцій теплового захисту ..	263
7.2 Створення композиційних теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкції теплового захисту з раціональною пористою структурою .....	277
7.3 Висновки до розділу 7 .....	289
<b>8. СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПЕРЕНЕСЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ КРИЗЬ ТІЛА З МІКРОПОРистою СТРУКТУРОЮ .....</b>	<b>290</b>

8.1 Математичний опис перенесення теплової енергії крізь пористе тіло із закритою пористою структурою .....	290
8.2 Математичний опис перенесення теплової енергії крізь пористе тіло із відкритою пористою структурою .....	296
8.3 Знаходження констант рівняння перенесення теплової енергії флюїдами у відкритих пористих структурах теплоізоляційних елементів конструкції теплового захисту .....	305
8.4 Знаходження коефіцієнту теплової проникності та геометричної характеристики пористих структур поширених теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкцій теплового захисту .....	315
8.5 Висновки до розділу 8 .....	318
ВИСНОВКИ .....	319
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	325
ДОДАТОК А .....	359
ДОДАТОК Б .....	368
ДОДАТОК В .....	371

## ВСТУП

Дослідження енергетичних процесів у пористих матеріалах є окремим напрямом теплофізики та теплоенергетики, тому що структура пористих матеріалів провокує перебіг складних тепломасообмінних процесів, які наразі є недостатньо вивченими. Існуючі теорії для окремих випадків та напівемпіричні залежності не охоплюють усю область і усю різноманітність пористих матеріалів та конструкцій з них, що застосовуються для захисту елементів промислових енергетичних установок.

Так, пористим матеріалом можливо назвати практично будь-який твердий матеріал, тому що до пор відносять як мікропори (діаметр яких менше за довжину вільного пробігу молекули газу), так і каверни в будівельних матеріалах (їх діаметр більший декількох міліметрів). Також до пористих конструкцій відносять дисперсні матеріали (грунти, гранульована теплоізоляційна засипка) та матеріали, які мають капілярно-пористу структуру.

При такій численності та різноманітності матеріалів, що відносять до пористих матеріалів, існує ще більша кількість теорій, які описують ті чи інші процеси. Необхідно визначитися з комплексними показниками, що повною мірою відображають пористу структуру та їх впливом на теплофізичні характеристики матеріалу, створити нову повноцінну теорію управління структурою теплоізоляційних матеріалів і розв'язати задачу мінімізації енергетичних витрат при виробництві пористих матеріалів. Тільки тоді стане можливим знизити енергоємність продукції ВВП України.

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

В більшості сучасних наукових роботах пов'язаних з пористими матеріалами вирішуються завдання пов'язані з конкретними пористими структурами, але відсутній єдиний метод опису 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 Долінського А.А., Снежкіна Ю.Ф., Дешко В.І., Ганжи А.М., Маляренко В. А., Павленко А.М. 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 тепломасообмінних процесів, що протікають у цих структурах, можна покращити якість будь-яких високопористих матеріалів які використовуються для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок.

Огляд сучасної світової літератури показує, що можливість створення міцної конструкції теплового захисту з високопоритого металу або композиційного матеріалу для особливих умов експлуатації практично не досліджувалась. Хоч такі матеріали, в якості ізоляції, широко використовують у корпусі ядерного реактору, у печах росту кристалів кремнію та в аерокосмічній промисловості. Вивчення залежності електронної теплопровідності від комплексних показників пористої структури може значно знизити енергоємність та матеріалоемність у цих галузях.

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, 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 відповідно до предмета та об'єкта 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 тепломасообміну 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 диференціальних 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  $20,77 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  та границею міцності на стискання  $100,235 \text{ МПа}$ .

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  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ; час витримки 10 хв.; обпалювання за температури  $1250 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом 2 год.), коефіцієнт теплопровідності виробленої цегли із сіоліту з порами дорівнював  $0,45 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , питома теплоємність  $0,93 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , міцність на стискання  $7,1 \text{ МПа}$ ; для керамзиту з покращеними теплофізичними властивостями, який використовується як засипка (глиняна суміш підсушується до вологості 38 % та формуються гранули шляхом пресування сіткою з коміркою  $6 \times 20 \text{ мм}$ ; сушка та формування структури – 15 хв. за  $270 \text{ }^\circ\text{C}$ ; обпалювання за температури  $1250 \text{ }^\circ\text{C}$  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 °С, 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 «Екסקавація», ТОВ «Тера-Гарант», ЗМЗ ім. В.І.Омельченко АТ «МОТОР СІЧ», ПАТ «МК Запоріжсталь».

6. Розроблено методологію, а також експериментальну установку для знаходження добуток 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 напрямку Запорізької державної інженерної академії, а

також під час виконання індивідуальних курсових завдань, магістерських робіт та для дослідницьких робіт аспірантів (додаток В).

**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] експериментальних дослідів теплової ізоляції та знаходження оптимальних геометричних розмірів запропонованої конструкції; [31] експериментальних дослідів та аналітичного вирішення поставленої задачі; [32] оптимізації фізичних властивостей сплаву; [33] експериментальних кінетичних дослідів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати роботи докладалися на таких міжнародних конференціях: VIII Міжнар. наук.– практич. 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 Zagadnienia Energetyki, Budownictwa i Inżynierii 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 Zagadnienia Energetyki, Budownictwa i Inżynierii Środowiska» (Польща, Кельце, 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. Кельце, Польща), на міжкафедральному науковому семінарі Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" та на міжкафедральному науковому семінарі Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 8 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний об'єм дисертаційної роботи 379 сторінок, з них 278 сторінок основного тексту, 122 рисунка, 21 таблиця та 3 додатків. Список використаних літературних джерел становить 278 найменувань.

## **1 ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛУ З ПРОГНОЗОВАНИМИ ТЕПЛОФІЗИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

Енергетична стратегія України на період до 2030 року одним з пунктів цілі визначає зниження питомих витрат у виробництві та використанні енергопродуктів завдяки раціонального їх споживання, впровадження енергозберігаючих технологій та обладнання, раціоналізації структури суспільного виробництва і зниження питомої ваги енергоємних технологій [1]. Створення елементів теплового захисту промислових енергетичних установок з покращеними теплофізичними властивостями із пористого матеріалу, а також визначення методів розрахунку процесів переносу теплоти у пористих теплоізоляційних матеріалах надасть можливості знизити енергоємність промислових технологій та продукції. Формування теплофізичних властивостей матеріалу шляхом створення прогнозованих пористих структур частково вирішує завдання, які поставлені в енергетичній стратегії України.

В умовах економічної кризи та курсу до енергетичної незалежності України покращення теплофізичних характеристик елементів теплового захисту енергетичного обладнання є актуальним завданням. До пористих елементів теплового захисту енергетичного обладнання відносять спінені матеріали (у тому числі й метали), газобетони, деякі високовогнетривкі матеріали, піноскло, керамзит, деякі композити, тощо. При докладному аналізуванні технології виготовлення будь-якого з наведених матеріалів можливо зробити висновок, що існує залежність між теплофізичними властивостями пористого матеріалу та його пористою структурою. Так, в роботі [2] наводяться залежності теплофізичних властивостей певного матеріалу від режимів спучення (час термічної обробки, температура зовнішнього середовища, початкова вологість сировинної суміші), які дозволяють керувати кінцевими теплофізичними характеристиками матеріалу під час його виготовлення, змінюючи кінцеву пористість. Це підтверджує, що не тільки

хімічний склад матеріалу впливає на його теплофізичні властивості, але й показники пористості матеріалу.

Вплив значення пористості на теплофізичні властивості матеріалу можливо розглянути на прикладі наступних експериментальних даних [3]. Значення коефіцієнтів теплопровідності заліза (58,19 Вт/(м·К)) та гірської породи (3,26 Вт/(м·К)) відрізняються майже в 18 разів, але при цьому засипка із кульок заліза та кульок гірської породи з однаковою пористістю 62,5 % має майже однаковий ефективний коефіцієнт теплопровідності (0,0403 Вт/(м·К) і 0,0402 Вт/(м·К) відповідно). Але не тільки значення пористості впливає на теплофізичні характеристики матеріалу, але й розподілення пористості по об'єму [4]. Так, у [5] пропонується виділяти в пористих системах наступні основні ознаки: характер структури, кількість компонентів структури, агрегатний стан компонентів структури і процесів взаємодії між компонентами структури. Дана класифікація зручна для поділу пористих систем в цілому, не дивлячись на те, що вона й не дозволяє управляти теплофізичними властивостями теплоізоляційного макропористого матеріалу шляхом зміни форми та розташування пір на стадії створення матеріалу. Питання про достатність основних ознак пористості до сих пір не піднімалося.

Експериментальні дані, як дослідницькі, так і виробничі, з оптимальних технологічних вимог спучення сировинної суміші теплоізоляційних матеріалів для теплового захисту енергетичного обладнання також відмінні, тому що не існує теорії, яка узагальнює тепломасообмінні процеси, що відбуваються під час формування пористої структури. Наприклад, підігрів вихідної суміші піноскла, що спучується, до температури спікання (690 °С) рекомендують проводити як 70 хв., так і 15 хв. [6].

Вищезазначене доводить необхідність розробки узагальнюючих комплексних показників пористої структури, достатніх для управління теплофізичних властивостей пористого матеріалу та створення методології визначення оптимальних режимів технологічних процесів створення пористих теплоізоляційних матеріалів.



## 1.1 Вплив структурних характеристик пористих матеріалів на інтенсивність тепломасообмінних процесів

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.

Найбільш поширеним поняттям пористого матеріалу є матеріал, який складається з твердого або умовно твердого скелету, що є сукупність частинок, волокон різноманітної форми та розміру, розділених між собою каналами [7, 8]. Для врахування структур конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання розглянемо пористість як сумарний об'єм усіх пустот, включаючи пори, каверни, тріщини та пустоти у виробках. Теплообмін в даному пористому матеріалі буде здійснюватися шляхом: теплопровідності каркасу; теплопровідності середовища, що заповнює пори матеріалу; тепловіддачі на межі твердої оболонки пори з середовищем; випромінювання від частинки до частинки крізь середовище; конвекції газу та вологи, що містяться в порі; дифузії у транспортних порах.

Якщо розглядати пористі матеріали як дисперсні системи, основним механізмом теплопередачі є, безумовно, теплопровідність самого матеріалу (скелету дисперсної системи) і теплопровідність середовища у порі [9]. Для розрахунку теплопровідності доволі часто використовують формальну аналогію між основними законами електрики і теплоти (теорія узагальненої провідності) [10]. Однак, експериментально доведено, що при розрахунку теплопровідності пористого матеріалу згідно теорії Максвелла чи теорії Релея (розрахунок електричного поля системи, в яку вкраплені сторонні частки сферичної форми) має місце значне розходження між теоретично визначеним коефіцієнтом теплопровідності пористого матеріалу й дійсним [3].

Найімовірніше, невідповідність теорії та експерименту зумовлено ідеалізуванням модельних структур [11]. Також доволі значна кількість інших робіт [12-16], в яких наводиться, що узагальнене теоретичне обґрунтування теплопровідності пористого матеріалу дає розходження з проведеними експериментами. Також конвекція у порах теплоізоляційних виробів буде залежати від умов експлуатації [17]. Отже потрібно розуміти як впливає пориста структура на теплофізичні властивості матеріалу при різних умовах його експлуатування, таких як: температура; динаміка зміни температури; тривалість її впливу; вологість та інші. Тому сформована робоча гіпотеза керованого структуроутворення матеріалів та формування його теплофізичних властивостей.

Робоча гіпотеза: вплив структурних параметрів на теплофізичні характеристики матеріалу дозволяє створити теоретичні основи керованого структуроутворення теплоізоляційних матеріалів з заданими теплофізичними властивостями.

Для підтвердження робочої гіпотези розглянемо вплив структурних параметрів на теплофізичні характеристики матеріалу

### 1.1.1. Конвективний теплообмін в пористих матеріалах

Для пористих теплоізоляційних матеріалів зменшення ефективного коефіцієнта теплопровідності завдяки виникненню конвекції у порах відіграє істотну роль [18-20]. Саме конвекція усередині пір збільшує кількість енергії, яка проходить крізь пористий матеріал [21].

Для існування природних конвекційних потоків в пористому середовищі мінімальний температурний градієнт  $\Delta T_{\min}$ , з деякими припущеннями, буде рівним [3]

$$\Delta T_{\min} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \nu \cdot a}{k \cdot g \cdot \beta_0 \cdot d^2},$$

де  $k$  – проникність пористого середовища,  $\text{м}^2$ ;

$a$  – коефіцієнт температуропровідності пористого матеріалу,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$g$  – прискорення сили тяжіння,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$\nu$  - в'язкість середовища, що заповнює пори,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\beta_0$  - коефіцієнт об'ємного розширення проміжного середовища,  $1/\text{К}$ ;

$d$  - еквівалентна товщина пори,  $\text{м}$ .

Залежність товщини шару матеріалу, що досліджується, буде рівною

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \mu \cdot \lambda}{k \cdot g \cdot \rho \cdot \beta_0 \cdot C_p \cdot \Delta T_{\min}}}, \quad (1.1)$$

де  $C_p$  - питома ізобарна теплоємність середовища,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$\rho$  – щільність середовища, що заповнює пори,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

В критеріальній формі формула, що виражає виникнення конвекції, матиме наступний вигляд [3]

$$Gr \cdot Pr \geq 680;$$

де  $Gr = \frac{g \cdot x^3}{\nu^2} \cdot \frac{\Delta T}{T}$  - число Грасгофа;

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda_{cp}};$$

$$\mu = \rho \cdot \nu;$$

$\Delta T$  - різниця температур на кордонах відкритого з обох боків шару матеріалу висотою  $x$ ,  $\text{К}$ ;

$\lambda$  - теплопровідність середовища,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Добуток чисел Грасгофа на Прандтля є числом Релея, яке виражає можливість виникнення біфуркацій у рідині під впливом температури. Так, можна записати

$$\frac{\Delta T_{\min} \cdot \beta_0 \cdot g \cdot d^3}{\nu \cdot \lambda_{CP}} \geq 680,$$

і визначивши еквівалентний діаметр, отримаємо

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{680 \cdot \nu \cdot \lambda_{CP}}{\Delta T_{\min} \cdot \beta_0 \cdot g}}, \quad (1.2)$$

Порівнявши (1.1) та (1.2), можливо зробити висновок про однаковий вигляд функцій. Різниця полягає тільки в точці, в якій функція починає різко зростати. Графік функції (1.2) отримаємо, виконавши підстановку значення для повітря за нормальних технічних умов (рис.1.1).

$$d \geq 0,01795 \cdot \sqrt[3]{\Delta T}.$$

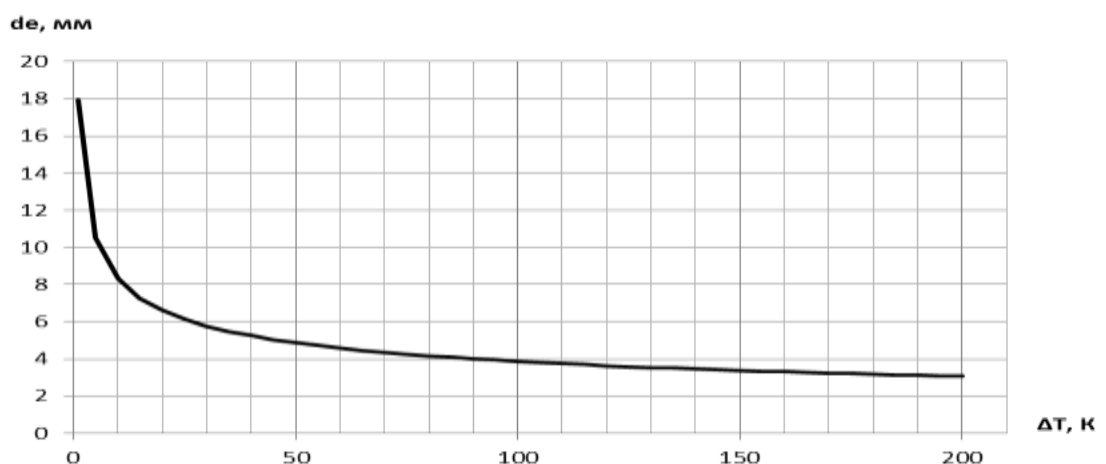


Рисунок 1.1 – Залежність еквівалентного діаметру пори, при якому починає діяти природня конвекція, від перепаду температур на межі пори

Загальний вигляд залежності еквівалентного діаметру пори, при якому починає діяти природня конвекція, від перепаду температур на межі пори підтверджується дослідями Семенова Л.А. і Вишневського Е.Е. [22, 23] з повітряними прошарками. У повітряних прошарках понад 10 мм конвекція починає діяти навіть при перепаді температур в  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в прошарках до 10 мм конвекція має місце при перепаді температур в  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в шарах товщиною менш ніж 5 мм конвекція з'являється за температури, близьких до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Подальше зростання перепаду температур незначно впливає на початок дії конвекції. Необхідно зауважити, що експериментальні дані неповністю збігаються з отриманою залежністю на рисунку 1.1. Загальним є те, що при порі з діаметром, меншим за 3 мм, природні конвекційні потоки повітря будуть відсутні. Але у ряді випадків загальна теплопровідність матеріалу значно змінюється при незначній зміні пор, які значно менші за 3 мм [3]. Так, за експериментальними даними коефіцієнт теплопровідності пори, що заповнена повітрям, з розмірами 0,1 мм і 2 мм за температури  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  складає відповідно  $0,0244\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  і  $0,314\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  [3]. Даний експеримент свідчить про існування мікроконвекції в порах розміром менше 3 мм та про її вплив на ефективний коефіцієнт теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів. Існування мікроконвективних токів підтверджено також у публікаціях різних авторів [24-27]. Імовірно, що мікроконвективні токи здійснюють перенос молей речовини в найменших об'ємах (до 1 мм) і разом з самою речовиною переносять енергію, яка за цей час рівномірно поширюється по всьому молу речовини завдяки теплопровідності [28,29]. Можна зробити висновок, що конвекція в порах досліджена тільки у вузьких окремих випадках і залежностей для її розрахунку в загальному вигляді для пористих теплоізоляційних матеріалів та виробів не існує.

Хоча більшість теплоізоляційних матеріалів, що використовуються для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок мають пори відкритого та транспортного типу, варто звернути увагу на тиск середовища усередині закритих пір. Експериментально доведено, що в деяких закритих

комірках пористого матеріалу тиск газів нижчий за атмосферний (для піноскла 70 - 95 кПа) [6], а оскільки конвекція газів в комірках зменшується з пониженням тиску, це буде відбиватися на зниженні ефективного коефіцієнта теплопровідності. Існують експериментальні дані, які підтверджують, що ефективний коефіцієнт теплопровідності деяких аерогелів при числі Кнудсена більш за одиницю, менший за коефіцієнт теплопровідності повітря за нормальних умов [30]. На даний момент час не існує єдиного методу дослідження конвективних потоків в пористих структурах теплоізоляційних матеріалів та виробів.

1.1.2 Існуючі положення щодо впливу розміру та розташування пір на ефективний коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу

На теплофізичні властивості теплоізоляційних матеріалів та конструкцій теплового захисту будуть впливати як мікропори, мезопори, макропори, каверни так й пустоти, порожнечі та структурні канали.

Як було вище зазначено, із збільшенням розміру пір у матеріалах та виробках більше за 0,1 мм зростає ефективний коефіцієнт теплопровідності матеріалу завдяки конвекції. Передача теплоти завдяки випромінюванню при збільшенні оптичної товщини шляху зменшується по експоненті [31], але при збільшенні пори збільшується й площа поверхні випромінювання, яка збільшує радіаційну складову [32]. Тому вплив випромінювання на протікання теплового потоку крізь пористу структуру теплового захисту енергетичного обладнання при зміні форми та розміру пір являє собою залежність яку треба розглядати як частину узагальненого рівняння ефективного коефіцієнта теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів від комплексних показників пористої структури. Один з комплексних показників пористої структури матеріалу або конструкції є форма пори. Ефективний коефіцієнт теплопровідності для матеріалу з порами, зорієнтованими уздовж теплового потоку, майже у два рази вищий, ніж для матеріалу з порами, зорієнтованими перпендикулярно

тепловому потоку [33, 34]. Даний розбіг тим більший, чим більший розмір пір [35]. Отже розмір пори є другим комплексним показником пористої структури.

З експериментальних даних по дослідженню анізотропної структури кварцу та бокситів [36-40] можна судити про вплив температури на ефективний коефіцієнт теплопровідності пористих матеріалів. В зоні низьких температур (-200 °С) співвідношення коефіцієнтів теплопровідності матеріалу з порами, що зорієнтовано вздовж і перпендикулярно тепловому потоку досягає 200 %, а в зоні температури 100 °С воно дорівнює 160 %.

Для визначення залежностей розміру та розташування пір на ефективний коефіцієнт теплопровідності матеріалу та виявлення раціональної пористої структури для теплової ізоляції, проаналізуємо окремі фундаментальні випадки впливу пористої структури. В табл.1.1 прийняті наступні позначення:  $p$  – пористість,  $\lambda_1$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу (в якості прикладу обрано кремнеземистий матеріал з коефіцієнтом теплопровідності 0,12 Вт/(м·К), що використовується для футеровки високотемпературного енергетичного обладнання),  $\lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності середовища (в якості прикладу обрано повітря з домішками газів, який має коефіцієнт теплопровідності 0,019 Вт/(м·К)). Тепловий потік направлено знизу вверху. Чорним кольором позначено матеріал.

До розрахунку коефіцієнта теплопровідності засипок (№8 и №9 в табл.1.1) також відноситься формула, виведена Ейкеном [3]

$$\lambda_{ef} = \frac{\lambda_1 + 1 + \frac{2p \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)}{\frac{2\lambda_1}{\lambda_2} - 1}}{1 - p \frac{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}{\frac{2\lambda_1}{\lambda_2} - 1}},$$

та формула Горкара [47]

$$\lambda_{ef} = \frac{\lambda_1}{1-p}$$

Формула Ейкена дає найменшу помилку при формі часток, яка наближується до сфери, та при пористості менш ніж 50%. Для засипки з дисперсного матеріалу найбільш близький випадок №9 з таблиці 1.1. Для засипок із зернистих кремнеземних матеріалів рекомендується використовувати формулу Оделевського [48]

$$\lambda_{ef} = \lambda_1 \left( 1 + \frac{p_1}{\frac{1-p_2}{3} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}} \right),$$

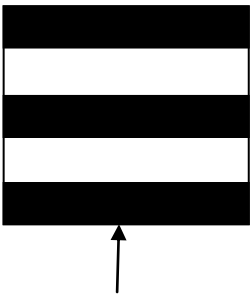
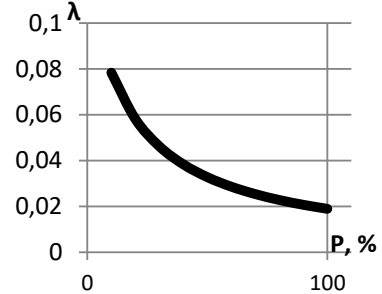
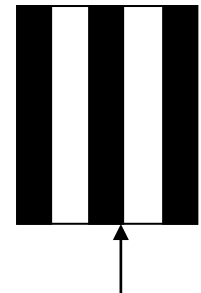
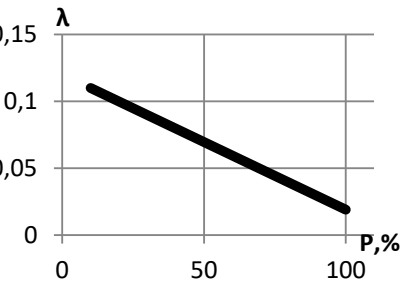
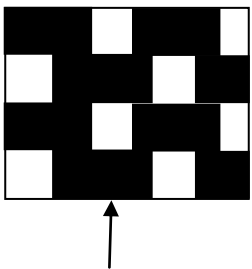
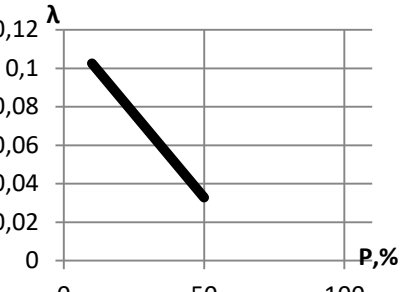
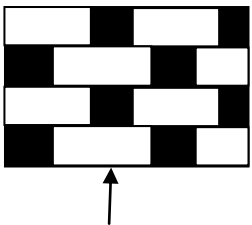
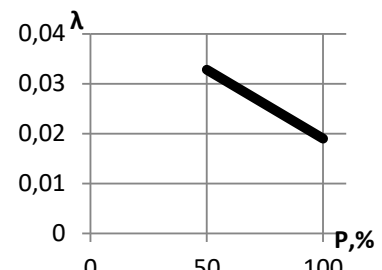
де  $p_1$ ,  $p_2$  - загальна пористість у поперечному і поздовжньому напрямку.

Згідно таблиці 1.1 проведемо графічний аналіз формул для розрахунку коефіцієнта теплопровідності пористих матеріалів (рис. 1.2) і окремо для засипки (рис. 1.3). При цьому для пористого матеріалу залишимо ті ж значення теплопровідності, що і в прикладі, а для засипки з твердої фази приймемо теплопровідність рівну гранулам гідросилікатів на основі сіоліта для середньотемпературної теплової ізоляції енергетичного обладнання та його елементів (0,036 Вт/(м·К)) [49].

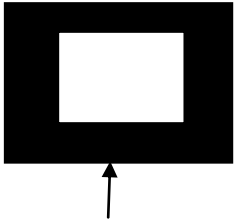
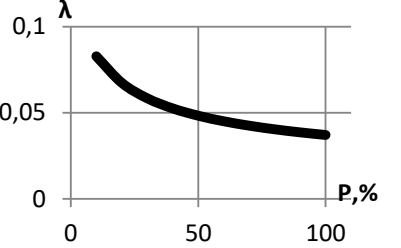
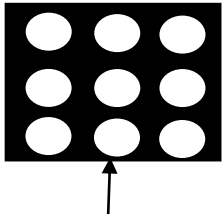
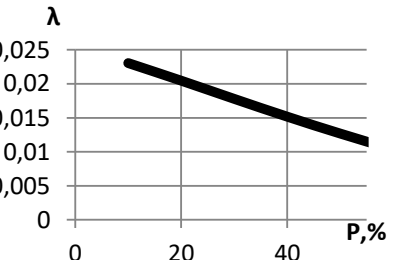
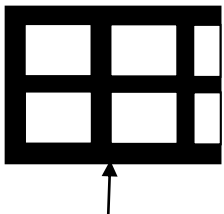
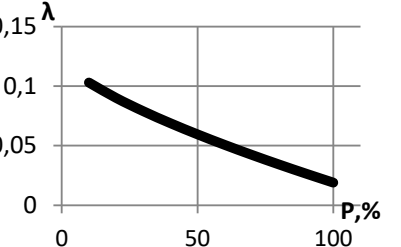
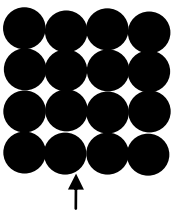
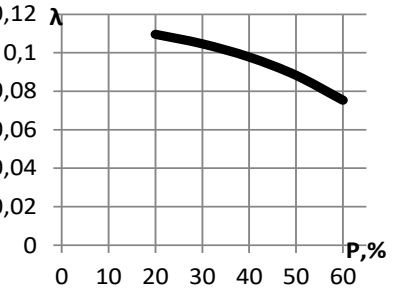
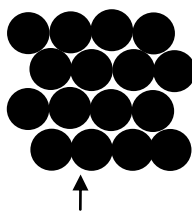
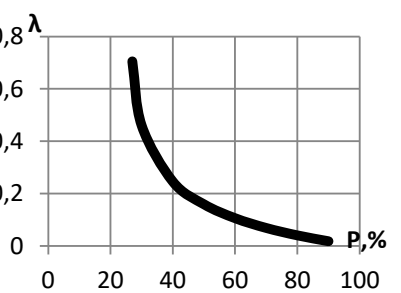


Таблиця 1.1

Зведення залежностей коефіцієнта теплопровідності від пористості для  
двофазних систем

№ п/п	Схема розташування пор	Формула для розрахунку ефективного коефіцієнта теплопровідності	Приклад $\lambda_{ef} = f(p)$
1	2	3	4
1		$\lambda_{ef} = \lambda_2 \frac{100}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}(100-p) + p}$ [3]	
2		$\lambda_{ef} = \lambda_1 \frac{100-p}{100} + \lambda_2 \frac{p}{100}$ [3]	
3		$\lambda_{ef} = \lambda_1 \frac{100-p}{100} + \lambda_2 \frac{p}{100}$ при $p \leq 50\%$ [41]	
4		$\lambda_{ef} = \lambda_2 \left[ \frac{4(1-p)}{1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} + (2p-1) \right]$ при $p \geq 50\%$ [41]	

продовження таблиці 1.1

1	2	3	4
5		$\lambda_{ef} = \frac{\lambda_1^2 p^{\frac{2}{3}} + \lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1 + \left(p^{\frac{2}{3}} - p\right)(\lambda_2 - \lambda_1)}$ <p>[42]</p>	
6		$\lambda_{ef} = \frac{\lambda_2 p + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \left(1 - p^{\frac{2}{3}}\right)}{p - p^{\frac{2}{3}} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(1 - p^{\frac{2}{3}} + p\right)}$ <p>при <math>p \leq 50\%</math></p> <p>[43]</p>	
7		$\lambda_{ef} = \lambda_2 p^{\frac{1}{3}} + \lambda_1 (1 - p)^{\frac{2}{3}}$ <p>[44]</p>	
8		$p \approx 48\%$ $\lambda_{ef} = \frac{1,5\pi\lambda_1(0,9-p)}{(2,1-p)^2}$ <p>[45]</p>	
9		$p \approx 30\%$ $\lambda_{ef} = 3\pi\lambda_2 \ln \frac{43 + 0,31p}{p - 26}$ <p>[46]</p>	

Як видно з рис. 1.2, структура №6 є оптимальною для теплоізолюючого матеріалу, хоч логічно передбачити, що при пористості 10% коефіцієнт теплопровідності матеріалу не може наближатися до коефіцієнту теплопровідності повітря. Тому розрахункова формула №6 не придатна для пористих теплоізоляційних матеріалів. Мінімальний коефіцієнт теплопровідності (теоретичний) досягається в структурі №1. Максимальний коефіцієнт теплопровідності спостерігається в структурі №2. Це пояснюється виникненням природної конвекції у порах. Розрахункова формула для структури №7 є непридатною для теплоізоляційних матеріалів, оскільки в ній присутні стоки теплоти. Розрахункова формула для структури №5 рекомендується для пори у якій доведено існування природної конвекції.

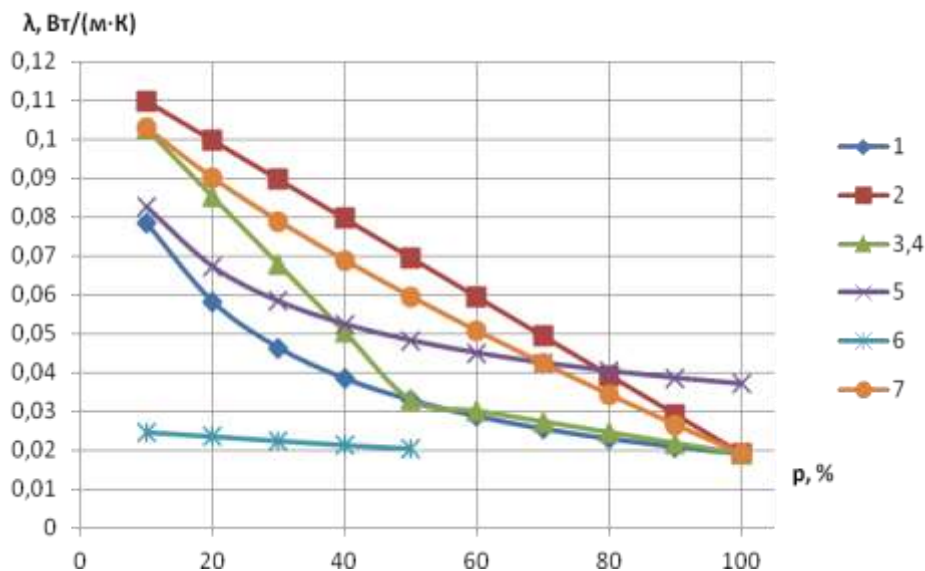


Рисунок 1.2 - Вплив пористості на ефективний коефіцієнт теплопровідності для різних схем пористості згідно таблиці 1.1

Структура з мінімальним теоретичним ефективним коефіцієнтом теплопровідності є шахове розташування зорієнтованих перпендикулярно тепловому потоку пір за об'ємом. Це підтверджується також і експериментальними дослідженнями для піноскла [6]. Але проаналізовані розрахункові рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності не

враховують ні розмір пір, ні градієнт температури, а отже й зміну конвективних токів при різних умовах експлуатації матеріалу.

Для аналізу розрахунків ефективної теплопровідності засипок з керамзиту або гідросилікату розглянемо рис. 1.3, в якому побудовані залежності ефективних коефіцієнтів теплопровідності від схеми розміщення гранул.

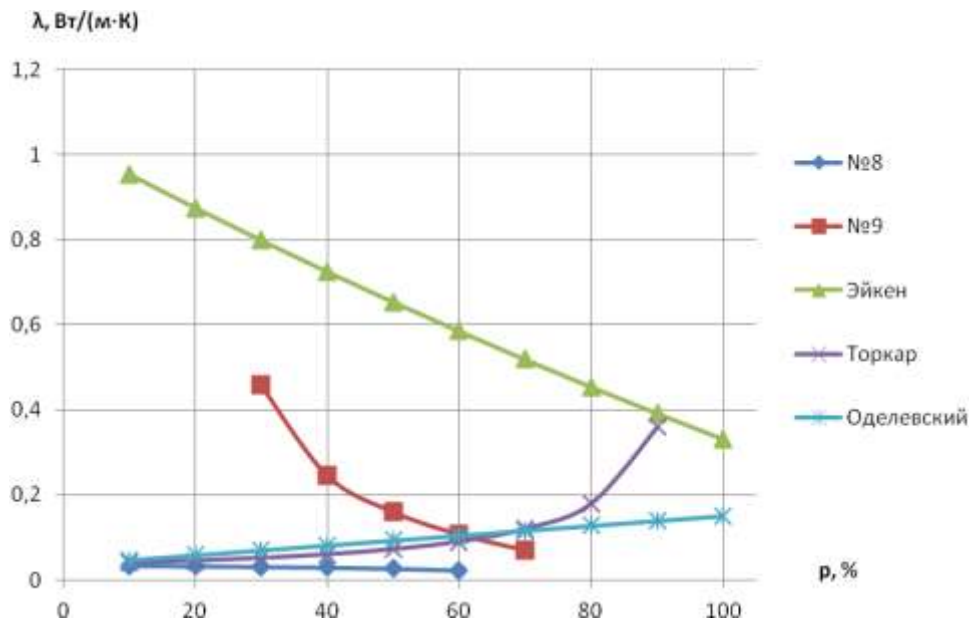


Рисунок 1.3 - Вплив пористості на ефективний коефіцієнт теплопровідності для засипок з дисперсного матеріалу по таблиці 1.1 та [47,48]

Як видно з рис. 1.3, формула Ейкена і Богомоллова (№9 табл.1.1) показує завищені результати і потребує емпіричного коригування. Залежності Торкара і Оделевського виражають збільшення коефіцієнта теплопровідності під час збільшення пористості і є актуальними тільки для дисперсних систем з великою дифузійною складовою ефективного коефіцієнта теплопровідності. Прийнятною є залежність Некрасова для структури, що ідеалізується (№8 табл.1.1).

### 1.1.3. Вплив вологи в пористих структурах на перенос теплоти

Вплив вологи на тепломасообмінні процеси у пористих та капілярно-пористих структурах широко описуються науковими роботами [50-55]. Але їх

недоліком є складність застосування даних моделей при практичному використанні елементів теплового захисту промислового енергетичного обладнання, тому широке застосування знайшли напівемпіричні та емпіричні залежності [3, 56, 57]. Так, розглянемо рівняння для потоку пари, що проходить через одиницю площі [3]

$$I = \frac{D \cdot P}{R_{\text{нит}} \cdot T_n \cdot d} \cdot \ln \frac{P - P_{T_1}}{P - P_{T_2}}, \quad (1.3)$$

де  $P$  – тиск потоку на границі потік-частка, Па;

$P_{T_1}$ ,  $P_{T_2}$  - відповідно парціальний тиск водяної пари над водною поверхнею за температури  $T_1$  і  $T_2$ , Па;

$d$  - товщина шару, м;

$R_{\text{нит}}$  - питома газова постійна для водяної пари, Дж/(кг·К).

При цьому коефіцієнт дифузії є функцією тиску і температури

$$D = A \cdot \frac{(T)^n}{P} \cdot \varphi \cdot \Pi, \quad (1.4)$$

де  $A$  и  $n$  – емпіричні коефіцієнти,  $A = 4,42 \cdot 10^{-4}$ ,  $n = 2,3$ ;

$\varphi$  - коефіцієнт, що характеризує структуру матеріалу, для кремнезему  $\varphi \approx 0,66$ ;

$\Pi$  – співвідношення щільності самого матеріалу до пористого матеріалу .

Для капілярно-пористого теплоізоляційного матеріалу на основі гідросилікату, що обдувається тепловим потоком, емпіричними дослідженнями залежностей критеріїв Нуссельта та Шервуда дане рівняння зведене до наступного вигляду [21]

$$I = k \cdot \frac{T_n^{1.3} \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) \cdot (\ln v + 0,129)}{R_{\text{шт}}} \cdot \tau^{0,206}, \quad (1.5)$$

де  $k$  - константа, залежна від типу матеріалу (для кремнеземного пористого матеріалу  $k = 3,474 \cdot 10^{-9}$  );

$\rho_0$  - дійсна щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  - швидкість потоку, м/с;

$\rho$  - щільність матеріалу з порами (уявна), кг/м<sup>3</sup>;

$\tau$  - час теплової обробки, с.

## 1.2 Методи формування пористої структури та її зв'язок з теплофізичними характеристиками матеріалу

На даний момент існує багато окремих досліджень, що вивчають як формування пористої структури [58-61], так і вплив складу вихідної суміші на кінцеві теплофізичні характеристики [62-67]. Необхідно проаналізувати та узагальнити існуючі дослідження впливу вихідних компонентів суміші на теплофізичні властивості теплоізоляційного матеріалу з метою визначення можливості управління пористою структурою для формування теплофізичних властивостей матеріалу.

Для визначення найбільш вірогідних реакцій, які протікають під час спучення матеріалів використовується термодинамічний метод. Змінювання  $\Delta G$  визначається загальновідомим рівнянням по [63]. Як правило визначаються газоутворювачі, при цьому тип пористості і навіть розмір пір залишаються невивченими, що не дає можливості управляти структурою цього матеріалу.

Емпіричні дослідження щодо формування пір в матеріалі на основі гідросилікатів, що спучується, під дією теплового потоку проведені в [61] та показано вплив різних факторів на формування пористої структури. Також в статті зазначено про вплив домішок алюмінію до вихідних сумішей на процес

пороутворення гідросилікатів. Але в статті відсутня оптимізація теплофізичних параметрів кінцевого теплоізоляційного пористого матеріалу шляхом зміни технологічних параметрів термообробки початкової суміші. Можливість управляти пористою структурою гідросилікатів завдяки режимам термічної обробки сировинної суміші показана у [64], але не приділена увага управлінню пористою структурою завдяки синтезу вихідних компонентів суміші та не визначено методи отримання оптимальної пористої структури з мінімальним ефективним коефіцієнтом теплопровідності. Процес формування пористої структури в початковій суміші гранули керамзиту, що використовується в якості теплоізоляційної засипки, представлено у [65]. У статті описано процес утворення пор, спучення матеріалу, зсув внутрішніх шарів і затвердіння зовнішньої кірки. Але єдиними параметрами, що описують пористу структуру, є діаметр пір і загальна пористість, що не дає змоги повною мірою описувати пористу структуру.

Аналіз реакцій, що протікають під час спінювання піноскла, проведено у [66], а також проаналізовано вплив деяких вихідних компонентів на однорідність пористої структури. Але даний опис не дає можливості математично змодельовати вплив вихідних компонентів на кінцевий результат та спрогнозувати теплофізичні параметри пористої структури. Опис основної хімічної реакції формування пористої структури газобетону наведено у [67], при цьому повністю відсутній аналіз можливості управління теплофізичними властивостями кінцевого матеріалу шляхом формування різної пористої структури.

Докладний опис пористої структури доломіту, що використовується у виробництві вогнетривів описано у [68], але в запропонованих параметрах, що описують пористу структуру, є спрощення (такі як допущення опису нерівної поверхні пори як сфери) та не розглянуто можливість управління пористою структурою. Сучасна анізотропна математична модель пористої структури запропонована у [69]. Особливістю даної моделі є те, що автор досліджує дифузійні і мікроконвективні потоки в пористому матеріалі, які впливають на

ефективний коефіцієнт теплопровідності. Але запропонована автором модель не враховує геометричні параметри пір, які, як було доведено, значно впливають на мікроконвективні потоки.

Пориста структура керамічних виробів з силікату вуглецю (SiC) розглядається у [70]. Показано основні реакції здобуття силікату вуглецю і залежність пористості отриманого керамічного виробу від синтезу вихідних компонентів. У статті знімками надається отримана структура матеріалу і її пористість, але при однаковій пористості можна спостерігати абсолютно різну структуру. Інші показники пористої структури, окрім пористості, відсутні, що не дає можливості глибокого аналізу формування теплофізичних властивостей керамічних виробів шляхом створення прогнозованих пористих структур.

Виходячи з аналізу літературних джерел, формування теплофізичних параметрів пористих теплоізоляційних матеріалів буде залежати від самої пористої структури, що описується рядом комплексних показників, та хімічного складу матеріалу. Необхідно розробити основні комплексні показники, що повною мірою будуть відображати пористу структуру та впливають на тепловий потік який проходить крізь теплоізоляційний матеріал.

У [6] було проведено серію експериментів над піносклами, що мають різний хімічний склад, з метою визначення температури, при якій спучення скла відбувається найефективніше. З експериментальних даних можна зробити висновок, що загальна пористість значно збільшується зі зниженою температурою кристалізації, але при цьому автор досліджень стверджує, що рання кристалізація утворюється локально. Тобто для більшого спучення піноскла рекомендується вибирати найбільш чисте скло (з мінімальною кількістю домішок), а ядра кристалізації створювати завдяки піноактивних домішок, які після хімічної реакції утворюють газ і тверду речовину з температурою кристалізації більшою за температуру спучення.

Найбільша загальна пористість у матеріалі з підвищеним вмістом  $Al_2O_3$  (5,6 – 7,4 %). При знижених температурах (830 – 850 °C) слід відзначити велику пористість піноскла з підвищеним вмістом CaO (5,7 – 6,2 %) і одночасно



великим вмістом  $K_2O$  (1,9 – 2,1 %). Для іншого складу матеріалу збільшення температури термообробки сировинної суміші у досліджуваному діапазоні збільшує загальну пористість теплоізоляційного матеріалу. По результатам регресійного аналізу для піноскла також характерне, що коефіцієнт спучення знижується при збільшенні вмісту вуглецю в пінотворній суміші [6, 71]. Інші параметри неоднозначно впливають на спучення. Найбільш сильний вплив має температура і тривалість теплової обробки, менший – дисперсність і вміст вуглецю. Однак, варто враховувати і спільний вплив даних факторів який відображають коефіцієнти парних взаємодій. Однозначно виявляється вплив режимів термообробки сировинної суміші піноскла на втрату маси [72-74]. Спільне або роздільне збільшення дисперсності початкових матеріалів, тривалості і температури теплової обробки спричиняє зростання втрат маси, що доводить збільшення виділення газу з суміші.

Більш детальні дослідження залежностей властивостей піноскла від способів теплової обробки було проведено у [75]. Факторами, що управляють, обрано: вміст вуглецю суміші, % –  $x_1$ , дисперсність скла,  $см^2/г$  –  $x_2$ , температура теплової обробки,  $°C$  –  $x_3$  і її тривалість, хв. –  $x_4$ . Було отримано наступні залежності для об'ємної маси, водонасичення і міцності на стискання відповідно

$$\begin{aligned} \gamma &= 256,6 + 25,1x_1 - 31,9x_2 - 17,6x_3 - 46,6x_4 - 24,4x_1x_2; \\ W &= 2,59 + 0,59x_1 - 0,76x_2 + 1,16x_4 - 0,77x_1x_2 - 0,36x_2x_4; \\ R_{сжс} &= 20,79 - 2,69x_1 + 1,31x_2 - 3,09x_3 - 9,09x_4 + 3,09x_1x_2; \\ x_1 &\in [0,15; 0,35]; x_2 \in [4500; 6500]; x_3 \in [780; 860]; x_4 \in [20; 40]. \end{aligned}$$

З проведених досліджень можна зробити висновок, що для виготовлення пористої структури піноскла з високою загальною пористістю і низьким водонасиченням необхідна максимальна температура і тривалість спучення, у досліджуваних діапазонах. Дисперсність початкових матеріалів рекомендовано

вибирати наближеною до мінімальної. Підвищена контактна площа збільшує міцність на стискання матеріалу, при цьому температура і, більшою мірою, тривалість теплової обробки зменшують значення міцності. Під час тривалого і високотемпературного спучення змінюється структура пористості з дрібнопористої рівномірної на крупнопористу хаотичну. Але діапазон проведених досліджень є вузьким і тому не показує точку перегину кривої залежності коефіцієнта спучення від температури і часу теплової обробки. Також в даних дослідженнях не розглядається жоден інший показник пористої структури окрім коефіцієнта спучення. Проведені експерименти і аналіз результатів не дозволяють управляти пористою структурою піноскла та формувати його оптимальні теплофізичні властивості.

Емпіричні дослідження зміни діаметру вихідної суміші гідросилікату під час термообробки для різних температур наводиться у [64] (рис.1.4). При цьому залежність коефіцієнта теплопровідності кінцевого матеріалу від коефіцієнта спучення виявилася нелінійною (рис.1.6).

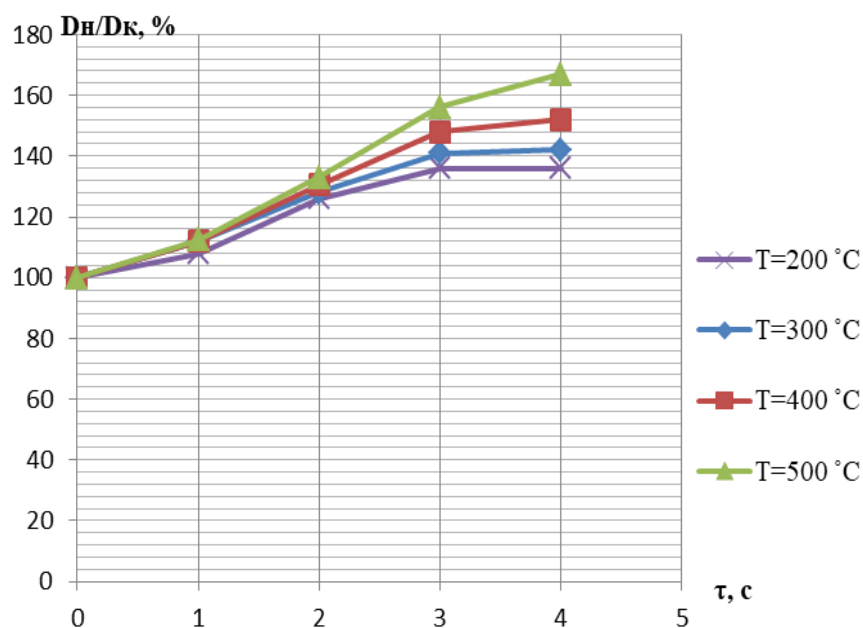


Рисунок 1.4 – Зміна діаметру частинки під час її спучення

З рис. 1.5 видно не лінійність залежності коефіцієнта теплопровідності гідросилікату від тривалості спучення та температури спучення, при цьому

загальна пористість матеріалу постійно зростає під час термообробки (рис.1.4). Це дозволяє зробити висновок, що кількісний показник пористості не є критерієм якісної оцінки теплопровідності матеріалу.

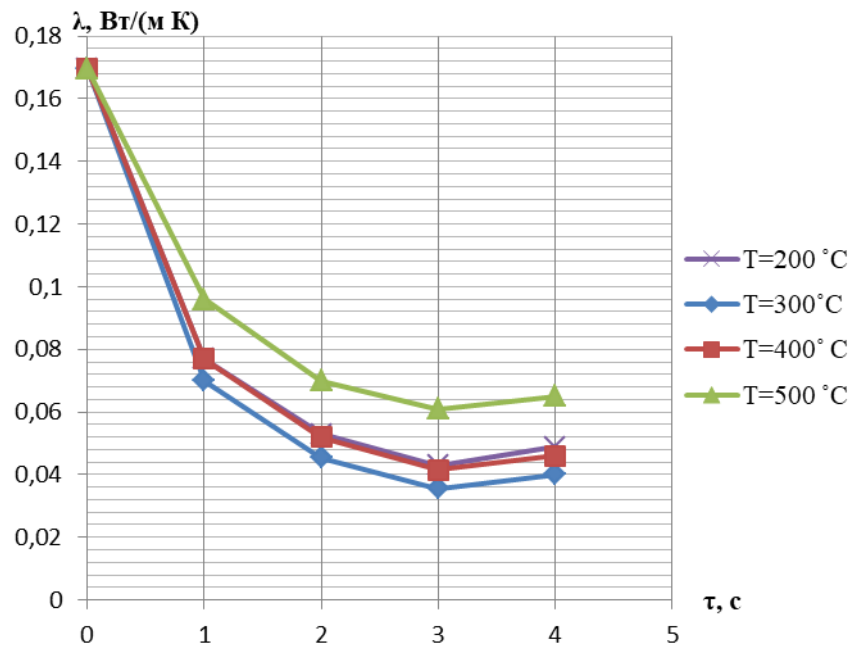


Рисунок 1.5 – Зміна теплопровідності частинки під час її спучення

Отже, показано відсутність єдиного підходу до формування пористої структури теплоізоляційних матеріалів на прикладі кінетики спінювання скла та спучення гідросилікату. Можна з упевненістю сказати, що необхідно розробити нові критерії оцінки пористої структури теплоізоляційного матеріалу, оскільки існуючі критерії пористості не дозволяють прогнозувати теплофізичні параметри теплоізоляційних матеріалів. Так, у [64] було зроблено спробу створення емпіричних залежностей теплофізичних властивостей матеріалу без якісної оцінки структури. Методом планування експерименту були знайдені залежності теплоємності, теплопровідності і щільності гідросилікату від режимів спучення. Факторами впливу було обрано температуру печі, час теплової обробки і початкова вологість матеріалу. З аналізу отриманих залежностей можна зробити висновок, що для кремнеземних матеріалів вплив на загальну щільність, надає сукупність різних факторів.

Причому вплив температури і часу теплової обробки на щільність матеріалу приблизно рівний. Це підтверджується й дослідженнями [76-78]. Для коефіцієнта теплопровідності кремнеземного матеріалу більший вплив має час теплової обробки, але даний вплив не однозначний. Під час тривалої теплової обробки коефіцієнт теплопровідності починає зростати, що, як було показано раніше, не характерно для піноскла, що спучується. Аналогічний вплив на теплоємність матеріалу має час спучення. Головним недоліком приведених залежностей є вузький діапазон їх вживання.

Зростання розміру закритої пори у теплоізоляційних матеріалах збільшує ефективну теплопровідність завдяки збільшенню конвективної складової, але одночасно при цьому зменшується тиск усередині пор, що у свою чергу зменшує ефективну теплопровідність. Необхідно дослідити термодинамічні параметри газу у закритих порах теплоізоляційних матеріалів для визначення вкладу конвективної складової ефективного коефіцієнту теплопровідності у закритих порах. Отже створити теоретичну базу процесів і структурних елементів, що впливають на теплофізичні властивості пористих теплоізоляційних матеріалів і знайти їх взаємовплив є необхідною науковою задачею.

Характеристики міцності також є важливою частиною теплової ізоляції промислових енергетичних установок і також залежать від пористої структури матеріалу. Дослідження показують, що основним етапом на стадії формування вихідної суміші піноскла, який впливає на характеристики міцності, є відпал і охолодження матеріалу [75]. При цьому основний фактор, який впливає на швидкість охолодження, є температуропровідність [79,80]. Так, для піноскла безпечна швидкість охолодження на початку процесу може бути рівною 1,2-1,8 °C/хв, яка знижується наприкінці процесу до 0,6-0,7 °C/хв. Також важливу роль в характеристиках міцності грають дефекти структури і розмір зерна [81, 82]. Тому знаходження температурної кривої відпалу для різних матеріалів, що спучуються, є необхідною задачею створення високоякісного пористого теплоізоляційного матеріалу.

Коефіцієнт запасу міцності, необхідно врахувати при розрахунку швидкості відпалу [83], і вибрати з врахуванням дилатометричних характеристик і характеристик міцності (для піноскла від 2 до 4) [75]. Для дрібнопористих матеріалів із замкнутою структурою рекомендується вибирати більше значення коефіцієнта запасу міцності, ніж для того ж матеріалу, але з крупними каналними порами [84, 85].

Формування пористої структури теплоізоляційних матеріалів з оптимальними теплофізичними властивостями можливо після створення комплексних показників пористої структури і визначенням їх впливу на ефективний коефіцієнт теплопровідності та теплоємність матеріалу.

### 1.3 Вплив синтезу вихідної суміші та піноутворювачів на утворення пористої структури

Традиційно в технологіях формування структури використовують процеси газоутворення в сировинній суміші. Знайдемо основні пороутворювачі у сировинній суміші теплоізоляційних матеріалів. Для піноскла основний газ, що спучує, утворюється при взаємодії вуглецю з сульфатною сіркою ( $SO_3/C=2,5/1$ ). У спученні гидросілікатів і піноскла беруть участь водяні пари (волога абсорбції і водяні пари в атмосфері печі) та інші продукти реакцій ( $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2O$ ,  $S$ ) [86]. Для ініціації спучення можна збільшувати концентрацію  $SO_3$ ,  $As_2O_3$ ,  $Sb_2O_3$ ,  $C$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ .

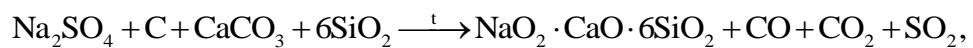
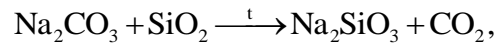
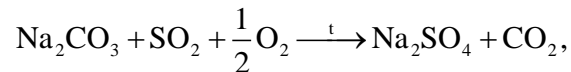
Для визначення найбільш вірогідних реакцій утворення агентів-пороутворювачів в [75] використовувався термодинамічний метод. Зміна  $\Delta G$  визначалася по рівнянню М. І. Тьомкина и Л. А. Шварцмана [63]

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T\Delta S_{298}^0 - T(\Delta aM_0 + \Delta bM_1 + c'M - 2).$$

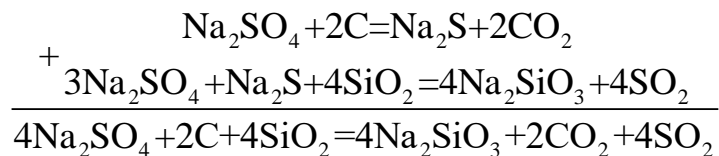
Для розрахунку також частково використовувалося рівняння

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T\Delta S_{298}^0 - C_p^0 \left[ (T - 298,16) - T \ln \frac{T}{298,16} \right].$$

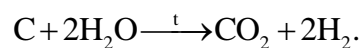
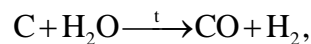
Найбільш вірогідний спосіб утворення  $\text{CO}_2$  і  $\text{SO}_2$  в суміші, що спучується, і що має найбільший спад  $\Delta G$ , відбувається за реакцією



а також відновленням сульфатів у присутності  $\text{SiO}_2$



Згідно з П. Байерсдорфером [87], при створенні піноскла вирішальне значення мають вміст сульфату у склі і парціальний тиск водяної пари в атмосфері печі. Водяні пари, адсорбуючись на поверхні частинок скла, реагують з вуглецем:



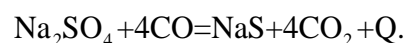
Аналіз даних розрахунків термодинамічного методу показує, що найбільш вигідними з точки зору термодинаміки є реакції за участю карбонатів, що не розклалися. Але, як правило, їх кількість мала, відповідно і їх вклад в загальний процес спучення незначний.

Підвищення вмісту вуглецю при неповному його окисленні збільшує вихід газової фази, що приводить до інтенсифікації процесу спучення. Проте,

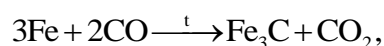
як було показано раніше, збільшення вмісту вуглецю більш ніж 0,1 % зменшує коефіцієнт спучення. Це означає, що вплив вуглецю при підвищеному його вмісті неоднозначно позначається на процесі спучення і залежить від інших компонентів вихідної суміші. При малому вмісті вуглецю відбувається інтенсифікація спучення. Можливо, що окислення вуглецю відбувається на ранніх стадіях і газу, що утворилися, вільно виділяються з матеріалу. Різні автори приводять різні дані щодо оптимального вмісту вуглецю. Для піноскла це й 1 % [88], й 1,3-1,8 % [89], й 3 % [90]. Єдиної думки не існує, тому що не існує чітких критеріїв оптимальності пористої структури.

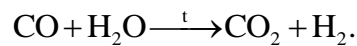
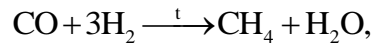
У ряді робіт [91, 92] для кращого окислення вуглецю в піносклі, рекомендують поряд з підтримкою вмісту  $\text{SO}_3$  (0,25-0,3 %) додатково вводити окиснювачі змінної валентності ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{As}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_5$  й інші) які при нагріванні легко віддають кисень, переходячи в закисні форми. З цього витікає, що суміші, які спучуються з добавками миш'яку і сурми мають більш активне газовиділення. При цьому найбільш дрібні комірочки формуються з суміші, що містить 0,15%  $\text{As}_2\text{O}_3$  і 0,3%  $\text{SO}_3$ ; найбільш крупні - у зразків з суміші, в якій містяться сульфати.

Негативний вплив вуглецю, концентрація якого вища за  $\approx 0,2\%$ , пояснюється виникненням екзотермічних реакцій, наприклад, відновлення сульфату натрію за такою реакцією



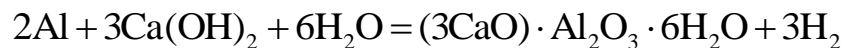
Реакції, що супроводжуються екзотермічним ефектом внаслідок локального перегріву розплаву і зниження його в'язкості, сприяють утворенню нерівномірної структури [93]. Дані реакції виникають, як правило, в сумішах, виготовлених із застосуванням газотворювачів, що містять вуглець [75, 94]





Згідно цього робимо висновок, що необхідно звести до мінімуму газоутворювачі, що містять вуглець, а також концентрацію заліза у вихідній суміші.

Вміст хімічно зв'язаної води або водяної пари в атмосфері печі приводить також до ініціації спучення, а реакції за участю водню можуть впливати аналогічно водяним парам [95, 96]. Так, утворення рівномірної пористості для газобетонів можливе шляхом регулювання головної екзотермічної реакції утворення пір [67]



Відкритим залишається питання про отримання структури залежно від складу вихідної суміші. Тим паче, що визначення властивостей і температури кристалізації суміші є актуальним під час спучення матеріалів.

В результаті узагальнення експериментальних даних Демідовічем [6] отримані інтерполяційні рівняння, що характеризують залежність температурно-часового чинника спінювання піноскла від складу для стекол, що містять 2,5 – 7%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в інтервалі температури максимуму спінювання 824 – 844 °C

$$\tau_{(p=\max)} = 9,5 - 1,75x_1 + 4,5x_2 - x_1x_2,$$

і для скла, що містить 10 – 15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в інтервалі температури максимуму спінювання 870 – 910 °C

$$\tau_{(p=\max)} = 13,25 - 2,5x_1 + 6,25x_2 + x_1x_2,$$



де  $\tau_{(p=\max)}$  – час теплової обробки, при якій досягається максимальне спучення, хв;

$x_1$  – температура максимуму спінювання  $^{\circ}\text{C}$ ;

$x_2$  – вміст  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в вихідному склі, %.

Як видно з даних рівнянь, вміст окислу алюмінію має найбільший вплив на тривалість спучення. Чим більше його вміст у вихідній суміші, тим триваліше необхідно спучувати матеріал. З іншого боку, чим більше температура, тим швидше спучиться матеріал. Температура максимуму спінювання залежить також і від вмісту  $\text{Al}_2\text{O}_3$  у вихідній масі. Тим же автором наводяться регресійні рівняння опису залежностей властивостей від складу піноскла. При цьому автором досліджувалися: хімічна стійкість по відношенню до кислоти  $\text{HCl}$ , хімічна стійкість до води; в'язкість ( $\lg\eta$ ) при  $800^{\circ}\text{C}$ ,  $850^{\circ}\text{C}$ ,  $900^{\circ}\text{C}$ ; градієнт в'язкості ( $\Delta\lg\eta$ ) при  $800 - 900^{\circ}\text{C}$ ; нижня межа температури кристалізації. Проаналізувавши дані рівняння, можна зробити висновок, що суміш досліджуваного складу характеризується високою стійкістю до кислоти і води, а зміна складу, у вибраних межах, наводить до відносно невеликого відхилення від хімічної стійкості. Найбільший вплив до стійкості хлорної кислоти надає оксид алюмінію. Чим більше його в складі, тим вище стійкість. На стійкість до води даний склад майже не впливає, але можна сказати, що оксид калію підвищує стійкість до води, а значить і міцність в умовах зовнішньої експлуатації. Вплив кремнезему і глинозему на стійкість скла до води протилежно і взаємозв'язано, що узгоджується з даними інших авторів [97]. Вміст оксиду алюмінію значно впливає на в'язкість. Так, величина в'язкості різко знижується при зменшенні вмісту  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , особливо в інтервалі 10-12 %, і незначно змінюється в залежності від вмісту  $\text{SiO}_2$ . Вміст всіх інших елементів має неоднозначний вплив на властивості в'язкості та кристалізації. Приведений аналіз властивостей піноскла від хімічного складу вихідної суміші дає можливість знаходження оптимальних теплофізичних властивостей піноскла.

Після аналізу впливу синтезу сировинної суміші та піноутворювачів на утворення пористої структури піноскла, кремнеземів та газобетонів виділено основні хімічні реакції по утворенню газів агентів-пороутворювачів. Визначено, що для збільшення загальної пористості необхідно звести до мінімуму вміст пороутворювачів, які містять вуглець, а також концентрацію заліза у вихідній суміші. Вплив компонентів вихідної суміші та піноутворювачів на розмір або форму пір не виявлено, тому існуючі методи синтезу вихідних компонентів не дозволяють формувати задані теплофізичні властивості матеріалів, для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок.

#### 1.4 Енергетичний баланс пороутворення

Для визначення кількості енергії що затрачується на формування структури пористого теплоізоляційного матеріалу складемо рівняння енергетичного балансу процесу пороутворення, а для розробки теоретичних і експериментальних методів розрахунку процесів переносу теплоти з потоками газу в пористої структури теплоізоляційних матеріалів складемо диференціальне рівняння теплопровідності.

Енергетичний баланс формування структури гідросилікату з початкової вологої суміші завдяки підведення енергії нагрітим потоком газу можна представити наступним рівнянням у якому індекси р відносяться до рідини, мат – до матеріалу

$$Q_{\text{Конвекцією}} + Q_{\text{Випром.}} = Q_{\text{Нагрів(рідини)}} + Q_{\text{Пароутворення}} + Q_{\text{нагрів(пари)}} + Q_{\text{мат}},$$

$$\text{де } Q_{\text{Конвекцією}} = Nu \cdot 2 \cdot \pi \cdot r(\tau) \cdot \bar{\lambda}(\tau, T) \cdot (T_{\text{потоку}} - T_0);$$

$$Q_{\text{Випром.}} = A \cdot C_0 \cdot 4 \cdot \pi \cdot r(\tau)^2 \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{печі}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right];$$

$$Q_{\text{Нагрів(р)}} = M_p \cdot \overline{C}_p \cdot (T_{\text{Випар}} - T_0);$$

$$Q_{\text{пароутворення}} = M_p \cdot L;$$

$$Q_{\text{нагрів(пари)}} = 2 \cdot \pi \cdot r(\tau) \cdot D \cdot (c_o - c_\infty) \cdot \text{Sh} \cdot C_{\text{пари}} \cdot (T_{\text{кінцеве}} - T_{\text{випар.}});$$

$$Q_{\text{мат}} = M_{\text{мат}} \cdot C_{\text{мат}} \cdot (T_{\text{випар}} - T_0) + M_{\text{мат}} \cdot \overline{C}_{\text{мат}}(\tau, T) \cdot (T_{\text{кінцеве}} - T_{\text{випар.}});$$

$r(\tau)$  – середньо інтегральний радіус гранули керамзиту, що залежить від часу термообробки;

$T_0$  – початкова температура вихідної суміші;

$\overline{C}_p$  – середня теплоємність води в інтервалі температур від початкової до температури випаровування;

$(c_\infty - c_o)$  – різниця концентрації води гранули і середовища;

$D$  – коефіцієнт дифузії у гранулі керамзиту;

$T_{\text{випар}}$  – температура випаровування води;

$\overline{\lambda}(\tau, T)$  – середньоінтегральний коефіцієнт теплопровідності матеріалу, що залежить від часу та температури термообробки [98];

$C_{\text{мат}}(\tau, T)$  - середньоінтегральна теплоємність матеріалу, що залежить від часу та температури термообробки [98].

Недоліком наведеного балансу, є те що визначення залежності теплофізичних параметрів гранули керамзиту від температури та часу термообробки визначається емпірично для кожного кількісного хімічного складу початкової суміші. Також, дане рівняння не враховує ендотермічні реакції перетворення глинозему.

Для визначення загального теплового балансу обчислимо витрату тепла на нагрів матеріалу через щільність теплового потоку за наступною формулою

$$\Delta Q_{\text{мат}} = - \int_{\tau_1}^{\tau_2} \int_{(S)} \lambda S \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) \partial S \partial \tau,$$

або через значення температур

$$\Delta Q_{\text{мат}} = c\rho V(\bar{T} - T_0),$$

де  $\bar{T}$  – середньоінтегральна температура  $\bar{T} = \frac{1}{V} \int_V T dV$ .

Для симетричного сферичного тіла [99]

$$\bar{T} = \frac{3}{4\pi R^3} \int_0^R \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{\Psi=0}^{\pi} T(r, \tau) r^2 \sin \theta d\theta d\Psi dr,$$

$$\bar{T} = \frac{3}{4} \int_0^R T(r, \tau) r^2 dr.$$

Початкова суміш, що під впливом теплового потоку формується у пористу структуру теплоізоляційного матеріалу отримує енергію в кількості, необхідній для нагріву початкової суміші, на здійснення необхідних реакцій та для формування своєї структури під впливом газів агентів-пороутворювачів, що утворилися. Тепло, яке отримує і віддає матеріал під час формування пористої структури у тепловому потоку, можна записати:

$$Q_{\text{отримане}} = \sum Q_{\text{нагрів}} + Q_{\text{плавління}} + Q_{\text{випаровування}};$$

$$Q_{\text{затрачене}} = \sum Q_{\text{охолодження}} + Q_{\text{конденсації}} + Q_{\text{кристалізації}}.$$

Різниця між отриманим та затраченим теплом умовно можна прийняти за енергію, що затрачена на формування пористої структури матеріалу

$$Q_{\text{отримане}} - Q_{\text{затрачене}} = \Delta Q_{\text{пор}},$$

$$\partial Q_{\text{пор}} = dU_{\text{пор}} + \partial L_{\text{пор}},$$

де  $\partial Q_{\text{пор}}$  енергія, витрачена на формування пористої структури;

$\Delta U_{\text{пор}}$  – зміна внутрішній енергії тіла, завдяки хімічного та механічного перетворення;

$\Delta L_{\text{пор}}$  – робота, що здійснюється порами, яка дорівнює різниці робіт розвитку пір (спучення) і їх заростанню (усадка).

Враховуючи, що

$$dU_{\text{пор}} = T_{\text{пор}} dS - PdV + \varphi dM_{\text{пор}},$$

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

$dS$  – зміна ентропії під час утворення пори;

отримаємо

$$\partial Q_{\text{пор}} = T_{\text{пор}} dS + \varphi_{\text{пор}} dM_{\text{пор}}.$$

Підставляючи значення середньоінтегральної температури в рівняння швидкості утворення пор, отримаємо залежність швидкості утворення пір від кількості підведеного теплоти. Підсумкове загальне рівняння теплового балансу для формування пористого матеріалу виглядатиме

$$\begin{aligned} & \bar{c} \bar{\rho} \bar{V} (T_{\text{мат}} - T_0) + Q_{\text{нагрів(пар)}} + Q_{\text{конденсації}} + Q_{\text{кристалізації}} + Q_{\text{нагрів(p)}} = \\ & = \int_{\tau_1(S)}^{\tau_2} \int \lambda S \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) dS d\tau + Q_{\text{плавлення}} + Q_{\text{випаровування}} + T_{\text{пори}} dS + \varphi_{\text{пор}} dM_{\text{пор}}. \end{aligned}$$

Енергія, прийнята тілом, визначається з диференціального рівняння перенесення енергії. Для простого випадку (бінарній суміші) з [100]

$$\overline{C}_p \rho \frac{dT}{d\tau} = \text{div}(\lambda \nabla \overline{T}) + \text{div}(DcQ^T \nabla \overline{c}_{10}) + (h_1 - h_2)I_1 + (\overline{C}_{p1} - \overline{C}_{p2})J_1 \nabla T,$$

де  $C_p$  – ізобарна теплоємність;

$c$  – об'ємна концентрація;

$$\overline{C}_p c = \overline{C}_{p1} c_1 + \overline{C}_{p2} c_2;$$

$\text{div}(\lambda \nabla \overline{T})$  – перенесення енергії теплопровідністю;

$\text{div}(DcQ^T \nabla \overline{c}_{10})$  – перенесення енергії термодифузії;

$(h_1 - h_2)I_1$  – перенесення енергії завдяки хімічного потенціалу;

$(\overline{C}_{p1} - \overline{C}_{p2})J_1 \nabla T$  – перенесення ентальпії завдяки дифузії;

$Q^T$  – питома теплота ізотермічного перенесення.

Основний вплив на формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу має хімічний потенціал і дифузія газів агентів-пороутворення, які під час формування пористих структур не розглядаються в проаналізованих роботах. Тому для розробки методів розрахунку процесу переносу теплоти з потоками газу в пористих теплоізоляційних матеріалах та для визначення енергії яку потрібно затратити на формування пористої структури матеріалу необхідно аналітичними та напівемпіричними методами знайти залежності комплексних показників пористої структури від зміни хімічного потенціалу та перенесення ентальпії завдяки дифузії.

## 1.5 Комплексні показники пористої структури

Більшість існуючих досліджень пористих структур матеріалів теплового захисту елементів промислових енергетичних установок враховують загальну

пористість як основну структурну характеристику теплоізоляційного матеріалу, та іноді враховують або форму пір та їх кількість або та тип пір [101–103]. Проведений аналіз сучасної літератури показує, що навіть одночасне врахування загальної пористості матеріалу, розміру і типу пір недостатньо для повної характеристики пористої структури теплоізоляційного матеріалу. В [104] пропонується приділяти увагу в пористих системах наступним основним чинникам: характер структури, число компонентів структури, агрегатний стан компонентів структури і процеси взаємодії між компонентами структури. Наведені комплексні показники зручні для поділу пористих систем в цілому тому, що вони дозволяють управляти теплофізичними властивостями конкретного макропористого матеріалу шляхом зміни структури пористості. Але дані показники не дають змоги знайти функціональної залежності теплофізичних властивостей теплоізоляційних матеріалів від пористої структури, що не дає змогу оптимізувати теплофізичні властивості пористого теплоізоляційного матеріалу шляхом створення прогнозованих пористих структур. Тому пропонуються основні комплексні показники пористої структури теплоізоляційного матеріалу та конструкцій теплового захисту елементів промислових енергетичних установок, які повною мірою відображають пористу структуру й надають можливість складання регресійного рівняння залежності теплофізичних властивостей пористих теплоізоляційних матеріалів від запропонованих показників [105].

1) Пористість –  $P$ , %. Пористість як загальний показник щільності теплоізоляційного матеріалу та конструкцій теплового захисту.

2) Кількість пір –  $n$ , шт/м<sup>3</sup>. Кількість пір для гомогенної структури у сукупності з пористістю дають загальне уявлення про розподіл пір у матеріалі. Зміна кількості пір у часі під час формування пористої структури теплоізоляційних матеріалів виражає динаміку процесу пороутворення.

3) Розташування пір в просторі – описується системою трансляцій Браве (решітка Браве), в якій пора є ядром решітки з розмірами менш ніж

комірка Вігнера — Зейтца, або статистичним розподілом пір по об'єму теплоізоляційного матеріалу.

4) Форма пори – просторова функція координат, що описує форму пори. Можливо, прийняття опису всіх пір як сфер з описом деформації, властивій даній сфері, згідно гіпотезі Пуанкаре або габаритними розмірами пори, або загальним коефіцієнтом геометричної характеристики пористої структури.

5) Показники стану газу у порах – градієнт температури, від якого залежить конвекція у порах та фізичні властивості теплоносія у порі. Можна також представити добутком числа Грасгофа на число Прандтля.

Для визначення енергоємності створених пористих теплоізоляційних матеріалів та конструкцій теплового захисту елементів промислових енергетичних установок використовується енергія формування пористої структури

$$dQ_{\text{пор}} = T_{\text{пор}} dS + \varphi_{\text{пор}} dM_{\text{пор}}.$$

Під час формування пористої структури теплоізоляційних матеріалів з сировинної суміші необхідно враховувати термодинамічні умови формування пір та склад сировинної суміші. Тому необхідно ввести для таких матеріалів узагальнюючий показник  $K_0$ .

Для необхідних умов експлуатації передбачається дослідити основні три напрямку формування пористої структури: у теплоізоляційному матеріалі, у теплоізоляційному виробі та у конструкції теплового захисту енергетичного обладнання.

Для формування 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.

## 1.6 Висновки до розділу

Аналітичні дослідження впливу особливостей структури пористих теплоізоляційних матеріалів та конструкцій теплового захисту елементів промислових енергетичних установок на їх теплофізичні характеристики дозволяють зробити наступні висновки:

1. Демідовіч в своїй роботі [6] стверджує, що мінімальний коефіцієнт теплопровідності у піносклі виникає при розташуванні пір в шаховому порядку з формою плескатою з боків еліпса зорієнтованого великим радіусом перпендикулярно тепловому потоку. Але дане припущення не враховує розмір пір, що, як було доведено, теж впливатиме на ефективний коефіцієнт теплопровідності. Тому необхідно провести емпіричні дослідження впливу усіх запропонованих показників пористої структури на теплофізичні характеристики різних теплоізоляційних матеріалів.

2. Чудновський в своїй роботі [3] доводить, що чим менше розмір пори, тим менше конвективна складова теплообміну. Але ефективний коефіцієнт теплопровідності при збільшенні розміру пори зменшується завдяки низького коефіцієнту теплопровідності газу у порах, тому необхідне знаходження оптимального розміру пір для різних теплоізоляційних матеріалів після з'ясування механізму зростання пори, зокрема, зміни концентрації газу усередині пори під час її розвитку і вірогідність зростання пори завдяки поглинання нею іншої пори.

3. Відсутній єдиний підхід впливу пористої структури теплоізоляційного матеріалу та конструкції теплового захисту елементів промислових енергетичних установок на теплофізичні властивості матеріалу.

4. Для більш рівномірного спучення вихідної суміші за об'ємом необхідно мінімізувати розмір дисперсних вихідних компонентів, тим самим збільшивши площу їх контактів. Для досягнення рівномірної пористості теплоізоляційного матеріалу на стадії формування пористої структури необхідно мінімізувати градієнт температур і в'язкості по матеріалу під час його теплової обробки. Також, під час спінювання вихідної суміші необхідно вилучити непотрібні домішки з температурою плавлення вище температури спінювання.

5. Роль агентів пороутворення під час спучення або спінюванні вихідної суміші теплоізоляційних матеріалів грають газу, що виділяються в результаті хімічної реакції (водяні пари, кисень, водень, вуглекислий газ). При цьому вихід газів з матеріалу, що спучується, як правило, складає 0,5–3% по масі. Для збільшення загальної пористості та більш рівномірного розподілу пор по теплоізоляційному матеріалу необхідно звести до мінімуму вміст газоутворювачів які містять вуглець, а також концентрацію заліза у вихідній суміші.

6. Чим більше у складі вихідної суміші піноскла та гідросилікатів оксиду алюмінію, тим більш стійкий теплоізоляційний матеріал до хлорної кислоти.

7. Для розв'язання диференційних рівнянь теплопровідності і рівняння передачі енергії крізь сировинну суміш теплоізоляційного матеріалу необхідно дослідити та узагальнити дифузійні процеси газів агентів-пороутворювачів, кінетику зміни агрегатного стану суміші та формування реологічних властивостей.

8. При розрахунку процесів у пористій структурі необхідно враховувати комплексні показники, що повною мірою відображають пористі структури та тепломасообмінні процеси, що протікають у них: пористість, кількість пір, розташування пір в просторі, форма пори та показники стану газу у порах. Для визначення енергоємності створених пористих теплоізоляційних матеріалів використовується енергія формування пористої структури.

## 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ВИКЛАДЕННЯ ЗАРОДЖЕННЯ ПІР ТА ШВИДКІСТЬ ЇХ УТВОРЕННЯ В СИРОВИННІЙ СУМІШІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Зміна ефективного коефіцієнту теплопровідності конструкцій теплового захисту вироблених з бетонної суміші з додаванням керамзиту під дією циклів заморожування-відтавання носить нелінійний характер з максимумом функції на другому циклі [106], що підтверджує гіпотезу існування екстремуму залежності теплофізичних властивостей пористого теплоізоляційного матеріалу та конструкції з нього від пористої структури. Зниження ефективного коефіцієнту теплопровідності бетонної суміші при подальших циклах заморожування-відтавання можна пояснити завдяки синергетики, а саме утворення каналних пір як самоорганізацію структури пористого теплоізоляційного матеріалу з метою протидіяння структури матеріалу зовнішнім фізичним умовам. У вологих пористих теплоізоляційних матеріалах, що використовуються для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок система каналних пір влаштована таким чином, що в період зменшення зовнішніх температурних умов нижче за температуру кристалізації вологи відбувається витіснення її частини в порожні пори. Отже температурна дифузія вологи захищає структуру пористого теплоізоляційного матеріалу від надмірних місцевих напружень і відповідно руйнувань. При постійно однакових мінливих умовах температури та вологи середовища оточуючого енергетичне обладнання система каналних пір теплоізоляційного матеріалу змінюється через деструкції структури матеріалу збільшуючи свій термічний опір. Цікаво відзначити, що генезис каналної або клиноподібної пори у матеріалі теплового захисту енергетичних установок є таким, який просторово зорієнтований на зменшення ефективного коефіцієнта теплопровідності матеріалу, тобто перпендикулярно тепловому потоку. З вищевикладеного випливає припущення про самоорганізованість пористих структур теплового захисту елементів промислових енергетичних установок.

Для визначення кінетики утворення пір та швидкості збільшення їх об'єму в різних матеріалах теплового захисту енергетичних установок було обґрунтовано теорію формування пористої структури матеріалу.

## **2.1 Генезис пір у теплоізоляційних матеріалах та конструкціях теплового захисту енергетичного обладнання**

На сьогоднішній день існують як різноманітні підходи до розрахунку процесів енергообміну у пористому середовищі, так і різна класифікація генезису пір [107]. Розрізняють внутрішні закриті і зовнішні відкриті пори. Внутрішні закриті пори є замкнутими в об'ємі тіла системами пір, які можуть мати взаємне сполучення між собою. Відкриті зовнішні пори поділяють на наскрізні і тупикові. Таким чином, загальна пористість теплоізоляційного матеріалу є сумою пористості з внутрішніх пір, наскрізних пір і тупикових пір.

За розташуванням і орієнтацією пір в теплоізоляційних матеріалах розрізняють хаотичне і впорядковане розташування, а також шахове та коридорне розташування пір по площині.

Також мікропору іноді розглядають як кристал і для характеристики різноманітності форм пір вводять поняття ступінь огранки, рівний відношенню характерного розміру пори до максимально можливого значення.

Щодо моделей, що описують складні пористі структури теплового захисту, можна виділити модель губчастого тіла і корпускулярну модель. У моделі губчастого тіла пори розглядаються як система розгалужених каналів, а в корпускулярній моделі тіла пори представляють собою зазори (проміжки, каверни) між нещільно зрощеними частками, що представляють собою каркас тіла. Тому пористі теплоізоляційні структури можна розглядати як корпускулярну модель пористого тіла.

Для узагальнення теорій та знаходження необхідної класифікації пористих теплоізоляційних матеріалів за структурою, яка б описувала всю складність і різноманіття пір, необхідно проаналізувати існуючі теорії генезису

пористості та кінетику і механізм збільшення об'єму пір. Необхідно розглядати початкову суміш для виготовлення теплоізоляційного матеріалу, як термодинамічно не рівноважну систему з можливими флуктуаційними відхиленнями ентропії від максимальних значень. Розглянемо пору, як вільний об'єм або порожнечу, а точніше як локальне виділення вільного об'єму, що володіє певною формою, місцем локалізації і розмірами, що значно перевищують відстані між атомами кристалічної решітки матеріалу. Автори [108] роблять припущення, що пори бувають локалізованими (звичайні пори) і делокалізованими (розподілені між атомами порожнечами, що не викликають різких перепадів електронної щільності). Дані ствердження мають місце при розгляді мікропористих електропровідних матеріалів, хоча й носять досить сумнівний характер оскільки існування абсолютної порожнечі суперечить досить багатьом сучасним теоріям фізики. Тому доречніше розглядати макропору у теплоізоляційному матеріалі як систему дрібніших пір, що організувалися при структуроутворенні матеріалу зі своїми індивідуальними фізичними характеристиками, що будуть відрізнятися при різних умовах експлуатації матеріалів.

Найменші пори у теплоізоляційних матеріалів та конструкціях теплового захисту енергетичного обладнання, які розглядаються як термодинамічна система, це пори з геометричним розміром набагато більшим, ніж довжина вільного пробігу молекули газу, який їх заповнює. Під час протікання енергії крізь такі пори виникають мікроконвективні токи, що при достатньому розмірі пори та градієнту температур перетворюються у конвекцію.

Існують основні два підходи до розгляду отримання елементарної пористої системи. Перший з них розглядає збільшення об'єму пір як диспергування псевдосуцільного середовища в процесах сублімації, конденсації, кристалізації, хімічних реакцій. Другий підхід пов'язано з розглядом зростання пористої системи шляхом додавання пористих систем дрібнішого просторового масштабу (колоїдні системи, сипучі матеріали і т.д.). Цілком природно, що існує також комбінований підхід до розгляду утворення

пористої системи, який розглядає складніші пористі системи і їх комбінації (будівельні матеріали, теплоізоляційні засипки керамзиту і т.д.). Також варто згадати, що існує підхід, який розглядає пористість як дрібноструктурні тривимірні дефекти (метали, сплави, деякі мінерали) [108]. Дані підходи не дозволяють визначити відмінності процесу енергообміну у пористому середовищі, вивести залежності кількості пір та збільшення об'єму пори від технологічних параметрів процесів формування пористої структури, що не дає можливості вирішити задачу управління пороутворенням теплоізоляційних матеріалів. Тому, рекомендується генезис пір у теплоізоляційних матеріалах та систем теплового захисту енергетичного обладнання розділити на більш прості складові, такі як генезис при дифузійному скупченні газів (дифузний генезис) і генезис завдяки руйнуванню матеріалу (генезис деструкції) (рис.2.1).



Рисунок 2.1 – Класифікація генезису пір у теплоізоляційних матеріалах та конструкціях теплового захисту енергетичного обладнання

До дифузійного генезису можна віднести зародження пір під час утворення газів в матеріалі завдяки хімічних реакцій, завдяки різниці меж насичення газами речовини в різних агрегатних станах, завдяки переходу в газоподібний стан одного з компонентів вихідної суміші.

До генезису деструкції можна віднести виникнення пір завдяки термодеструкції з'єднань (пористість при нагріванні полімерів), завдяки деформації тіла, а також завдяки впливу випромінювання з подальшим розпадом хімічних зв'язків.

Запропонована класифікація генезису пір у теплоізоляційних матеріалах та конструкціях теплового захисту енергетичного обладнання дозволяє відокремити пористі структури по технологічним ознакам їх створення та тепломасообмінним процесам що протікають у даних структурах. Це дає можливість відокремити утворення пір у теплоізоляційних матеріалах та виробках від конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання. Розглянемо більш докладно процеси, що впливають на формування пористої структури у теплоізоляційних матеріалах та конструкціях теплового захисту енергетичного обладнання для кожного генезису пористості.

### 2.1.1 Дифузійний генезис пір

При з'єднанні хімічних компонентів для створення вологої сировинної суміші теплоізоляційних матеріалів утворюються гази, які скупчуються в місцях найменшої щільності і утворюють газові бульбашки. Якщо тиск в газових бульбашках більше суми зовнішнього і гідростатичного тиску, то відбувається кипіння рідкої складової суміші матеріалу з подальшим охолодженням. Для інтенсифікації процесу пороутворення доцільно істотно знизити тиск навколишнього середовища і зробити закипання суміші. Зниження зовнішнього тиску також збільшує пороутворення під час кристалізації завдяки погіршенню заповнення рідким розплавом міждендритних проміжків. При збільшенні водотвердого відношення вхідних компонентів суміші (для ніздрюватих бетонів від 0,3 до 1) капілярна пористість матеріалу зростає в 1,5 рази [109]. В області пружнопластичних деформацій матеріалу, що кристалізується, можна говорити про гістерезис процесів спучування і стиснення. Таким чином, одним з технологічних параметрів формування

заданої пористої структури теплоізоляційного матеріалу при дифузійному генезисі пір є зовнішній тиск.

Можна зустріти дані про зниження пороутворення при використанні вакуумної камери заповненої інертним газом [67]. Принцип її дії аналогічний принципу дії вакуумного деаератора. Тому при необхідності збільшення пороутворення скипанням необхідно правильно вибрати режим охолодження для кристалізації матеріалу в момент найбільшого спучування, а залежність кінцевої пористості теплоізоляційних матеріалів від зовнішнього тиску не є лінійною.

Найбільш поширеними теплоізоляційними пористими матеріалами, в яких пори утворилися шляхом хімічної взаємодії компонентів суміші з подальшим газовиділенням, є пінобетони, газобетони, піноскло і пінополістирольні матеріали. Управляючи зовнішнім тиском, температурою та часом кристалізації можливо створення заданої пористої структури для даних матеріалів.

Утворення газової складової у сировинній суміші можливе також завдяки переходу одного з компонентів суміші (як правило води) в газовий агрегатний стан. При цьому відбувається накопичення газу і утворення пори під дією внутрішнього тиску. Найбільш поширеним теплоізоляційним матеріалом для захисту елементів промислових установок, що створюється подібним способом, є керамзит.

До дифузійного генезису пір у теплоізоляційних матеріалів також відноситься пороутворення завдяки різниці меж насичення речовини в твердому і рідкому стані. Відомо, що розчинність газів в рідкому середовищі вища ніж у твердому, тому під час кристалізації сировинній суміші теплоізоляційних матеріалів відбувається витіснення розчинених газів, але оскільки поверхня розчину вже кристалізувалася, то перед фронтом кристалізації починає накопичуватися надлишок газу. Газ агент-пороутворювач, що скупчується, просувається разом з фронтом кристалізації до тих пір, поки концентрація газу не перевищить максимально можливу



концентрацію розчиненого газу в розчині сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу [110]. Концентрація на рухомому фронті кристалізації визначається співвідношенням [111]

$$c(x) = c_0 \cdot \left[ \frac{1 - k_c}{k_c} \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} + 1 \right],$$

де  $c_0$  – початкова концентрація газу, розчиненого в рідині;

$x$  – координата (початок координатної осі зв'язаний з лінією розділу фаз);

$\delta$  – товщина шару газу перед фронтом кристалізації (дорівнює відношенню коефіцієнту дифузії газу у рідині до швидкості руху фронту кристалізації);

$k_c$  – коефіцієнт розподілення сумішей (дорівнює відношенню розчинності газу в твердій фазі до розчинності газу в рідкій фазі).

Значна швидкість фронту кристалізації сировинної суміші призводить до збільшення товщини шару газу перед фронтом кристалізації, що веде до збільшення концентрації цього газу і, як наслідок, до збільшення швидкості утворення нових пір та збільшення об'єму вже утворених пір у теплоізоляційному матеріалі. Завдяки порам, що утворилися за фронтом кристалізації, знижується концентрація газів перед фронтом кристалізації що веде до повторного збільшення концентрації газу в часі. Час, за який відбувається нове накопичення концентрації газу від початкового рівня до максимально можливого, назвемо періодом утворення пір під час кристалізації сировинної суміші. Для отримання псевдогомогенної пористої структури теплоізоляційного матеріалу необхідно підтримувати енергообмін сировинної суміші з навколишнім середовищем на постійному рівні (з урахуванням зміни теплофізичних показників суміші у часі), що призведе до рівномірності

швидкості руху фронту кристалізації та сталості періоду утворення пір завдяки кристалізації.

Додаткова гіпотеза: завдяки капілярних явищ всмоктування рідкої фази в утворену пору може розвиватися не тільки дифузійна пористість, а й деструкційна, обумовлена затвердінням і зменшенням обсягу рідкої фази укладеної з боків матеріалу, що кристалізувався. У затверділому матеріалі при цьому утворюються тріщини.

Для всіх перерахованих випадках дифузійного генезису (порозародження завдяки хімічних реакцій, завдяки різниці меж насичення газами речовини в різних агрегатних станах, завдяки випаровування одного з компонентів сировинної суміші) актуальним питанням для вирішення поставленої задачі є швидкість зародження пір і швидкість збільшення їх об'єму. Місце утворення пір носить флуктуаційний характер, але можна з упевненістю сказати, що найбільш життєздатні зародки пір виникають поблизу структурних недосконалостей. До таких недоліків можна віднести кордон розділу різних хімічних структур, різних агрегатних станів одного елемента, пори і порожнечі, спричинені деструкцією матеріалу. У рідкому агрегатному стані такі недосконалості дифундують за обсягом і можуть об'єднуватися. Для об'єднання центрів пороутворювачів необхідно затратити певну енергію, яка витрачається на деформацію структури і переходить в потенційну енергію нової пори. Математичний опис розташування пір по теплоізоляційному матеріалу або елементу теплового захисту енергетичного обладнання описується за допомогою методів математичної статистики.

### 2.1.2 Генезис деструкції

До генезису деструкції пір у теплоізоляційних матеріалів та елементів теплового захисту енергетичного обладнання відноситься утворення пір завдяки термодеструкції (як приклад, пористість при нагріванні полімерів), завдяки деформації тіла, а також завдяки впливу випромінювання.

Під час кристалізації вологої сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу на поверхні розчину утворюється початкова тверда зона (кірка) з щільністю вище щільності рідкого стану розчину. Початкова твердіюча поверхнева зона не дає залишити вологу сировинну суміш газам агентам-пороутворювачам, що розчинені в суміші, а також дана зона завдяки об'ємній усадці сприяє формуванню початкових напружень, що ведуть до утворення системи пір у внутрішньому шарі та мікротріщин. Утворена система пір виникає завдяки часткового руйнування матеріалу і впливає на теплофізичні властивості теплоізоляційного матеріалу. Лінійну усадку  $\varepsilon$  визначають як

$$\varepsilon = \alpha_{cm} \cdot (T_c - T_l) \cdot 100\%,$$

де  $\alpha_{cm}$  – коефіцієнт термічного стиснення;

$T_c$  й  $T_l$  – температури сировинної суміші і ліквідуса відповідно.

Пори і елементарні пористі системи під час кристалізації сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу утворюються, як правило, за фронтом кристалізації в затверділій частині вихідної суміші. Тому розвиток пористості при дифузійному генезису пов'язано зі швидкістю охолодження суміші, а при деструкційному – з температурою. При підвищенні швидкості кристалізації одночасно з пониженням температури кількість пір в матеріалі буде збільшуватись. Це пов'язано зі збільшенням в'язкості суміші і не проникненням гарячої рідкої фази в пори капілярного типу, що утворюються. При підвищеній температурі або незначній швидкості кристалізації рідка складова сировинної суміші заповнює утворені капіляри і відбувається самоліквідація пори. Але при цьому відбувається більш пізнє затвердіння частини фронту кристалізації, що сприяє нерівномірному розподілу вологи у сировинній суміші перед фронтом кристалізації. При значній швидкості кристалізації сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу можливий ефект повторного плавлення затверділої зони теплоізоляційного матеріалу завдяки теплової енергії гарячих

шарів сировинної суміші (в металургії даний процес називають зворотньою ліквідацією).

Утворення пористої структури теплоізоляційних матеріалів деструкцією під час кристалізації створює умови для дифузійного пороутворення. Так, сировинні суміші теплоізоляційних матеріалів насичуються газами з навколишнього середовища внаслідок дифузії, механічного захоплення газу (під час перемішування суміші) або хімічної взаємодії розплаву з навколишнім середовищем. Якщо парціальний тиск газу, розчиненого в сировинній суміші і існуючого у вигляді найдрібніших бульбашок, більший тиску зовнішнього середовища, то відбувається зростання газової бульбашки (завдяки подолання сил поверхневої напруги і завдяки додавання окремих бульбашок в єдину) і його спливання на поверхню. По мірі затвердіння розчину збільшується щільність середовища, спливання сповільнюється і частина бульбашок застигає в затверділому матеріалі. При деформаційних впливах, якщо локальні напруги перевищують певну критичну величину, виникають розриви в структурі матеріалу і утворюються пори, зростання яких обумовлено подальшою зміною локальних напружень. Подальше збільшення локальних напружень буде приводити до збільшення об'єму пір і їх об'єднання в систему пір, яка буде залежати від загальних напруг в тілі. Тобто, необхідно розмежувати напруги, які йдуть в тілі при деформаційних впливах і локальні напруги в тілі при тих же деформаційних впливах. Відмінністю останніх буде сукупність дії загального поля напружень і теплових флуктуацій, викликаних неоднорідністю тіла. Виникнення каналної системи пір викликає спад загальної енергії сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу і відбувається утворення макропір завдяки поглинання дрібніших пір, що знаходяться поруч. Це означає, що зростання системи каналних пір буде йти в напрямку розташування дрібних пір. Однак варто звернути увагу, що зростання системи пір буде також обумовлене силами, що протидіють їй. Так, при квазікрихкому руйнуванні система пір матиме довгастий вид з двома гострими краями, а під час в'язкого руйнування (в пластичних матеріалах) – форму витягнутого еліпса з співвідношенням

радіусів 2:1 [108]. Варто зазначити, що енергія, яку необхідно затратити для приєднання пори до системи каналних пір у сировинній суміші, збігається з енергією довговічності матеріалу.

Маючи основні уявлення процесів енергообміну під час утворення пір у сировинній суміші теплоізоляційних матеріалів, виведено швидкість утворення пір та швидкість збільшення об'єму пір даних сумішей, що надало можливість формування пористої структури для створення теплоізоляційних матеріалів з заданими теплофізичними характеристиками.

## 2.2 Швидкість пороутворення

Оскільки число атомів під час утворення пори не змінюється, а відбувається лише їх перегруповування, то згідно кінетичного закону діючих мас швидкість утворення пори при дифузійному генезисі завдяки утворення газу-агенту пороутворювача можна записати у вигляді

$$w_0 = \sum_{j=1}^m w_j,$$

де  $w_j$  – швидкість утворення ядра пори за рахунок газів агентів-пороутворювачів;

$m$  – кількість газів, що беруть участь в пороутворенні.

$$w_j = K \prod_{i=1}^{i_0} c_i^n,$$

де  $c$  – концентрація частинок, що беруть участь в утворенні газу;

$n$  – порядок реакції по речовині  $i$ .

При формуванні пористої структури теплоізоляційних матеріалів з сировинної суміші необхідно враховувати термодинамічні умови формування пір та склад сировинної суміші. Тому необхідно ввести для таких матеріалів узагальнюючий показник  $K_0$ . Для дифузійного генезису пори пороутворювачем повинна служити вільна молекула або атом (зародок), отже константу рівноваги можна розписати по закону Арреніуса

$$K = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right),$$

де  $K_0$  – узагальнюючий показник;

$E_a$  – енергія активації;

$R$  – універсальна газова постійна;

$T$  – температура.

Узагальнюючий показник  $K_0$  характеризує повну кількість агентів-пороутворювачів і є функцією тиску і температури. Енергія активації  $E_a$  – це потенційний бар'єр, який необхідно подолати для розриву міжмолекулярних зв'язків або деформаційних зрушень під час об'єднання пір. В даному випадку будемо називати енергію активації необхідною вільною енергією. Вона буде залежати від в'язкості матеріалу, полів напруги і зовнішнього тиску.

Кількість центрів пороутворення  $n$  і швидкість зміни об'єму пір  $W$  у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу буде виражатися наступною схематичною залежністю (рис. 2.1). З рисунку видно, що до певного моменту збільшується як кількість пір, так і розмір самих пір, проте в певний момент подальше зростання пір завдяки розтягуванню внутрішньої поверхні пори вже неможливе і кількість пір досягає свого максимально можливого значення. Подальше збільшення об'єму пір у сировинній суміші здійснюється завдяки поглинання одних пір іншими, і так до максимально можливого свого значення,

після якого починається процес спікання суміші теплоізоляційного матеріалу і зміцнення його каркаса. При цьому пористість є постійною.

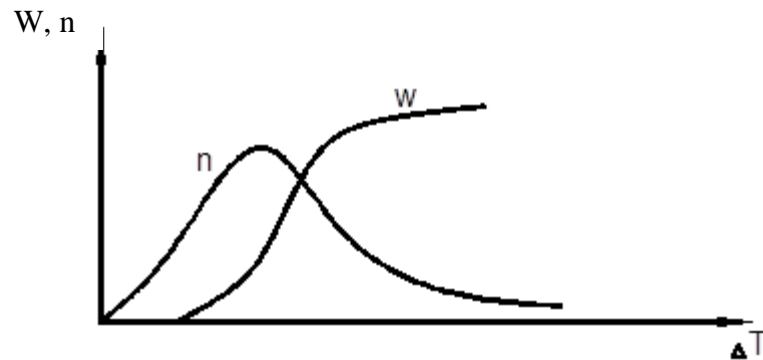


Рисунок 2.1 – Залежність числа центрів пороутворення  $n$  і швидкості збільшення об'єму пір  $W$  від температури  $T$ .

Додаткова гіпотеза: існує три періоди зміни комплексних показників пористої структури теплоізоляційного матеріалу під час формування його структури завдяки підведення теплової енергії до сировинної суміші. На протязі другого періоду формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу загальна пористість матеріалу залишається не змінною.

Зміна концентрації центрів пороутворення у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу можна також представити залежністю [112]

$$\frac{dn}{d\tau} = w_0 + fn - gn,$$

де  $w_0$  – швидкість утворення пір;

$f$  – константа швидкості виникнення пір;

$g$  – константа виродження пір.

Позначивши  $f - g = \varphi$ , отримаємо

$$\frac{dn}{d\tau} = w_0 + \varphi n,$$

Якщо  $\varphi < 0$  то  $\frac{dn}{d\tau} \rightarrow 0$  і швидкість росту центрів пороутворення у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу зменшується, а якщо  $\varphi > 0$  то, відповідно, швидкість росту центрів пороутворення збільшується та росте і швидкість збільшення за об'ємом пір. Це означає, що існує таке значення  $\varphi$ , при якому швидкість росту пір досягає свого критичного моменту і відбувається руйнування (розрив) матеріалу. Враховуючі раніше запропоновану гіпотезу, то на першому етапі спучування / вспінення теплоізоляційного матеріалу  $\varphi > 0$ , а на третьому  $\varphi < 0$ . При цьому другий етап включає екстремум функції з значенням  $\varphi = 0$ .

Швидкість зародження центрів пороутворювачів в вихідній суміші теплоізоляційного матеріалу можна описати як суму швидкостей виникнення газів агентів-пороутворювачів, які в свою чергу підпорядковуються закону Арреніуса. Підсумкове рівняння без констант виникнення і виродження пір для швидкості зародження пір за рахунок газів агентів-пороутворювачів можна розписати у вигляді

$$\left(\frac{dn}{d\tau}\right)_0 = w_0 = \sum_{j=1}^m \left[ K_{0j} \cdot \exp\left(-\frac{E_{aj}}{R \cdot T}\right) \prod_{i=1}^{i_0} c_{ij}^n \right].$$

Енергія активації під час зародження центрів пороутворювачів, тобто для швидкості виникнення пір у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу, буде залежати від генезису пороутворення. При кристалізації - це енергія відриву молекул газу від молекул рідини. Під час спучення сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу газами агентами-пороутворювачами енергія активації є енергію, яку необхідно витратити для отримання молекул газу агента-пороутворювача, тобто дорівнює величині енергії активації молекулярної реакції і є довідковою величиною. При деструкції матеріалу це



енергія, яку необхідно прикласти для руйнування структури теплоізоляційного матеріалу або конструкції елемента теплового захисту енергетичного обладнання. Розглянемо окремі випадки генезису пір.

При кристалізації сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу з допущенням, що відбувається витіснення молекул тільки одного газу

$$w_0 = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) c,$$

де  $c$  – концентрація газу перед фронтом кристалізації залежить від координати і від швидкості фронту кристалізації.

Підставивши рівняння для визначення концентрації газу перед фронтом кристалізації, отримаємо рівняння для визначення швидкості утворення пір у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу

$$w_0 = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \cdot c_0 \cdot \left[ \frac{1 - k_c}{k_c} \cdot e^{-\frac{xw_{фк}}{D}} + 1 \right],$$

де  $c_0$  – початкова концентрація газу агента-пороутворювача;

$x$  – координата фронту кристалізації.

Враховуючи ізотермічність кристалізації, кількість центрів пороутворення можна знайти з наступного рівняння

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

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.

Якщо  $x_0 = 0, n_0(\tau_0) = 0, \tau_0 = 0$  (початок координат знаходиться в момент часу нульової концентрації центрів пороутворювачів, а швидкість руху фронту кристалізації постійна) то

$$n_0(\tau) = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \cdot c_0 \left[ \tau - \frac{D(1-k_c)}{k_c \cdot w_{\phi\kappa}^2} \cdot e^{-\frac{w_{\phi\kappa}^2 \tau}{D}} \right].$$

Але для використання даної формули на неї необхідно накласти обмеження  $c < c_{ж.мах}$  (концентрація часток не перевищує максимально можливу концентрацію розчинності газу в рідкій суміші). При  $c < c_{ж.мах} + \Delta c, \Delta c \rightarrow 0$  відбувається утворення пори  $n_0(\tau) = n_0(\tau) + 1$  і зменшення концентрації газу до значення  $\Delta c$ .

Для утворення пір у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу шляхом виникнення газу агенту-пороутворювача внаслідок бінарної хімічної реакції швидкість народження пір і кількість центрів пороутворення дорівнюватиме

$$w_0 = K_{0j} \cdot \exp\left(-\frac{E_{aj}}{R \cdot T}\right) c_1^g c_2^g,$$

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

де –  $\mathcal{G}$  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 [113].

Варто звернути увагу, що при цьому генезису пір предекспонента залежить від часу, оскільки вона є функцією температури.

При спученні сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу водяними парами, що знаходяться в суміші у вигляді зовнішньої вологи (утворення гідросилікатів), енергія активації буде дорівнювати кількості тепла, необхідного для утворення 1 моля води в пару (за рівнянням Клапейрона-Клаузіуса). Швидкість пороутворення матиме вигляд

$$w_0 = K_{0j} \cdot \exp \left( - \frac{M (v_{пара} - v_{жс}) \frac{dP}{dT}}{R} \right) c_{H_2O},$$

де  $v$  – питомий об'єм при даній температурі.

Як видно з цієї формули, існує взаємозв'язок між швидкістю росту пір і вологістю матеріалу, що підтверджується експериментальними даними [114].

Загальна швидкість утворення кінцевої структури теплоізоляційного матеріалу при дифузійному генезису пороутворення у сировинній суміші, можна отримати інтегруванням рівняння швидкості утворення пір задовольняючи умову  $n = 0$  при  $\tau = 0$  [113]

$$W_n = \frac{\gamma f w_0}{\varphi} (e^{\varphi \tau} - 1),$$

де  $\gamma$  – ціле число порядку одиниці, що вказує, скільки молекул кінцевого продукту утворюється в результаті вступу в реакцію одного активного центру.

Необхідно врахувати, що навіть при  $\frac{dn}{d\tau} \leq 0$  швидкість росту пір у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу може бути позитивною.

Значить, для першого етапу формування пористої структури сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу характерно що, загальна пористість сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу буде складатися з швидкості утворення пір  $W_n$  і швидкості їх зростання  $W_v$ .

Швидкість зростання пір в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу з визначення дорівнює

$$W_v = \frac{dV}{d\tau},$$

а отже можна записати

$$W_v = \frac{\partial L}{p_{\text{зов}} d\tau},$$

де  $\partial L$  – робота, що виконується газом у порі,

$p_{\text{зов}}$  – зовнішній тиск (при квазістатичному процесі дорівнює тиску в порі).

Вважаючи процес рівноважним, можна записати

$$W_v = \frac{1}{nkT} \cdot \left( \frac{TdS}{d\tau} - \frac{dU}{d\tau} \right),$$

де  $k$  – постійна Больцмана,

$n$  – концентрація молекул газу,

$S$  – ентропія.

$$W_v = \frac{1}{nkT} \cdot \left( \frac{dH}{d\tau} - \frac{dG}{d\tau} - \frac{dU}{d\tau} \right),$$

де  $H$  – ентальпія,  
 $G$  – енергія Гіббса.

Дане рівняння доводить, що швидкість збільшення об'єму в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу тим більш чим більша зміна ентальпії.

При ізотермічному процесі формування пористої структури можна записати

$$V(\tau) - V(\tau_0) = \frac{1}{nkT} \cdot (\Delta H - \Delta G) = \frac{\Delta S}{nk} = \frac{\Delta Q}{nkT}.$$

Дана формула дозволяє за експериментальними значеннями зміни об'єму і при знанні концентрації газу в порі визначити зміну енергії Гіббса, а отже і визначити хід протікання реакції всередині пори (якщо така існує), або, при знанні теплового потоку і різниці обсягів, визначити концентрацію молекул в порі і відстежити їх зміну з плином часу. Знаючи зміну концентрації молекул усередині пори, можна змодельовати механізм росту пори.

Позначимо максимальну температуру нагрівання суміші  $T_b$ , а початкову температуру  $T_0$ . Диференціальне рівняння теплопровідності для сферичної гранули керамзиту, що спучується під час термообробки, буде виглядати наступним чином

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot C(\tau) \cdot \rho(\tau) = \lambda(\tau) \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - L \cdot I \cdot \frac{\partial T}{\partial r};$$

$$T \in [T_0, T_b]; T(r, 0) = T_0; \quad 0 \leq r \leq R; \quad \tau > 0.$$

Аналітичного розв'язку дана задача не має, поки не з'ясовані залежності теплофізичних властивостей матеріалу від часу. Якщо спростити завдання і прийняти сталість теплофізичних характеристик в часі, то диференційне

рівняння і його рішення при граничних умовах третього роду можна навести у вигляді [100,115]

$$\frac{\partial [rT(r,\tau)]}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 [rT(r,\tau)]}{\partial \tau^2} + \frac{\omega r}{c\gamma}, \quad (\tau > 0; 0 < r < R);$$

$$T(r,0) = T_0;$$

$$\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial r} = 0, \quad T(0,\tau) \neq \infty;$$

$$-\frac{\partial T(R,\tau)}{\partial r} + H[T_c - T(R,\tau)] = 0.$$

Рішення існує при  $\omega = \omega_0 e^{-kt}$ . Приймаючи аналогічний метод розрахунку, рішення отримаємо у наступному вигляді

$$\theta = 1 - \frac{P_0}{P_d} \left[ 1 - \frac{RB_i \sin \sqrt{P_d} \frac{r}{R}}{r \left[ (B_i - 1) \sin \sqrt{P_d} + \sqrt{P_d} \cos \sqrt{P_d} \right]} \right] \exp(-P_d F_0) -$$

$$- \sum_{n=1}^{\infty} \left( 1 - \frac{P_0}{P_d - \mu_n^2} \right) A_n \frac{R \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \mu_n} \exp(-\mu_n^2 F_0),$$

де  $P_d$  – критерій Предводителева, який у даному випадку дорівнює  $P_d = \frac{k}{a} R^2$ ;

$P_0$  – критерій Померанцева,  $P_0 = \frac{\omega_0 R^2}{\lambda(T_c - T_0)}$ ;

$A_n$  – початкова теплова амплітуда, яка дорівнює

$$A_n = \left\{ \left( 1 + \frac{B_{i_1}}{B_{i_2}} \right) \frac{\sin \mu_n \cos \mu_n + \mu_n}{2 \sin \mu_n} + \frac{B_{i_2}}{\mu_n} \sin \mu_n \right\}^{-1},$$

$\mu_n$  – корені характеристичного рівняння.

Для визначення зміни поля температури по сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу під час формування його структури необхідно знайти емпіричні залежності зміни теплофізичних характеристик матеріалу по часу.

Для визначення особливостей процесу протікання теплової енергії крізь пористі структури теплоізоляційного матеріалу та конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання з врахуванням конвективної складової всередині пір необхідно використовувати нові не класичні підходи та комп'ютерне моделювання конвективних потоків всередині пір.

## **2. 3 Висновки до розділу**

1. Для відокремлення пористої структури по технологічним ознакам їх створення та тепломасообміним процесам що протікають у даних структурах запропонована нова класифікація генезису пір у теплоізоляційних матеріалах та конструкціях теплового захисту енергетичного обладнання. Особливістю класифікації є відокремлення дифузійного генезису пористості та генезису деструкцією. До дифузійного генезису віднесено утворення пір за рахунок хімічних реакцій, ступеню насичення газами, пароутворення. До генезису деструкції пір віднесено утворення пір за рахунок термодеструкції, деформації та випромінювання.

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

### **3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОРИСТИХ СТРУКТУР ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Для емпіричного дослідження впливу пористої структури на теплофізичні характеристики теплоізоляційних матеріалів та конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання необхідно обрати такі дослідні зразки, які б охоплювали різні види генезису пороутворювання. Найпоширенішими теплоізоляційними матеріалами та елементами конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання є глиноземисті матеріали (вогнетриви та керамзит). В [116] авторами розглядається математична модель зростання парової бульбашки в необмеженому просторі. Теоретично, дану модель можна використовувати для розрахунку зміни об'єму пори на другому етапі формування пористої структури вогнетривів з вологої сировинної суміші.

Керамзитобетони з досить різною структурою пір можна отримати незначною варіацією складу суміші і температури термообробки [117]. А в роботі [118] керамзит піддавався впливу високої температури термообробки з використанням стандартної температурної кривої по ISO–834 та отримані суперечливі дані по кінцевій пористій структурі.

#### **3.1 Дослідження процесу пороутворення у матеріалів на основі глини (вогнетриви і керамзит)**

Для дослідження особливостей формування пористої структури вогнетривких матеріалів 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.

Розглянемо сировину – глину. З глини виготовляються теплоізоляційні матеріали для захисту елементів промислових енергетичних установок такі як вогнетривка цегла, вогнетривкі суміші та керамзит. Теплофізичні властивості цих матеріалів залежать від хімічного складу сировинної суміші, від фракції



дисперсних частинок суміші, від пористої кінцевої структури теплоізоляційного матеріалу та від параметрів термічної обробки сировинної суміші. Тому для проведення серії експериментів по дослідженню формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу та впливу сформованої структури на теплофізичні характеристики теплоізоляційного матеріалу з глинозему вибиралися глини різного родовища з вмістом діоксиду кремнію від 48 до 65%, оксиду алюмінію від 3 до 10%, оксиду заліза не більше 11%, оксиду кальцію не більше 15% (загалом одинадцять зразків). Для термообробки сировинної суміші використовувалася муфельна піч з термопарами ХК–0,1.

Для узагальнення результатів експерименту та знаходження особливостей формування пористої структури глиноземистих матеріалів використовувана глина була візуально класифікована по пластичності і результати зведені в таблицю 3.1. При цьому використовувалася наступна шкала:

0 – сухий порошок;

1 – непластична, під час малого навантаження розпадається на дрібні шматки;

2 – непластична, під час малого навантаження розпадається на великі шматки;

3 – непластична, руйнується тільки під час великого навантаження;

4 – пластична.

Дослідницькі зразки насичувались до максимальної вологості. Після цього частина кожного зразка висушувалася і непрямим прискореним методом (час сушки 10 хвилин, температура печі 130 °С) визначалася вологість зразків (табл. 3.2). За кольором отриманого матеріалу можна судити про хід протікань основних реакцій. Так, червоно–бурий колір матеріалу буде свідчити про окислювальні процеси, темно–сірий колір – про відновлюючі процеси.

Таблиця 3.1

## Характеристика використовуваної глини

№ зразка	Колір	Пластичність	Вміст оксиду заліза та оксиду кальцію, % мас.
1	жовтий	3	3
2	темно – сірий	2	9
3	гірчичний	4	12
4	гірчичний	3	11
5	сірий	3	19
6	сірий	3	24
7	сірий	3	29
8	сірий	3	31
9	гірчичний	4	8
10	темно – сірий	3	13
11	біла глина	0	відсутні

Зразки № 2, 3, 9, 11 відображені на рис.3.1, з якого видно, що випаровування вологи вже на початкових стадіях термообробки глиноземистих матеріалів впливає на формування пористої структури. Формування пір завдяки випаровуванню вологи найбільше проявилось у білій глині (без вмісту оксиду заліза і оксиду кальцію), так її загальна пористість після термообробки стала найбільшою, а пори мають сферичний характер. Наявність домішок зменшує загальну пористість глиноземистого матеріалу, оскільки збільшується в'язкість глини. Необхідно відзначити, що домішки також впливають на форму пір. Пори стають витягнуті перпендикулярно лініям дифузії вологи, поділяють матеріал на окремі пласти. Велика кількість домішок веде до утворення тріщин.

Таблиця 3.2

Визначення вологості сировинної суміші глиноземистих зразків

№ зразка	Маса до сушки	Маса після сушки	Маса поглиненої води	Вологість W, %
1	12,9	12	0,9	6,9767
2	17,7	16,9	0,8	4,5198
3	20,2	11,4	8,8	43,564
4	17,1	14,3	2,8	16,374
5	15	10,4	4,6	30,667
6	13,7	9,5	4,2	30,657
7	20,8	14,6	6,2	29,808
8	17,9	13,1	4,8	26,816
9	19,5	13,9	5,6	28,718
10	10,4	7,3	3,1	29,808
11	10,4	6,5	3,9	37,5

Це підтверджує гіпотезу висунуту у другому розділі про вплив деструкційного генезису пір з уточненням, що для глиноземистих матеріалів з домішками розвивається не тільки дифузійна пористість, а й деструкційна, обумовлена затвердінням і зменшенням об'єму рідкої фази укладеної з усіх боків матеріалу, що кристалізувався. Також домішки збільшують кінцеву міцність матеріалу.



(№2)



(№3)



(№9)



(№11)

Рисунок 3.1 – Фотографії зразків глиноземистого матеріалу після сушки

Принципову схему утворення пір в сферичній частинці вологій сировинній суміші глиноземистого матеріалу під час її термообробці можна представити в спосіб наведений на рис.3.2. На першому етапі термообробки на поверхні матеріалу відбувається випаровування вологи і утворюється поверхнева кірка. При цьому для глинозему характерне утворення пористої кірки, яка частково затримує пороутворюючі пари. Можна провести аналогію з вспінням піноскла, але для піноскла характерно, що кірка не пропускає газу [6]. Поверхнева кірка зазнає напруження на розтяг в процесі спучування. Напруження тим більше, чим щільніше кірка, тобто, чим більше вона перешкоджає виходу пороутворюючих газів. У сировинній суміші виникають центри пороутворення.

На наступному етапі термообробки сировинної суміші глинозему при початковому градієнті температур, в поверхневих шарах матеріалу починають утворюватися пори, а самі шари при цьому спучуються, впливаючи як на

поверхневу кірку, так і на внутрішні шари. Так внутрішні шари стискаються, збільшуючи свою щільність і вивільняючи частково капілярну вологу в зовнішні шари. Виникає псевдостійка зона Б, в якій напруги діють в різних напрямках і в якій відбувається більш рівномірне спучення матеріалу. Частина водяних парів із сухої зони А дифундують назад в зону Б. Також водяні пари, що утворилися в зоні В, також надходять в зону Б. Це приводить до різкого підвищення швидкості збільшення об'єму пір у зоні Б і, при певних умовах, з'являється розрив між зонами (тріщина, розшарування). При цьому в зоні А спостерігається нерівномірна пористість через нерівномірність виходу газів назовні і через дифундування частини газів в зону Б. У зоні В спостерігається збільшена щільність і малі за розміром пори. Це підтверджується і проведеними експериментами [119].

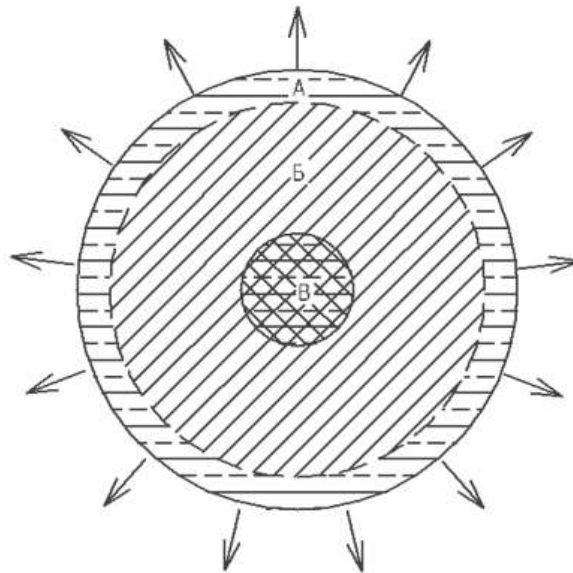


Рисунок 3.2 – Принципова схема утворення пір в сферичній частинці сировинній суміші глиноземистого матеріалу

Як слідує з принципової схеми утворення пір в сферичній частинці сировинній суміші глиноземистого матеріалу, для створення рівномірної пористості по теплоізоляційному матеріалу необхідно звести температурний

градієнт по сировинній суміші до мінімуму, а також необхідно дотримуватися однорідної в'язкості в сировинній суміші. Температурний градієнт по сировинній суміші зводиться до мінімуму або завдяки більш повільного розігріву печі з матеріалом або завдяки зменшенню теплового опору. Тепловий опір раціонально зменшувати шляхом зменшення товщини матеріалу (наприклад, під час спікання порошків). Також важливо мінімізувати локальні екзо– і ендотермічні реакції, які можуть викликати нерівномірність спучування.

Для визначення внутрішньоструктурних зрушень в сировинній суміші глиноземистих матеріалах під час її термообробці було проведено наступні експерименти. У зразки сировинної суміші з глини різного родовища розміщувались тонкі шматки мідного дроту в якості індикатору. Після чого зразки піддавалися термообробці при різній температурі. Схема зміни розташування шматків дроту в більшості зразках після спучування сировинної суміші показано на рисунку 3.3.

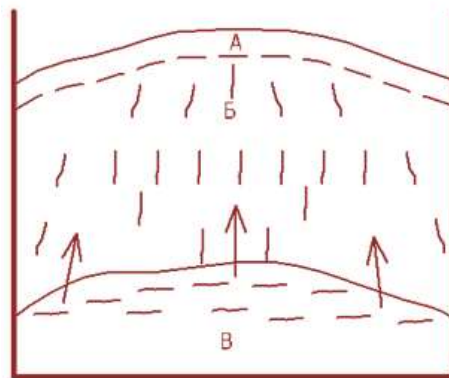


Рисунок 3.3 – Схема зміни розташування індикаторів у сировинній суміші теплоізоляційного глиноземистого матеріалу під час її термообробці

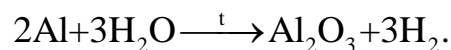
Як слідує з проведеного експерименту, спучування однорідної сировинної суміші теплоізоляційного глиноземистого матеріалу, що знаходиться в обмеженому просторі, в будь-якій точці повинно бути приблизно рівним і спрямованим до центру неізольованої поверхні. Також, даний експеримент показує наявність структурних внутрішніх зрушень у сировинній

суміші теплоізоляційного глиноземистого матеріалу під час його термообробці (оскільки індикаторні дроти зробили поступально–обертальний рух). При цьому варто відзначити, що розташування індикаторних дротів не вплинуло на форму пір теплоізоляційного матеріалу, що свідчить про неможливість впливати на формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу завдяки сторонніх включень, які не вступають до хімічної реакції з сировинною сумішшю [120].

Для визначення впливу пороутворюючих газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , а також можливих  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ) на процес формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу з силікатів глинозему, наявні одинадцять зразків піддавалися термічній обробці за температури  $750\text{ }^\circ\text{C}$  протягом 8 хвилин. Даної температури досить для виділення газів агентів-пороутворювачів, але при цьому вона нижча за температуру формування муліту та шамоту. Після термообробки в усіх зразках спостерігались наступні зміни: пори – за розміром більші ніж в попередньому експерименті (рис.3.1), але не сферичні; іноді виникає велика пора всередині матеріалу; матеріал стає міцнішим, що пов'язано з утворенням каоліту; виникають більш виразні тріщини; матеріал з чистої глини і досі крихкий, але пори більш нерівномірні і різні за розміром.

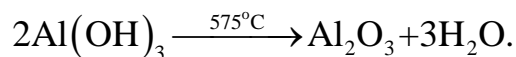
3.1.1 Дослідження вмісту алюмінію у сировинній суміші на формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему

У вологій сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему алюміній вступає у взаємозв'язок з водою

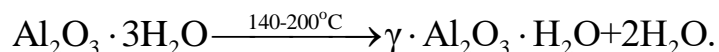


Збільшення окису алюмінію у сировинній суміші призведе до зміни структури і теплофізичних властивостей кінцевого теплоізоляційного матеріалу, так як оксид алюмінію при невеликих температурах добре реагує з лугами, після чого утворюються алюмінати, які нестійкі і навіть під час

слабкого підкислення руйнуються з утворенням амфотерного гідроксиду  $Al(OH)_3$ . Амфотерний гідроксид не розчиняється у воді та реагує з кислотами та лугами, також розпадається за температур вище за  $575\text{ }^\circ\text{C}$  на оксид алюмінію і воду



Найбільш ефективним керуванням для процесу формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу з глинозему при невисоких температурах термообробки є процес переходу гідраргіліта в беміт за наступною реакцією [121]



При даній реакції звільняється значна кількість води, яка в подальшому перетворюється у пару та сприяє додатковому збільшенню об'єму пір.

Для дослідження вмісту алюмінію у сировинній суміші на спучування силікатів глинозему до існуючих одинадцяті зразків сировинної суміші різного родовища додавалася різна кількість алюмінію, після чого суміш робили гомогенною. Температура термообробки дорівнювала  $750\text{ }^\circ\text{C}$ , час – 8 хвилин. Отримані експериментальні дані занесені в табл. 3.5 і табл. 3.6. Вологість і вихід летючих газів сировинної суміші визначався за непрямим прискореним методом.

Результати експерименту відображені на рис. 3.4. Сітка нанесена для підрахунку кількості пір та їх площі перетину. Ціна поділки - 1мм.

Спучені зразки мали наступні характеристики:

- зразок №1 з  $Al_2O_3$  – колір посередині – піщаний, колір кірки – жовтий з оранжевим відтінком, ближче до центру спостерігається



поділ на пласти (витагнуті клиноподібні пори), твердіша, ніж без добавки алюмінію;

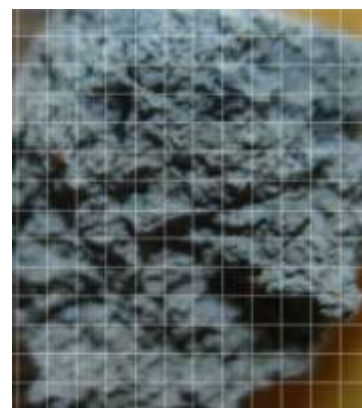
- зразок №2 з  $Al_2O_3$  – колір – чорний, спостерігаються невеликі пори і тріщини, пір зовсім небагато більше, ніж під час пароутворення вологою, більш міцний; спостерігаються частинки алюмінію, які не реагували з кремнеземом;
- зразок №3 з  $Al_2O_3$  – колір – піщаний, більш явно видно пори, є невеликі тріщини, добре простежується внутрішній шар з малою пористістю;
- зразок №4 з  $Al_2O_3$  – колір – градієнт від сірого до жовто-помаранчевого, чітко видно пори різних розмірів, більш міцний;
- зразок №5 з  $Al_2O_3$  – колір з зовнішньої зони – помаранчевий відтінок, що свідчить про окислювальні процеси; колір всередині – сірий, що свідчить про відновлюючі процеси; спостерігається дрібна пористість і поділ на пласти, місцями присутні великі пори;
- зразок №6 з  $Al_2O_3$  – колір – чорний, спостерігаються невеликі пори і тріщини, міцніший, спостерігаються частинки алюмінію, які не реагували з кремнеземом;



(№1)



(№2)



(№3)



(№4)



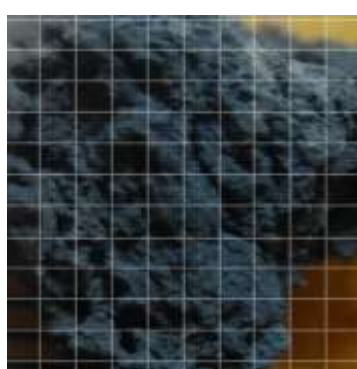
(№5)



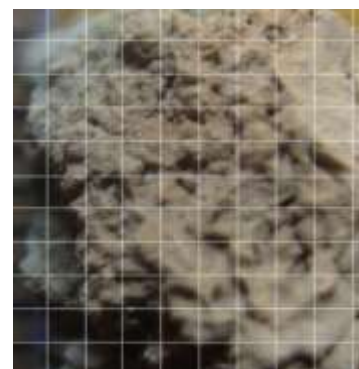
(№6)



(№7)



(№8)



(№9)



(№10)



(№11)

Рисунок 3.4 – Спучені зразки глини з добавкою оксиду алюмінію.

- зразок №7 з  $Al_2O_3$  – колір з зовнішньої зони – темно жовтий, колір всередині – чорний, чітко спостерігається поділ на пласти, в поверхневому шарі спостерігаються невеликі сферичні пори, спостерігаються частинки алюмінію, які не реагували з кремнеземом;
- зразок №8 з  $Al_2O_3$  – колір з зовнішньої зони – сірий, що свідчить про відновлюючі процеси в зовнішньому шарі суміші; колір всередині – чорний, чітко спостерігаються поділ на пласти, в поверхневому шарі спостерігаються невеликі сферичні пори, спостерігаються частинки алюмінію, які не реагували з кремнеземом;
- зразок №9 з  $Al_2O_3$  – колір – жовто-оранжевий з невеликою ділянкою сірого всередині зразка, добре спостерігаються пори і невеликі тріщини;
- зразок №10 з  $Al_2O_3$  – колір з зовнішньої зони – сірий, що свідчить про відновлюючі процеси; спостерігаються невеликі сферичні пори, але переважають вермикулітні пори, спостерігаються частинки алюмінію, які не реагували з глиноземом;
- зразок №11 з  $Al_2O_3$  – з'явився місцями відтінок сірого кольору, що свідчить про відновлюючі процеси; пори збільшилися; з'явилася виражена канална пористість, що виникла завдяки поєднанню пір.

Після проведених експериментів можна зробити висновок, що на глини з великою кількістю оксиду заліза та оксиду кальцію (зразки №2,6,7) добавки оксиду алюмінію не впливають на спучування, тому для покращення теплофізичних характеристик таких матеріалів, згідно з дослідженнями Кошлак Г.В. [4] пропонується додавати NaCl. В глинах з малою кількістю заліза та оксиду кальцію (зразки №1,3-5,8-10) – добавки оксиду алюмінію збільшують характеристики міцності і незначно збільшують пористість; у білих глин без домішок (зразок 11) - невеликі добавки оксиду алюмінію значно збільшують загальну пористість кінцевого матеріалу. Результати експериментів занесені в табл. 3.3 і 3.4.

Таблиця 3.3

Вологість і кількість летючих газів в досліджуваних зразках

№ зразка	Вологість W, %	Маса чистого зразка до сушки, г	Маса з Al до сушки, г	Маса з Al після сушки, г	Маса Al, г	Al, %	(Vro <sub>2</sub> + W), %	Vro <sub>2</sub> , %
1	6,9767	6,1	6,3	4,1	0,2	3,1746	34,921	27,944
2	4,5198	3,5	3,7	2,5	0,2	5,4054	32,432	27,913
3	43,564	5,1	5,2	2,7	0,1	1,9231	40,077	12,513
4	16,374	6,3	6,5	4,6	0,2	3,0769	29,231	12,857
5	30,667	7,3	7,4	4,7	0,1	1,3514	36,486	5,8198
6	30,657	6,8	6,9	4,5	0,1	1,4493	34,783	4,1257
7	29,808	9,8	9,9	6,6	0,1	1,0101	33,333	3,5256
8	26,816	7,6	7,7	5	0,1	1,2987	35,065	8,2493
9	28,718	5,6	5,8	3,6	0,2	3,4483	37,931	9,2131
10	29,808	6,7	6,8	4,3	0,1	1,4706	36,765	6,957
11	37,5	7	7,2	3,4	0,2	2,7778	52,778	15,278

Вихід летючих газів максимальний у зразків 1 та 2 з домішуванням алюмінію, що підтверджує інтенсивне протікання реакцій з утворенням газів агентів-пороутворювачів. При цьому мінімальна кількість летючих газів у зразків 5, 6, 7. У чистій глині незначні домішки алюмінію значно інтенсифікують процес пороутворення. В цілому, у всіх зразках домішки алюмінію не впливали на форму пір [122].

Таблиця 3.4

Експериментальні данні по вологостійкості та морозостійкості зразків

№ зразка	Кількість пір на 20 мм <sup>2</sup>						Гранична кількість циклів намокання – сушіння	Гранична кількість циклів заморожування - відтавання
	вермикулітні			сферичні				
	<1мм	1-3мм	>3мм	<1мм	1-3мм	>3мм		
1	7	1	0	11	0	1	15	17
2	6	1	1	0	0	0	7	9
3	10	1	1	10	1	0	10	11
4	4	0	0	25	3	0	8	9
5	5	1	0	7	1	0	15	13
6	12	1	1	21	0	0	9	8
7	5	4	1	1	0	0	15	14
8	13	3	1	6	0	0	12	13
9	6	1	0	8	2	0	12	13
10	4	2	0	7	0	0	11	11
11	0	0	0	28	4	1	5	3

Зменшення розміру пір до 1 мм або їх об'єднання у велику пору збільшує граничну кількість циклів заморожування – відтавання теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему. Рівняння, що були представлені у другому розділі верифіковані з результатами проведеного експерименту.

3.1.2 Дослідження впливу збільшення локальної вологості в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу з глинозему на формування його пористої структури

Для дослідження впливу збільшення локальної вологості в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу з глинозему на формування його пористої структури були використані глини різних родовищ. Дослідницькі зразки з глин

насичувались до 3 %, 13 % і 28 % зовнішньої вологості, після чого у досліджувані зразки містилися волоконні структури, насичені вмістом води 60%. У муфельній печі проводилася термообробка дослідницьких зразків під час різних режимів. Експеримент показав, що як під час низькотемпературного режиму термообробки (температурі 130 °С і часу 8 хвилин), так і під час середньотемпературного режиму (температурі 750 °С і часу 8 хвилин) локальне збільшення вологості не веде до локальної зміни пористості у теплоізоляційному матеріалі з глинозему. Це пов'язано з високою швидкістю дифузії води всередині глиноземних матеріалів під час їх термічної обробки. На рис.3.5 наведено фотографії зразків глинозему після термообробки, в яких знаходилося капілярно-пористе тіло з водою.




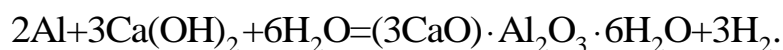
№ зразка	% вологи	Фото зразка
1	3	
2	13	
3	28	

Рисунок 3.5 – Фотографії зразків глинозему з локальним збільшенням вологості після процесу термообробки

### 3.2 Регулювання процесу пороутворення в матеріалах на основі екзотермічної реакції

Найбільш поширеними матеріалами на основі екзотермічних реакцій є газобетони. При цьому основною реакцією основи газобетону є



Головною особливістю формування пористої структури в таких матеріалах на відміну від глиноземів є умова підтримки необхідного температурного рівня.

Експериментальні значення зміни температур сировинної суміші на поверхні та в центрі зразка наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Зміна температури в центрі і на поверхні суміші  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot6\text{H}_2\text{O}$

$\tau$ , с	$t_{\text{ц}}$ , °C	$t_{\text{зовн}}$ , °C	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>
1	2	3	4
60	15,0	15,0	0,00
120	15,5	15,1	3,60
180	16,4	15,5	11,40
240	18,2	17	25,60
300	20,6	19,2	44,80
360	23,4	21,4	67,40
420	25,5	24,4	83,80
480	26,7	25,5	93,60
540	28,4	27,9	106,80
600	28,1	28	105,00
660	28,4	28,3	107,40
720	28,1	28	104,40
780	27,5	27,5	100,00
840	27,3	25,6	98,00
900	25,4	24,2	83,20
960	24,3	22,8	74,40
1020	22,2	21,2	57,80
1080	21	20,1	47,80

продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
1140	19,5	19,1	35,80
1200	18,9	18,7	31,40
1260	18,5	18,1	27,60
1320	17,5	17,2	19,80
1380	16,9	16,5	15,40
1440	16,1	15,8	8,40
1500	15,3	15,1	2,20
1560	15,0	15,0	0,00

За результатами експерименту побудовані графічні залежності рис.3.6 і рис.3.7. З процесу загасання екзотермічних реакцій видно, що основний склад суміші прореагував до 10 хвилини. Примусове перемішування проводилося в перші 20 секунд експерименту. Максимальне тепловиділення склало  $107 \text{ Вт} / \text{м}^2$ . Незначні ступені у частині кривої, в якій відбувається зниження функції (рис.3.6 і рис 2.7) свідчать про відновлення екзотермічної реакції, що було викликано недостатнім перемішуванням вихідних компонентів сировинної суміші.

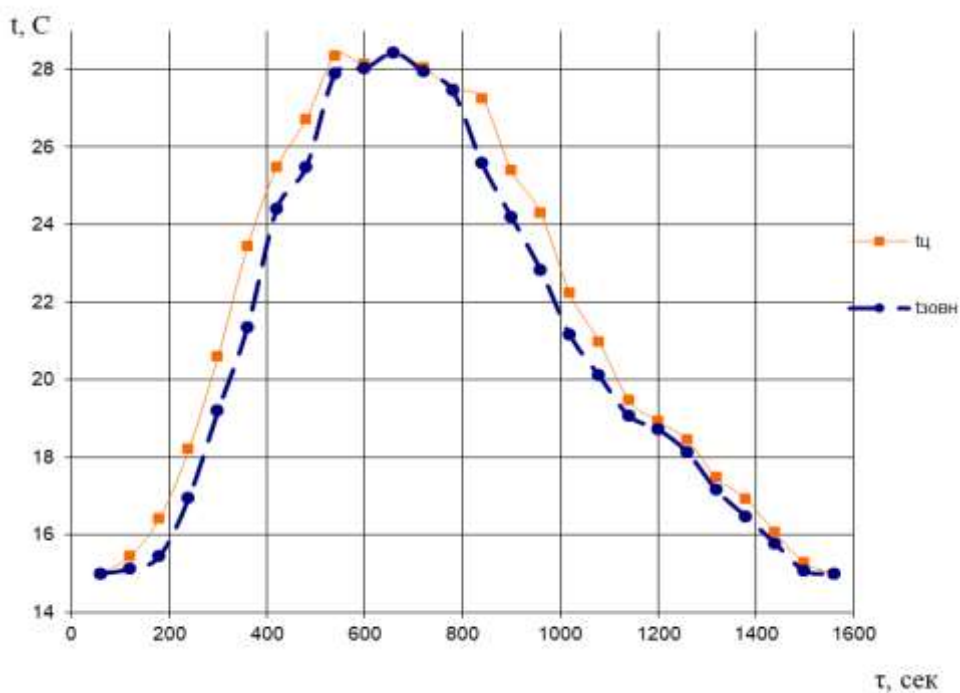


Рисунок 3.6 – Зміна зовнішньої ( $t_{зовн}$ ) і внутрішньої ( $t_{ц}$ ) температури суміші в часі



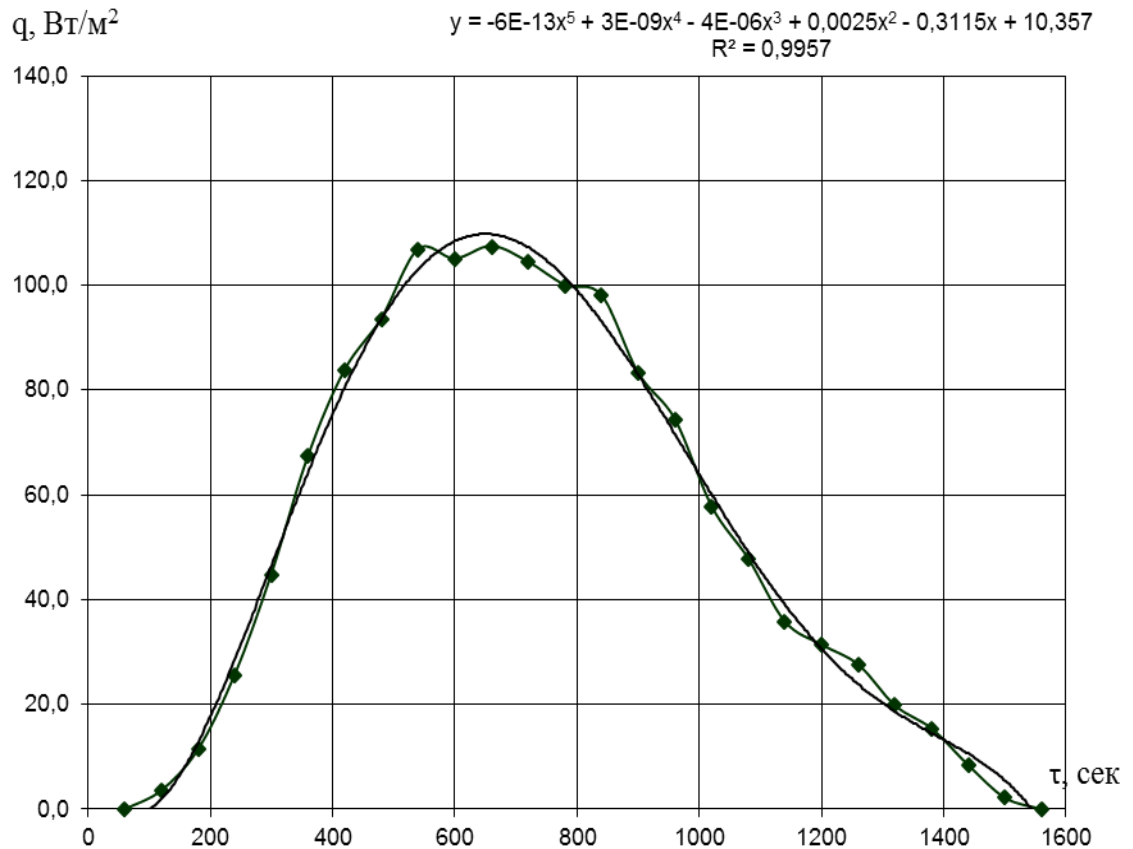


Рисунок 3.7 – Зміна питомого тепловиділення суміші в часі

Застосування рівняння яке отримано апроксимацією, дозволяє спрогнозувати тепловиділення суміші, що спучується, і тим самим розробити технологію для вирівнювання температурного градієнта по ширині зразка.

### 3.3 Емпіричні визначення швидкості пороутворення і швидкості збільшення об'єму пір

До теперішнього часу в літературі були відсутні дані про швидкість пороутворення і про енергію, що витрачається на формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему. Відсутність цих даних не дозволяла знайти оптимальний час і температуру термообробки вологої сировинної суміші глинозему для створення теплоізоляційного матеріалу з мінімальним коефіцієнтом теплопровідності.

Для визначення швидкості пороутворення і швидкості збільшення об'єму пір у сировинній суміші пористого теплоізоляційного матеріалу необхідно підтвердити висунуту у другому розділі гіпотезу про поетапну зміну кількості пір та об'єму пір у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу під час формування його структури та визначити рівняння швидкості пороутворення і кількості пір у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу для другого та третього етапу формування пористої структури. Також необхідно знайти енергію активації, що входить до рівнянь швидкості пороутворення і кількості пір на першому етапі, для глиноземів заданого хімічного складу.

Для підтвердження висунутої гіпотези проводився наступний експеримент. У пронумеровану суху керамічну тару насипали вологу сировинну суміш, після чого суміш проходила термообробку в муфельній печі під час різних температурних режимах для виявлення енергії активації пороутворення завдяки газам, які утворилися. Для ефективного пороутворення під час формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу з глинозему при невисоких температурах термообробки обрано процес переходу гідраргіліта в беміт та пороутворення тільки завдяки утворення водяної пари, тому температури термообробки обрано 200 °С і 120 °С. Для дослідницьких зразків була обрана глина з Черкаського родовища. Для створення вогнетривкої основи пористого теплоізоляційного матеріалу сировинна суміш першого зразка складалася з суміші глини з шамотом, а другого – глина, шамот і пластифікатор. Основи сировинної суміші насичувались вологою приблизно до 30 % та отримані зразки сировинної суміші для вогнетривкого теплоізоляційного матеріалу.

Для визначення початкової пористості та об'єму теплоізоляційного матеріалу частина дослідницьких зразків піддавалися сушінню при кімнатній температурі (без термічної обробки) і їх пористість і об'єм пір приймалися за початкові. Також по частині зразків відбиралося з печі через 3, 5, 10, 15 і 20 хвилин після початку термообробки. Константа швидкості пороутворення і константа зростання пористості знаходилась для кожного моменту часу, а після

знаходились їх середнє значення. Кількість пір рахувалось на площі 9 мм<sup>2</sup>, як найбільш зручна для використаного обладнання. У таблицях 3.11 і 3.12 представлені результати експерименту. Кількість вологи, що випарувалася визначалося непрямим методом.

Таблиця 3.11

Кількість пір і пористість зразка №1 в залежності від часу термообробки

τ, хв	t, °C					
	120			200		
	n, pc	P/P <sub>0</sub> , %	W <sub>ev</sub> , %	n, pc	P/P <sub>0</sub> , %	W <sub>ev</sub> , %
3	13	1,05	6,98	23	1,1	20,59
5	9	1,08	15,24	21	1,12	26,72
10	8	1,01	27,73	18	1,13	27,11
15	7	1,011	30,01	10	1,15	30,01
20	5	1,01	30,01	9	1,17	30,01

Таблиця 3.12

Кількість пір і пористість зразка №2 в залежності від часу термообробки

τ, хв	t, °C					
	120			200		
	n, pc	P/P <sub>0</sub> , %	W <sub>ev</sub> , %	n, pc	P/P <sub>0</sub> , %	W <sub>ev</sub> , %
3	8	1,01	5,23	10	1,7	18,02
5	8	1,4	12,36	9	1,95	27,12
10	7	1,5	22,63	6	2,2	28,41
15	5	1,6	27,6	4	2,1	29,27
20	5	1,58	29,25	4	1,5	29,27

На рис. 3.8 відображено залежності вологості двох досліджуваних зразків від часу термічної обробки (під час температур термообробки 200 °C і 100 °C). За нульову вологість прийнято повітряно–сухий стан суміші. За отриманими залежностями видно, що крива зміни вологості в зразках під час пороутворення відповідає стандартній кривій зміни вологості під час сушіння, та теж може бути поділена на три етапи. При цьому перша ділянка кривої – ділянка

постійної вологості, є не вираженою для температур 200 °С та вище, що пояснюється високими температурами порівняно з температурами сушарки.

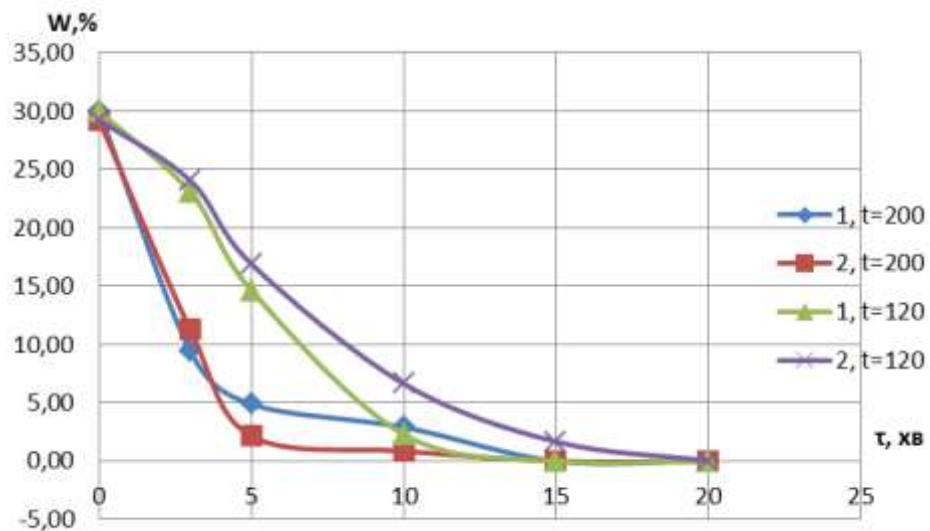


Рисунок 3.8 – Зміна вологи в досліджуваних зразках вогнетривів 1 і 2 під час термообробки

Оскільки вид залежності зміни вологості під час спучення збігається зі зміною вологості під час сушіння, то було б доцільно проаналізувати криву швидкості зміни вологості сировинної суміші під час її термообробці. На рисунку 3.9 відображено швидкість зміни вологості досліджуваних зразків вогнетривких теплоізоляційних матеріалів за температур 120 °С і 200 °С. Через великий проміжок по часу складно точно виділити окремі періоди швидкості сушіння, але за температури 120 °С можна умовно виділити період зростаючої, постійної і спадної швидкості видалення вологи, а під час термообробки 200 °С відбувається занадто різке зростання швидкості видалення вологи. Рис. 3.9 дає нам уявлення про зміну швидкості видалення вологи і як слідство (з урахуванням часу запізнювання) про пароутворення в матеріалі. Рационально провести порівняння даної залежності з характером зміни пористості.

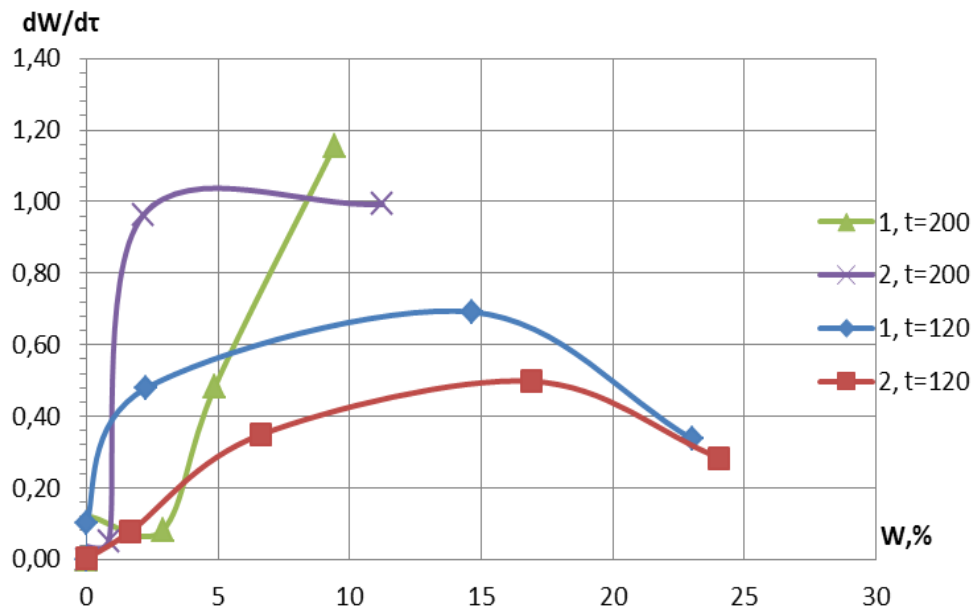


Рисунок 3.9 – Швидкість сушіння зразків 1 і 2 при різних температурах

На рис. 3.10 представлена зміна кількості пір в зразках сировинної суміші вогнетривкого теплоізоляційного матеріалу у часі під час їх термообробці. Кількість пір визначалася фотографуванням перетину зразка з подальшим нанесенням сітки і збільшенням обраних фрагментів. Кількість пір рахувалась на січній площині  $9 \text{ мм}^2$  і переводилось на площу  $1 \text{ м}^2$  для дотримання розмірностей по СІ. Враховувалися пори тільки з найбільшим геометричним розміром більше  $0,1 \text{ мм}$ , так як менші пори не впливають на визначені особливості протікання енергії крізь них. Вид отриманих кривих подібний виду кривих зміни вологості матеріалу [123]. З рис. 3.11 видно, що температура неоднозначно впливає на кількість пір. У зразку №1 кількість пір збільшилася практично в 2,5 рази, а в більш пластичному зразку №2 – не суттєво, з подальшим зниженням.

За рисунком 3.11 також можна сказати, що кількість пір на одиницю площі зменшується, що викликано зростанням самих пір.

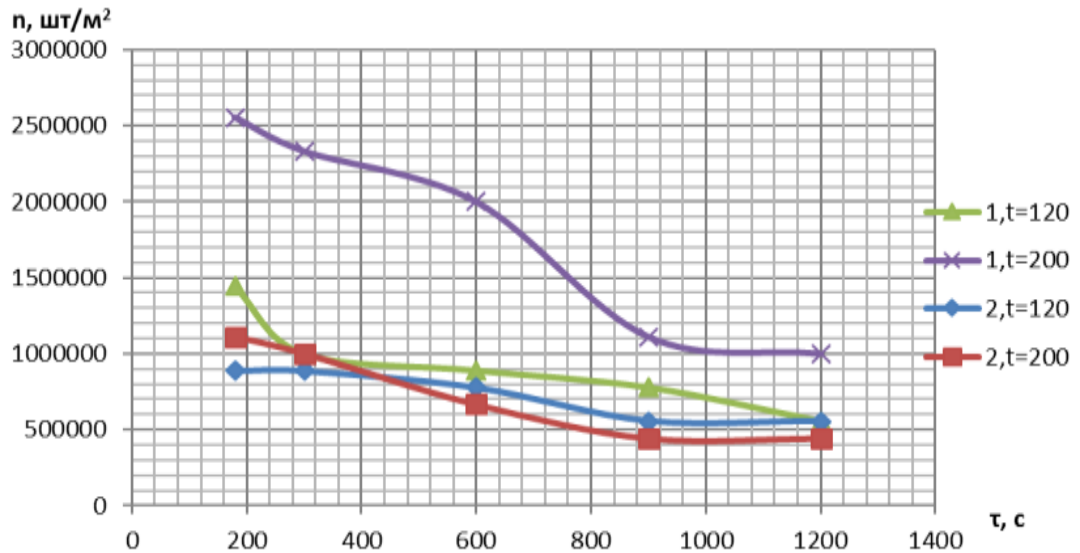


Рисунок 3.11 – Зміна кількості пір в досліджуваних зразках у часі

На рис. 3.11 можна виділити три періоди зменшення кількості пір, що підтверджує висунуту гіпотезу про поетапну зміну кількості пір та об'єму пір у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу під час формування його структури. 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 пір. Це підтверджує висунуту додаткову гіпотезу та робить її теоремою.

Аналізуючи рис.3.11 можна зробити висновок, що період виникнення пір значно залежить від самого матеріалу. У більш пластичного зразка №2 це етап незначного утворення кількості пір. У зразку №1 це етап суттєвого утворення кількості пір. Далі – рівномірне зменшення кількості пір в матеріалі. З підвищенням температури дана залежність стає більш крута, тобто зменшення кількості пір відбувається більш інтенсивно завдяки більш інтенсивного збільшення об'єму пір. Зміни об'єму пір вогнетривкого теплоізоляційного матеріалу під час термообробки сировинної суміші можна спостерігати на рис. 3.12. На рис. 3.12 відображені залежності загальної пористості зразків у часі. Можна виділити істотне збільшення пористості в більш пластичному зразку, що узгоджується з раніше висловленою теорією спучення матеріалів.

Варто відзначити збільшення загальної пористості від температури термообробки в обох зразках вогнетривкого теплоізоляційного матеріалу.

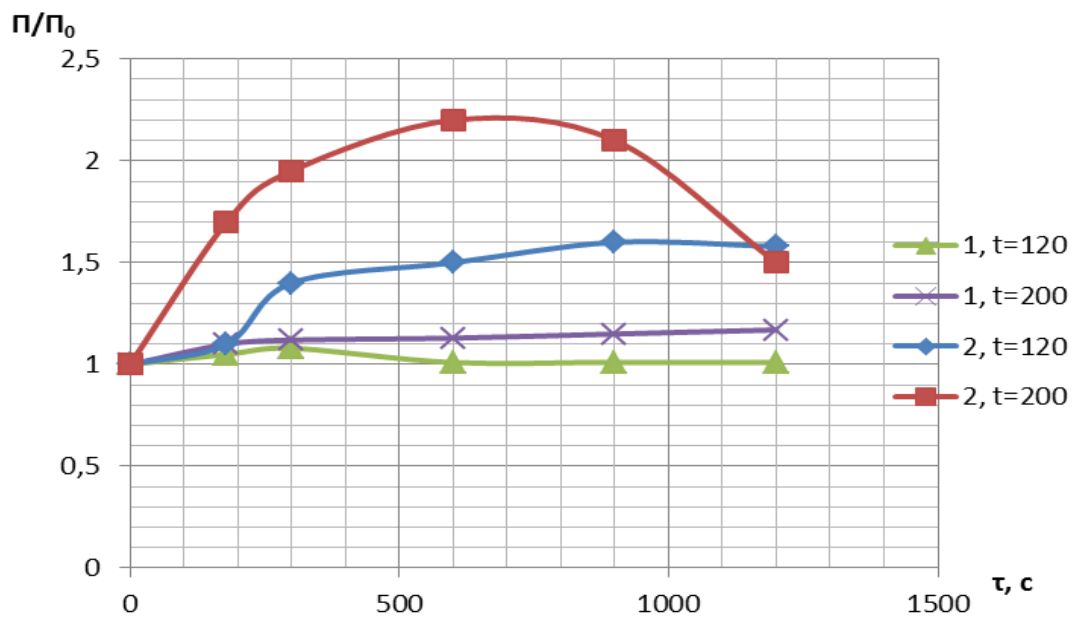


Рисунок 3.12 – Зміна загальної пористості в досліджуваних зразках вогнетривкого теплоізоляційного матеріалу від часу термообробки

На рис. 3.13 і рис. 3.14 відображені залежності швидкості пороутворення і швидкості зміни пористості зразків вогнетривкого теплоізоляційного матеріалу від часу термообробки. Для зручності візуалізації даних на рис.3.13 швидкість представлена з протилежним знаком. Швидкість пороутворення для першого зразка вогнетривкого теплоізоляційного матеріалу відрізняється від всіх інших. Це пов'язано зі швидкістю дифузії вологи і швидкістю утворення поверхневої кірки. Оскільки температура і пластичність матеріалу незначні, то водяні пари виходять з матеріалу раніше, ніж утворюють пори. Характер інших кривих підтверджує висловлене в попередньому розділі припущення, що швидкість пороутворення на початковому етапі збільшується, а після екстремуму – повільно згасає та стає постійною. При цьому швидкість збільшення загальної пористості сировинної суміші вогнетривких зразків постійно зменшується і є максимальною в наприкінці першого етапу – в момент перетворення рідини в

пар. Зразок №2 на рис. 3.14 має від'ємну швидкість росту пір – усадку, що викликано великою пластичністю і тривалою термообробкою.

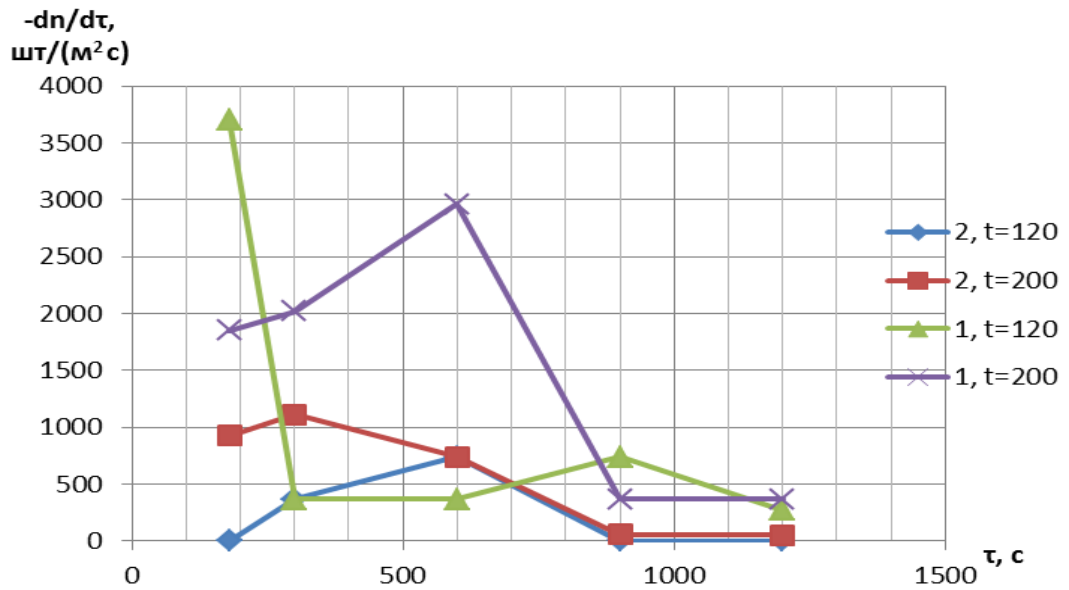


Рисунок 3.13 – Зміна швидкості пороутворення в досліджуваних зразках вогнетривкого теплоізоляційного матеріалу від часу термообробки

З аналізу рис. 3.14 можна сказати що другий та третій етап зміни пористості в досліджуваних зразках вогнетривкого теплоізоляційного матеріалу від часу термообробки відрізняються для низькотемпературних режимів, а для більш інтенсивного режиму термообробки з температурою 200 °С та вище завдяки додаткового виділення вологи під час перетворення гідраргеліту в беміт диференціал швидкості збільшення об'єму пір від часу можна прийняти постійним.



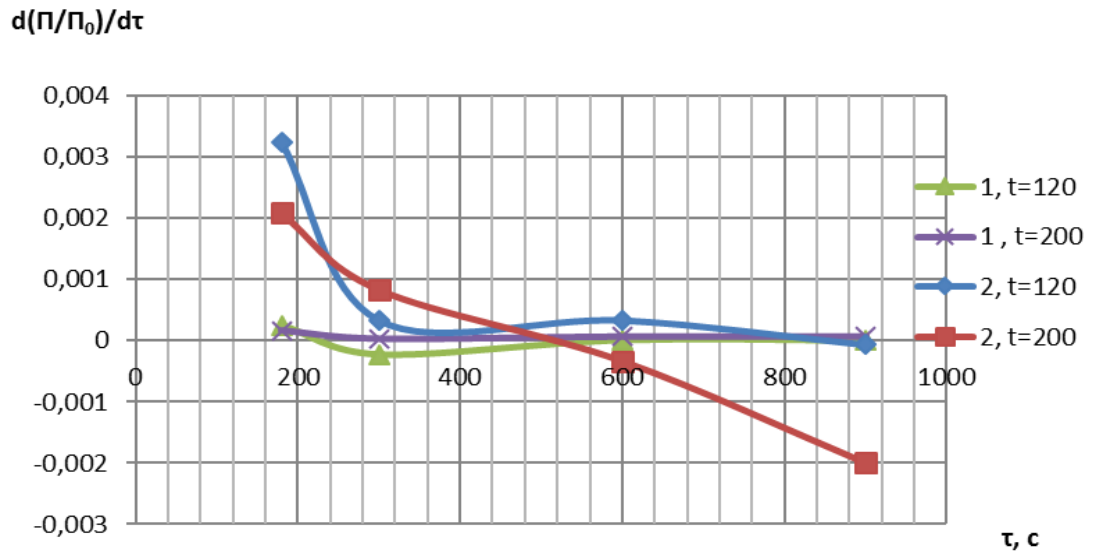


Рисунок 3.14 – Динаміка зміни пористості в досліджуваних зразках вогнетривкого теплоізоляційного матеріалу від часу термообробки

Проведені експерименти дозволяють визначити основні закономірності зміни кількості пір і пористості в теплоізоляційних глиноземистих матеріалах під час термообробки їх сировинної суміші. Завдяки отриманим даним можна прогнозувати комплексні показники підсумкової пористої структури теплоізоляційного матеріалу, що дозволить управляти його теплофізичними властивостями, змінюючи процес термообробки.

### 3.4 Висновки до розділу

Описана принципова схема пороутворення у сировинній суміші гранули керамзиту та визначено, що для створення рівномірної пористості необхідно звести температурний градієнт до мінімуму, а також необхідно дотримуватися однорідної в'язкості в матеріалі.

Доведено наявність внутрішніх структурних зрушень під час пороутворення, що свідчить про неможливість впливати на формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу завдяки сторонніх включень, які не вступають до хімічної реакції з сировинною сумішшю.

Оксид алюмінію в сировинній суміші глинозему зі значним вмістом оксиду заліза та оксиду кальцію практично не вступає в реакцію і не впливає на формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу. В глиноземах з невеликим вмістом оксиду заліза та оксиду кальцію – добавки оксиду алюмінію незначно збільшують характеристики міцності і пористість. Вміст заліза у суміші, яка спучується, необхідно звести до мінімуму.

У сировинній суміші глиноземистого матеріалу локальне збільшення вологості не викликає локального збільшення пористості.

Отримано рівняння зміни питомого тепловиділення основи газобетону в часі, що дозволяє спрогнозувати тепловиділення суміші, що спучується, і тим самим розробити технологію для вирівнювання температурного градієнта по ширині зразка.

Підтверджено висунуту додаткову гіпотезу про поетапну зміну кількості пір в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу. Умовно виділено три періоди зменшення кількості пір. 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 пір. Це підтверджує висунуту додаткову гіпотезу та робить її теоремою.

Визначено функціональний зв'язок технологічних параметрів і структурних характеристик пористого матеріалу (кількістю та розміром пір). Одержані результати використані для визначення основних закономірностей зміни кількості пір і пористості в глиноземистих матеріалах під час їх термообробки, що дозволяє прогнозувати характеристики підсумкової пористості матеріалу та управляти теплофізичними властивостями глиноземистого теплоізоляційного матеріалу змінюючи технологічні режими процесу термообробки та склад сировинної суміші.

## 4 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ФОРМУВАННЯ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ

Проведені дослідження щодо впливу тиску в порах на еластомери із закритою пористістю у [124] доводять зміну тиску в порах під час різних гідростатичних навантажень а також й те, що тиск у порах може суттєво змінити макроскопічну реакцію і стабільність еластичних пористих теплоізоляційних матеріалів та елементів теплового захисту енергетичного обладнання. Так само у статті доведено, що жорсткість пористих теплоізоляційних матеріалів збільшується під час збільшення абсолютного тиску в порах більше за атмосферний. Однак під час дослідження авторами не було запропоновано спосіб розрахунку тиску в закритих порах і за початковий тиск був прийнятий тиск навколишнього середовища. Також прийнято, що тиск в порах є функцією тільки щільності. Отже дані дослідження не дають змогу спрогнозувати тиск в порах у теплоізоляційних матеріалах з закритою пористістю (наприклад, у піносклі).

Зміна структури із закритою пористістю під впливом стиснення і розтягування при різних початкових тисках в порах вивчено у [125]. Результати експерименту показали, що надмірний тиск в порах теплоізоляційного матеріалу позитивно впливає під час стиснення і негативно під час розтягування. Вплив деформацій на структури із закритою пористістю може привести до високого внутрішнього тиску в порах, що веде до збільшення поглинання енергії і збільшення загальної жорсткості пористого матеріалу в процесі деформації. Але авторами не були розглянуті методи досягнення тих чи інших тисків в порах матеріалу і способи розрахунку тиску та температур газу у порах.

Мікромеханічний аналіз пористого матеріалу з наявністю внутрішнього тиску в порах, на прикладі полімеру VX-265 представлений у [126]. Авторами показано вплив початкового тиску пір на прогнозоване розтягування зразка, вплив прикладеного навантаження (з тиском в порах і без нього) на

прогнозований розрив зразка, але не приділена увага розрахунку термодинамічних параметрів газу в порах.

Для побудовання підсумкової моделі зміни пористої структури в сировинній суміші теплоізоляційних матеріалів під час підведення теплової енергії до неї наведемо математичний опис формування пористої структури. Метод виведення умов рівноваги пари у водному розчині аміаку [127] використаємо для знаходження умов рівноваги агента-пороутворювача в теплоізоляційному матеріалі та газу у закритих порах елементів теплового захисту енергетичного обладнання.

#### 4.1 Умови рівноваги агента-пороутворювача в матеріалі під час формування пористої структури

Енергія Гіббса ядра пори, що утворилося завдяки виникненню газової бульбашки радіуса  $r$

$$G^{(1)} = \varphi_{\infty}^{(1)} M^{(1)} + \sigma \Omega,$$

де  $M^{(1)}$  - маса газу-пороутворювача, рівна  $4\pi r^3 / v'$ ;

$\Omega$  - зовнішня поверхня ядра пори, рівна  $4\pi r^2$ ;

$\varphi_{\infty}^{(1)}$  - хімічний потенціал пороутворюючого газу (при нескінченно великому обсязі даного газу).

Енергія Гіббса системи, що складається з ядра пори в матеріалі і самого матеріалу

$$G = G^{(1)} + G^{(2)},$$

де  $G^{(2)}$  - енергія Гіббса матеріалу.

Розглянемо стан рівноваги цієї системи. Якщо зовнішній тиск  $p'$ , що збігається з тиском пороутворювача, і температура  $T'$ , при яких знаходиться система, постійні, то умова рівноваги  $dG = 0$  має вигляд

$$dU^{(1)} + dU^{(2)} - T'(dS^{(1)} + dS^{(2)}) + p'(dV^{(1)} + dV^{(2)}) + \varphi_{\infty}^{(1)} dM^{(1)} + \varphi^{(2)} dM^{(2)} = 0$$

де  $p'$ - зовнішній тиск (в даному випадку тиск матеріалу на агент-пороутворювач).

Беручи до уваги, що внаслідок сталості загальної маси системи

$$dM^{(2)} = -dM^{(1)},$$

з умови рівноваги отримаємо

$$\frac{2\sigma}{r} dV^{(1)} + (\varphi_{\infty}^{(1)} - \varphi^{(2)}) dM^{(1)} = 0.$$

Для сферичного агента-пороутворювача

$$dV^{(1)} = 4\pi r^2 dr;$$

$$dM^{(1)} = \frac{4\pi r^2}{v^{(1)}} dr.$$

Тому останнє співвідношення може бути записано у вигляді

$$\left( \varphi_{\infty}^{(1)} - \varphi^{(2)} + \frac{2\sigma v^{(1)}}{r} \right) dr = 0,$$

де  $v^{(1)}$  - питомий об'єм газу агента-пороутворювача.  
Так як  $dr \neq 0$

$$\varphi^{(2)} - \varphi_{\infty}^{(1)} = \frac{2\sigma v^{(1)}}{r}. \quad (4.1)$$

Візьмемо замість  $\varphi_{\infty}^{(1)}$  і  $\varphi^{(2)}$  дійсні значення хімічних потенціалів агента-пороутворювача і матеріалу при даній температурі і відповідних тисках, рівні  $\varphi^{(1)}(p^{(1)}, T)$  і  $\varphi^{(2)}(p^{(2)}, T)$ . За аналогією з бульбашкою газу в нескінченному об'ємі рідини (розкладаючи  $\varphi^{(1)}(p^{(1)}, T)$  в ряд за ступенями  $p^{(1)} - p^{(2)}$ , а  $\varphi^{(2)}(p^{(2)}, T)$  в ряд за ступенями  $p^{(2)} - p^{(1)}$  [128]) можна отримати

$$\varphi^{(1)}(p^{(1)}, T) = \varphi^{(2)}(p^{(2)}, T)$$

З отриманого рівняння слідує, що при відмінній від плоскої поверхні розділу хімічні потенціали газу агента-пороутворювача і сировинної суміші, віднесені до власного тиску і однакої температури, мають рівне значення. Таким чином, умови рівноваги агента-пороутворювача в сировинній суміші матеріалу під час формування пористої структури, з урахуванням поверхневого натягу, мають вигляд

$$\begin{cases} T^{(1)} = T^{(2)} \\ p^{(1)} - p^{(2)} = \frac{2\sigma}{r} \\ \varphi^{(1)}(p^{(1)}, T) = \varphi^{(2)}(p^{(2)}, T) \end{cases} \quad (4.2)$$

## **4.2 Тиск газу агента-пороутворювача всередині замкнutoї сферичної пори**

Взявши диференціал рівняння (4.1) по тиску  $p$  при  $T = \text{const}$  і враховуючи, що  $(\partial\varphi/\partial p)_T = v$ , отримаємо

$$\frac{1}{p^{(2)}} - v^{(1)} = -\frac{2v^{(1)}\sigma}{r^2} \left( \frac{\partial r}{\partial p} \right)_T + \frac{2\sigma}{r} \left( \frac{\partial v^{(1)}}{\partial p} \right)_T.$$

Оскільки  $\frac{1}{p^{(2)}}$  набагато менше  $v^{(1)}$ , а  $v^{(1)}$  при порівняно малих тисках газу можна прийняти рівним  $RT/p$  то

$$\frac{RT}{p^{(1)}} = \frac{2v^{(1)}\sigma}{r^2} \left( \frac{\partial r}{\partial p} \right)_T - \frac{2\sigma}{r} \left( \frac{\partial v^{(1)}}{\partial p} \right)_T.$$

Взявши інтеграл від цього рівняння по  $p > 0$ , отримаємо [129]

$$\int \frac{RT}{p^{(1)}} dp = \int \frac{2v^{(1)}\sigma}{r^2} \left( \frac{\partial r}{\partial p} \right)_T dp - \int \frac{2\sigma}{r} \left( \frac{\partial v^{(1)}}{\partial p} \right)_T dp.$$

$$RT \cdot [\ln(p^{(1)}) + c] = -2\sigma \frac{v^{(1)}}{r},$$

де  $c$ -константа інтегрування.

$$p^{(1)} = e^{-c} \cdot e^{-\frac{2\sigma v^{(1)}}{RT r}}.$$

Константу  $e^{-c}$  знайдемо з умови рівноваги, враховуючи, що при  $r \rightarrow \infty$ ,  $p = p_0$ , тобто тиск агента-пороутворювача дорівнює тиску газу при тих же фізичних умовах поза матеріалу

$$p^{(1)} = p_0 \cdot e^{-\frac{2\sigma v^{(1)}}{RT r}}, \quad (4.3)$$

де  $p_0$  - тиск газу за тих самих фізичних умов поза матеріалом.

З даного рівняння слідує, що в стані рівноваги тиск газу-пороутворювача всередині пори менше тиску даного газу поза матеріалу в  $e^{\frac{2\sigma v^{(1)}}{RT} - \frac{E_a}{RT}}$  разів.

Дане рівняння можна також записати у вигляді

$$p^{(1)} = p_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (4.4)$$

де  $E_a = 2\sigma \frac{v^{(1)}}{r}$  чи згідно (4.1)  $E_a = \varphi^{(2)} - \varphi_{\infty}^{(1)}$  - енергія активації, що дорівнює різниці хімічних потенціалів матеріалу і агента-пороутворювача.

З (4.4) слідує, що чим більша різниця хімічних потенціалів систем матеріал-пора, тим менше тиск буде у газу всередині пори. Оскільки конвективний перенос тепла в газі прямопропорційно залежить від тиску, то дане твердження можна перефразувати наступним чином: для досягнення мінімальної теплопередачі пори необхідно збільшувати різницю хімічних потенціалів систем матеріал-пора [130].

Також з (4.4) слідує, що під час підвищення температури, при якій відбувається хімічна реакція, тиск всередині пори прагне до тиску газу такого ж об'єму поза матеріалу. Це означає, що для зменшення теплопровідності пори доцільніше реакції, які відбуваються при низьких температурах [131].

### **4.3 Температура газу агента-пороутворювача всередині замкнутої сферичної пори**

З [128] відомо, що температура фазового переходу сферичної краплі в пар вища, ніж температура фазового переходу з поверхні. Це означає, що необхідно перегріти рідину всередині пори для того, щоб вона перетворилася на пару на температуру



$$\Delta T = \frac{2\sigma v'' T}{Lr}, \quad (4.5)$$

де  $v''$  - значення об'єму насиченої пари,

$L$  - теплота випаровування,

$\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягу за температури  $T_s$  (тобто до зміни кривизни поверхні).

Формула (4.5) відноситься до парової бульбашки, що знаходиться в рівновазі з навколишнім середовищем. Вона може бути застосована для визначення ступеня перегріву рідини, яка не містить розчинених в ній газів і киплячої рідини в умовах постійного тиску.

Виведемо температуру газу-пороутворювача, що знаходиться в рівновазі, через температуру матеріалу. Взяти диференціал рівняння рівності потенціалів (4.2) по  $T$  і враховуючи, що  $(\partial\phi/\partial p)_T = v$ ,  $(\partial\phi/\partial T)_P = -s$ , отримаємо

$$\left(\frac{\partial\phi^{(1)}}{\partial p}\right)_T \frac{dp}{dT} + \left(\frac{\partial\phi^{(1)}}{\partial T}\right)_P = \left(\frac{\partial\phi^{(2)}}{\partial p}\right)_T \frac{dp}{dT} + \left(\frac{\partial\phi^{(2)}}{\partial T}\right)_P,$$

$$\frac{dp}{dT} = \frac{s^{(2)} - s^{(1)}}{v^{(2)} - v^{(1)}}.$$

Чи

$$dT = \frac{1}{s^{(2)} - s^{(1)}} \left( \frac{1}{\rho^{(2)}} \cdot dp^{(2)} - v^{(1)} \cdot dp^{(1)} \right).$$

Враховуючи, що щільність матеріалу практично не залежить від тиску при невеликих тисках газу  $v = RT/p$ , отримаємо

$$T = \frac{1}{s^{(2)} - s^{(1)}} \left( \frac{p^{(2)}}{\rho^{(2)}} - RT \ln |p^{(1)}| \right) + const. \quad (4.6)$$

Продиференціювавши рівняння (4.1) по температурі  $T$  при  $P = const$  і враховуючи, що  $(\partial\varphi/\partial T)_P = -s$ , отримаємо

$$s^{(1)} - s^{(2)} = -\frac{2\sigma v^{(1)}}{r^2} \left( \frac{\partial r}{\partial T} \right)_P + \frac{2\sigma}{r} \left( \frac{\partial v^{(1)}}{\partial T} \right)_P.$$

Враховуючи, що радіус ядра пороутворювача і його об'єм в умовах рівноваги не залежить від температури і при постійному тиску можна прийняти

$$s^{(2)} - s^{(1)} = -\frac{2\sigma v^{(1)}}{rT}.$$

звідси

$$s^{(2)} - s^{(1)} = -\frac{2\sigma v}{rT}.$$

Підставивши даний вираз у (4.6) отримаємо

$$\frac{2\sigma v^{(1)}}{r} = RT \ln |p^{(1)}| - \frac{p^{(2)}}{\rho^{(2)}},$$

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

Підставивши крайові умови (при  $r \rightarrow \infty$ ) знайдемо температуру перегріву газу агента пороутворювача всередині пори

$$\Delta T = \frac{1}{R \ln |p^{(1)}|} \cdot \left( \frac{2\sigma v^{(1)}}{r} \right), \quad (4.7)$$

#### 4.4 Розміри ядер агента-пороутворювача всередині замкнутої сферичної пори

Якщо в матеріалі утвориться деяка кількість агента-пороутворювача, то енергія Гіббса всієї системи (суміші) змінюється на величину, що складається з двох членів, перший з яких дорівнює добутку різниці хімічних потенціалів нового і початкового газу на кількість агента-пороутворювача, що утворюється. Другий член рівняння обумовлений поверхневою енергією і дорівнює добутку поверхневого натягу на площу поверхні пори.

$$\Delta G = (\varphi^{(1)} - \varphi^{(pre)}) \cdot M^{(1)} + \sigma\Omega,$$

де  $M^{(1)}$  - маса агента-пороутворювача;

$\Omega$  - зовнішня поверхня пороутворювача;

$\varphi^{(1)}$  - хімічний потенціал пороутворюючого газу;

індекс (1) відноситься до газової пори;

індекс (*pre*) відноситься до агенту-пороутворювача.

Для сферичної частинки

$$\Delta M^{(1)} = \frac{4\pi}{3\nu'} r^3; \quad \Omega = 4\pi r^2.$$

Тому

$$\Delta G = \frac{4\pi}{3} (\varphi^{(1)} - \varphi^{(pre)}) \frac{r^3}{\nu^{(1)}} + 4\pi\sigma r^2. \quad (4.8)$$

Продиференціювавши рівняння зміни енергії Гіббса по радіусу і прирівняємо рівняння до нуля

$$\left(\varphi_{\infty}^{(1)} - \varphi_{\infty}^{(pre)}\right) \frac{\left(r_{kr}^{(1)}\right)^2}{v^{(1)}} + 2\sigma r_{kr}^{(1)} = 0.$$

В даному рівнянні прийняті значення хімічних потенціалів речовин поза порою для того, що б винести їх за знак диференціювання.

Значення  $r_{kr}^{(1)}$  буде дорівнювати

$$r_{kr}^{(1)} = \frac{2\sigma v^{(1)}}{\varphi_{\infty}^{(pre)} - \varphi_{\infty}^{(1)}}, \quad (4.9)$$

де  $\varphi_{\infty}^{(pre)}$  - хімічний потенціал вихідного матеріалу агента-пороутворювача;

$\varphi_{\infty}^{(1)}$  - хімічний потенціал агента-пороутворювача поза порою.

Якщо у вихідному матеріалі утворюється ядро пори радіусом  $r_{kr}^{(1)}$ , то він буде перебувати в рівновазі з оточуючим його матеріалом. Тиск газу агента-пороутворювача пори буде менше тиску того ж газу в навколишньому середовищі і менше тиску, що надається оточуючим матеріалом. Це означає, що стан рівноваги буде нетабульним. Без підведення зовнішньої енергії до пори або зменшення тензора напруги, ядро пори зникне - буде поглинене матеріалом.

При  $r^{(1)} > r_{kr}^{(1)}$ . можливі кілька варіантів розвитку.

Перша можливість, якщо  $\varphi^{(1)} - \varphi^{(pre)} < 0$  і  $r$  мало, то другий член у виразі (4.1) буде переважати. При подальшому і  $r$ ,  $\Delta G$  буде зростати, тобто виникнення ядра пори дуже малого розміру буде приводити до зростання енергій Гіббса. Зростання  $\Delta G$  триватиме доти, поки перший і другий члени в вираженні для  $\partial G / \partial r$  не зрівняються, тобто поки  $r$  не досягне такого значення  $r = r_{kr}^{(1)}$ , при якому енергія Гіббса досягає максимуму, а при  $r > r_{kr}^{(1)}$  убуває. Сказане схематично зображено на рис. 4.1.

Друга можливість - при  $\varphi^{(1)} - \varphi^{(pre)} > 0$ , тоді при будь-яких значеннях  $r$  енергія Гіббса зростає, і система прагне поглинути пору.

У будь-якому випадку, якщо початковий розмір виниклого ядра менш ніж  $r_{кр}^{(1)}$ , то дане ядро не може існувати протягом тривалого часу і буде швидко зменшуватися в своїх розмірах до повного зникнення.

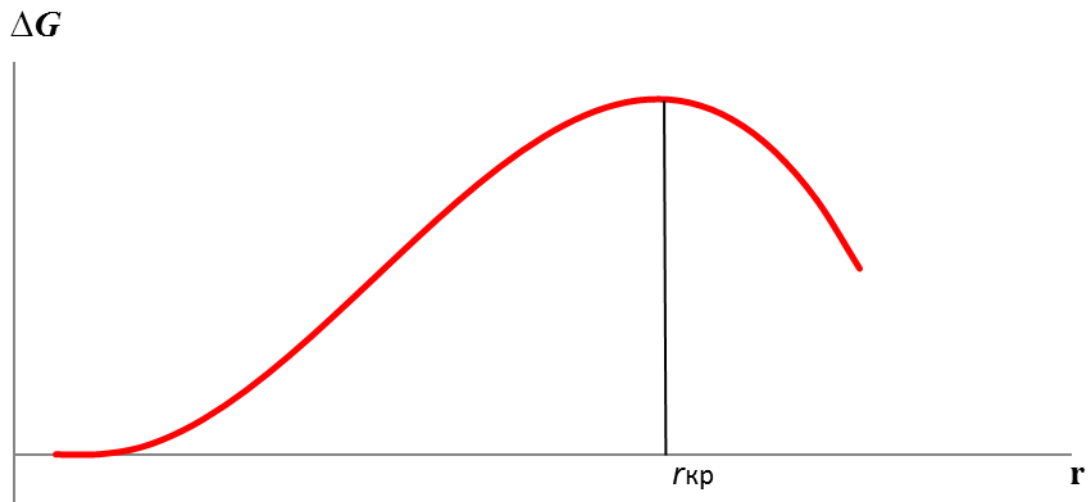


Рисунок 4.1 - Зміна енергії Гіббса від радіуса за  $\varphi^{(1)} - \varphi^{(pre)} < 0$  і малому  $r$

Для існування пори необхідно, щоб  $\varphi^{(1)} - \varphi^{(pre)} < 0$  і  $r^{(1)} > r_{кр}^{(1)}$ . 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 щільності). Також дані нерівності показують, що для виникнення пір унаслідок хімічної реакції необхідне зменшення хімічного потенціалу пороутворюваного газу.

#### 4.5 Робота утворення і час виникнення ядра пори

Робота оборотного утворення сферичного ядра пори  $l_{\min}$  в умовах  $T = const, V = const$

$$l_{min}^{(1)} = -\left(p^{(1)} - p\right) \frac{4}{3} \pi r^{(1)3} + 4\pi r^{(1)2} \sigma.$$

До утворення ядра об'єм вихідної фази дорівнював  $V + V^{(1)} \left( V^{(1)} = \frac{4}{3} \pi r^{(1)3} \right)$ , а тиск  $p$ ; після утворення ядра об'єм залишився той же, а тиск у тій області простору, де з'явилося ядро, став рівним  $p^{(1)}$ , тобто зменшився на  $p - p^{(1)}$ . Відповідно до цього була витрачена робота  $-\int V^{(1)} dp = -\left(p^{(1)} - p\right) \frac{4}{3} \pi r^{(1)3}$ , крім того, у вираз  $l_{min}^{(1)}$  увійшла поверхнева енергія  $4\pi r^{(1)2} \sigma$ ,

Оскільки

$$p^{(1)} - p = \frac{2\sigma}{r^{(1)}},$$

то вираження для  $l_{min}^{(1)}$  наводиться до вигляду

$$l_{min}^{(1)} = \frac{4}{3} \pi \sigma r^{(1)2}. \quad (4.8)$$

Як видно з рівняння (4.8), робота по утворенню ядра пір і робота зростання пори різні.

Робота утворення ядра пори критичного розміру буде дорівнювати

$$l_{кр}^{(1)} = \frac{16}{3} \pi \sigma^2 \frac{v^{(1)}}{\varphi_{\infty}^{pre} - \varphi_{\infty}^{(1)}},$$

чи враховуючи, що  $r^{(1)} = \frac{2\sigma}{\rho^{(1)} - \rho}$

$$l_{kp}^{(1)} = \frac{16}{3} \pi \frac{\sigma^3}{(p_{kp}^{(1)} - p)^2}.$$

Частота спонтанного утворення ядра пори може бути представлена у вигляді [132]

$$J = N_1 \cdot K_0 \cdot e^{-\frac{l_{kp}^{(1)}}{k_B \cdot T}},$$

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

$K_0$  - кінетичний співмножник;

$\frac{l_{kp}^{(1)}}{k_B \cdot T}$  - відносна висота бар'єру вільної енергії під час утворення ядер,

даний член рівняння можна розглядати як параметр стійкості матеріалу пороутворення;

$k_B$  - постійна Больцмана.

Час виявлення ядра пори можна представити у вигляді

$$\tau_s = \overline{\tau}_3 + \tau_p,$$

де  $\tau_s$  - час спостереження,

$\overline{\tau}_3$  - середній час реакції утворення ядра пори,

$\tau_p$  - час релаксації системи, обумовлений генезисом пір.

Оскільки частота утворення ядра це кількість ядер, що утворено в одиницю часу спостереження, то

$$\bar{\tau}_3 = \frac{n_{por}}{N_1 \cdot K_0 \cdot e^{-\frac{l_{kp}^{(1)}}{k_B \cdot T}}} - \tau_P.$$

В даному рівнянні невідомим залишається кінетичний співмножник  $K_0$ , який знаходиться через кінетичні дослідження та буде дорівнювати узагальненому показнику пористості.

З урахуванням отриманих результатів у третьому розділі даної роботи, про зміну кількості пір під час спучення глиноземистих теплоізоляційних матеріалів, складемо підсумкову модель, що зображує зміну пористості в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему

$$\left\{ \begin{array}{ll} n_{pore} = \tau_s \cdot N_1 \cdot K_0 \cdot e^{-\frac{16 \cdot \pi \cdot \sigma^3}{3 \cdot k_B \cdot T \cdot (p_{kr}^{(1)} - p)^2}} & \text{if } \tau_s < \tau_1 \\ n_{pore} = \tau_s \cdot \xi_1 \cdot (1 - P) & \text{if } \tau_1 < \tau_s < \tau_2, \\ n_{pore} = \tau_s \cdot \xi_2 \cdot P & \text{if } \tau_s > \tau_2 \end{array} \right.$$

де  $\xi_1, \xi_2$  - емпіричні коефіцієнти.

Модель верифікована з даними рисунків 3.11-3.13, що робить робочу гіпотезу доведеною теорією. В якості прикладу наведемо  $K_0$  для гідросилікатів під час ізотермічного підведення енергії

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



Даний показник враховує енергію активації, температури та тиск сировинної суміші та оточуючого середовища. Отже він є узагальнюючим показником пористої структури теплоізоляційного матеріалу на першому технологічному етапі, що і треба було довести.

#### 4.6 Імовірність виникнення пори з ядра критичного радіуса

Введемо параметр ймовірності утворення пори з ядра –  $p^*$ , і під ним будемо розуміти число появи пір  $k$  в одиницю часу, що віднесено до числа ядер  $n_{pore}$

$$P^* = \frac{k}{\Delta\tau \cdot n_{pore}}.$$

Згідно біноміального розподілу, ймовірність, що  $k$  ядер пір стане порами

$$P^*(k) = C_n^k \cdot p^k \cdot (1-p)^{n-k},$$

де  $C_n^k$  - біноміальний коефіцієнт,  $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ .

Введемо позначення  $P^* \cdot n = w$  - математичне очікування. Це послідовність появи пір в часі, яка становить потік пороутворення. Фізичний сенс - щільність ймовірності виникнення пір, тобто межа відношення ймовірності виникнення хоча б однієї пори в тимчасовому інтервалі, до цього інтервалу

$$w(\tau) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{P^*(\tau, \tau + \Delta\tau)}{\Delta\tau}.$$

Імовірність того, що ядро критичного радіуса самоліквідується, буде дорівнювати  $q^* = 1 - P^*$ .

Оскільки, в поставленому завданні необхідно досягти умови найбільшого переходу ядра в пору, то самоліквідація ядра відповідає вимогам розподілу Пуассона і, використовуючи його отримаємо

$$Q^*(k) = \frac{w_0^k}{k!} e^{-w_0},$$

де  $w_0$  - математичне очікування самоліквідації ядра  $w_0 = q^* \cdot n$ .

За умовами розподілу Пуассона  $w_0 = const$ . Для даних умов ймовірність утворення  $k$  пір з  $n$  ядер критичного радіуса буде дорівнювати

$$P^*(k) = 1 - \frac{w_0^k}{k!} e^{-w_0}.$$

Виходячи з цього, поява хоча б однієї пори за час  $\tau$  дорівнюватиме

$$\int_{Q^*(0)}^{Q^*(\tau)} \frac{dQ^*(\tau)}{Q^*(\tau)} = \int_0^\tau -w_0 d\tau,$$

$$\ln Q^*(\tau) = -w_0 \tau,$$

$$Q^*(\tau) = e^{-w_0 \tau},$$

або

$$P^*(\tau) = 1 - e^{-w_0 \tau}.$$

Дані рівняння дають можливість передбачити ймовірність появи необхідної кількості пір при наявності статистичних даних (матриці

виникнення пір). Іншими словами, можна спрогнозувати пористість матеріалу (з певною похибкою) за наявності бази спостережень пороутворення даного матеріалу. Використовуючи поєднання з повтореннями при обмеженнях по формі матеріалу [133], можливо аналітично розрахувати пористість матеріалу.

#### 4.7 Швидкість зростання пори при підведені теплової енергії

Ядро пори, що утворилося завдяки пари у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу, знаходиться в шарі перегрітої суміші. При  $\varphi^{(1)} - \varphi^{(pre)} < 0$  і  $r > r_{kr}^{(1)}$  зростання пори відбуватиметься досить швидко. На першій стадії зростання пори відбуватиметься ізотермічно. На другій стадії, коли зростання пори буде визначатися швидкістю надходження теплоти, температура всередині пори і навколишньої суміші буде різною, а тиск однаковим, тобто друга стадія буде ізобарна. Друга стадія буде основною, в цей час відбуватиметься основне зростання пори.

Розглянемо перенесення теплоти, рівняння руху рідини і рівняння нерозривності при нескінченно великому об'ємі вихідної суміші навколо однієї пори радіусом  $r$ .

Теплообмін на границі утвореної пори буде залежати від характеру перебігу навколишньої суміші. Застосуємо перший закон термодинаміки для визначення теплового потоку, що проходить через границю середовище-пора [134]

$$4\pi r^2 \cdot q \cdot d\tau = dU + dL.$$

Для першої стадії росту пори, на поверхні пори буде виконуватися наступне рівняння теплового балансу

$$4\pi r^2 \cdot q \cdot d\tau = p^{(1)} \cdot 4\pi r^2 \cdot dr,$$

або з урахуванням тиску всередині пори

$$q \cdot d\tau = p_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \cdot dr,$$

звідси, швидкість росту пори для першої стадії

$$\frac{dr}{d\tau} = \frac{q \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}}{p_0}.$$

Знайдемо рівняння часу зростання пори виходячи з рівнянь руху і нерозривності.

Швидкість сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу під час його термообробки поблизу пори (до початку кристалізації) дорівнює  $w_r$ . Рівняння руху сировинної суміші матиме такий вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \Delta w_x \\ w_x = \frac{\partial r}{\partial \tau}, \quad \text{при } r = x \\ p^{(1)} - p^{(2)} = \frac{2\sigma}{r} \end{array} \right. .$$

Рівняння нерозривності сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу під час його термообробки в циліндричних координатах, можна привести у вигляді

$$\rho \cdot w_x \cdot x^2 = const.$$

Константа визначається з граничних умов

$$\rho \cdot w_x \cdot x^2 \Big|_{x=r} = (\rho - \rho^{(1)}) \frac{\partial r}{\partial \tau} r^2.$$

Звідси, швидкість сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу під час його термообробки поблизу зростаючої пори буде дорівнювати

$$w_x = \frac{(\rho - \rho^{(1)}) r^2}{\rho x^2} \frac{\partial r}{\partial \tau}.$$

Згідно з точним рішенням Релея для парової бульбашки, час, протягом якого бульбашка досягне радіуса  $r$ , дорівнюватиме

$$\tau = \frac{0,915}{\sqrt{6}} \cdot r \cdot \sqrt{\frac{\rho}{p - p_0}}.$$

Дане рівняння можна використовувати при ізотермічному зростанні пір у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу під час його термообробки, якщо врахувати різницю тисків, як

$$p - p_0 = \frac{2\sigma}{r}.$$

Для визначення діаметру пори в залежності від тиску газу у ній, після проходження ізотермічної стадії зростання пори необхідно визначитись з динамічною характеристикою зміни об'єму пори. В якості динамічної характеристики, що визначає спрямованість змін розмірів парової пори, приймемо різниця напруги, викликаних тиском в паровій області і опором граничної поверхні пори.

Рівняння, що характеризує динаміку росту чи зменшення парового

бульбашки

$$\frac{dw}{d\tau} = -\frac{1,5\rho w^2 + P_2 - P_n(T)}{\rho_2 R} = -\frac{1,5\rho w^2}{\rho_2 R} + \frac{P_n(T) - P_2}{\rho_2 R},$$

де  $w$  – швидкість зростання парової бульбашки у суміші;

$\tau$  – час зростання бульбашки;

$\rho$  – густина;

$P_n$  – тиск всередині парової порожнини;

$P_r$  – тиск у навколишньої сировинної суміші;

$T$  – температура;

$R$  – радіус парової бульбашки.

Збільшення, зменшення і стабілізація розмірів бульбашки можуть бути представлені для трьох стадій зменшення пір (згідно з додатковою гіпотезою)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{P_n(T) - P_2}{1,5\rho} > 0, \quad \frac{\sqrt{1,5\rho}}{2\sqrt{P_n(T) - P_2}} \ln \left| \frac{w - \sqrt{\frac{P_n(T) - P_2}{1,5\rho}}}{w + \sqrt{\frac{P_n(T) - P_2}{1,5\rho}}} \right| = -\frac{1,5\rho\tau}{\rho_2 R} + C; \\ \frac{P_n(T) - P_2}{1,5\rho} < 0, \quad \sqrt{\frac{1,5\rho}{P_n(T) - P_2}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1,5\rho}{P_n(T) - P_2}} w = -\frac{1,5\rho\tau}{\rho_2 R} + C; \\ \frac{P_n(T) - P_2}{1,5\rho} = 0, \quad \frac{1}{w} = -\frac{1,5\rho\tau}{\rho_2 R} + C. \end{array} \right.$$

При  $P_n(T) - P > 0$  – парова бульбашка у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу збільшується, при  $P_n(T) - P < 0$  – зменшується; а в разі  $P_n(T) - P = 0$  – її розмір стабілізовано. Як видно з рівнянь,  $P_n(T)$  залежить

від величини зовнішнього теплового потоку (температури). Отже, процес пороутворення у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу може бути контрольованим.

Таким чином, швидкість зміни розмірів парового бульбашки може бути визначена за рівнянням

$$w(\tau) = \begin{cases} \sqrt{\frac{P_n(T) - P_z}{1,5\rho} \frac{1 + k(\tau)}{1 - k(\tau)}}, & \frac{P_n(T) - P_z}{1,5\rho} > 0; \\ \sqrt{\left| \frac{P_n(T) - P_z}{1,5\rho} \right|} \operatorname{tg} \sqrt{\left| \frac{P_n(T) - P_z}{1,5\rho} \right|} \left( C - \frac{1,5\rho\tau}{\rho_z R} \right), & \frac{P_n(T) - P_z}{1,5\rho} < 0; \\ \frac{\rho_z R}{1,5\rho\tau - C\rho_z R}, & P_n(T) - P_z = 0. \end{cases}$$

Після перетворень з урахуванням рівності  $\frac{(w - \alpha)(w_0 + \alpha)}{(w + \alpha)(w_0 - \alpha)} = e^{\frac{1,5\rho\tau}{\rho_z R}}$ ,

остаточно отримаємо

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

Розглянемо останній випадок, коли  $P_n(T) - P_2 = 0$ , який означає, що пори у сировинній суміші не змінюється в обсязі. У технологічному аспекті досягнуті співвідношення енергетичних параметрів, які характеризують середній прогнозований розмір пір, відповідно і теплофізичні параметри, зокрема теплопровідність. Якщо  $w_0 \neq 0$ , останній вираз втрачає фізичний зміст, оскільки для цього випадку  $w = 0$ .

Рівняння для визначення швидкості зміни розміру пори у сировинній суміші можна записати у вигляді

$$\frac{dR}{d\tau} = \frac{w_0 \rho_2 R}{1,5 \rho w_0 \tau - \rho_2 R}$$

Вирішуючи зазначене рівняння щодо прогнозованого радіусу пори, можна визначити тривалість процесу спучування. Оскільки середнє значення розміру пір є одним з основних факторів, що визначають теплофізичні властивості виробу, даний метод дозволяє прогнозувати властивості сформованого теплоізоляційного матеріалу, наприклад, його теплопровідність.

Даний метод дозволяє з достатньою точністю оцінювати кінетичні характеристики термічного спучування. Для хімічного пороутворення її слід доповнити енергетичною оцінкою ймовірності такої реакції.

#### 4.8 Теплообмін між зростаючою порою і навколишньою сумішшю

Розглянемо рівняння теплового балансу для одиночної парової бульбашки, запропоноване Іваницьким [135]

$$(T_0 - T_s) \cdot \lambda_l \cdot \left( \frac{2}{\delta} + \frac{1}{r} \right) = -j(T_s) \cdot L(T_s) - q(T_s),$$

де  $\delta$  – поточна товщина теплового прикордонного шару;



$j$  – щільність потоку речовини;

$L$  – теплота конденсації;

$\lambda_l$  – коефіцієнт теплопровідності рідини;

$q$  – щільність потоку теплоти.

Представимо це рівняння для пари в потоці сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу під час його термообробки, з урахуванням виведених раніше залежностей

$$\Delta T \cdot \lambda_l \cdot \left( \frac{2}{\delta} + \frac{1}{r} \right) = -p_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \cdot \frac{dr}{d\tau} \Big|_{\tau=0}^{\tau=\tau'} - q_{P=const},$$

де  $q_{P=const}$  – щільність потоку теплоти в ізобарній стадії;

$\tau'$  – час протікання першого етапу росту пори.

В основній стадії росту пір (ізобарній) у сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу під час його термообробки кількість теплоти, що підводиться до зростаючої пори від сировинної суміші, записується рівнянням

$$Nu \sim Re^n \cdot Pr^m.$$

Усереднене в часі значення радіусу пори можна розрахувати, як

$$\bar{r} = \frac{1}{\tau - \tau'} \int_{\tau=\tau'}^{\tau} r(\tau) d\tau,$$

а з урахуванням знайденої раніше залежності часу від радіуса пори для ізобарної стадії росту пори, отримаємо

$$\bar{r} = \frac{\sqrt{6}}{1,83} \cdot \frac{\tau^2}{\tau - \tau'} \cdot \sqrt{\frac{p - p_0}{\rho}},$$

критерій Нуссельта

$$Nu = \frac{q_{P=const} \cdot \bar{r}}{\lambda \cdot \Delta T},$$

критерій Рейнольдса

$$Re = \frac{\bar{r}}{\nu} \cdot \frac{dr}{d\tau}.$$

Підставивши дані рівняння в рівняння теплообміну, отримаємо

$$\frac{q_{P=const}}{\lambda \cdot \Delta T} = const \cdot \frac{(\bar{r})^{n-1}}{\nu^n} \left( \frac{dr}{d\tau} \right)^n \cdot Pr^m.$$

З урахуванням середнього радіусу пори, можна записати

$$q_{P=const} = const \cdot \Delta T \cdot \frac{\left( \frac{\tau^2}{\tau - \tau'} \cdot \sqrt{\frac{p - p_0}{\rho}} \right)^{n-1}}{\nu^n} \left( \frac{dr}{d\tau} \right)^n \cdot \frac{(\mu \cdot c_p)^m}{\lambda^{m-1}}.$$

Підсумкове рівняння теплового балансу зростаючої пори в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу під час його термообробки з урахуванням ізотермічної стадії

$$\Delta T \cdot \lambda_l \cdot \left( \frac{2}{\delta} + \frac{1}{r} \right) = -p_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \cdot \frac{dr}{d\tau'} - C_1 \cdot \Delta T \cdot \frac{(\mu \cdot c_p)^m}{\lambda^{m-1}} \cdot \frac{\left( \frac{\tau^2}{\tau - \tau'} \cdot \sqrt{\frac{p - p_0}{\rho}} \right)^{n-1}}{v^n} w^n,$$

де  $w$  - швидкість росту пори;

$C_1$  - константа.

У статті [136] відзначається, що без відсутності фазових переходів

$$\frac{dr}{d\tau} = w.$$

Якщо на внутрішній поверхні пори у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу під час його термообробки відбувається випаровування або конденсація пари, то радіус зростаючої пори змінюється не тільки завдяки радіального руху рідини, а й внаслідок зменшення рідкої фази в шарі біля поверхні, або навпаки її збільшення під час конденсації [137]. При цьому, для зростаючої пори, буде справедливо

$$\frac{dr}{d\tau} = w + \frac{j}{\rho},$$

де  $j$  - кількість газу, що переноситься через одиничну поверхню пори.

$\rho$  - тиск всередині пори.

За визначеним тепловим балансом з врахуванням рівняння зміни діаметру пори у сировинній суміші по часу можна визначити кількість теплоти необхідної для формування пористої структури з заданим розміром пір. Тобто, можна визначити кількість теплової енергії, що необхідно підвести до

сировинної суміші для формування необхідних теплофізичних властивостей теплоізоляційного матеріалу.

#### 4.9 Висновки до розділу

1. Для досягнення максимального теплового опору пористої структури, що утворюється за допомогою хімічних реакцій, необхідно збільшувати різницю хімічних потенціалів систем матеріал-пора.

2. Для зменшення коефіцієнту теплопровідності газу у закритих порах переважніше ті реакції утворюючі пори, які відбуваються при низьких температурах.

3. Для існування пори яка утворюється в результаті хімічної реакції необхідно, щоб  $\varphi^{(1)} - \varphi^{(pre)} < 0$  і  $r^{(1)} > r_{kr}^{(1)}$ . При цьому критичний радіус ядра пори прямо пропорційний коефіцієнту поверхневого натягу. Тобто пора в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу з більшою ймовірністю виникне в місцях з малим поверхневим натягом (дані області можуть утворюватися завдяки флуктуацій щільності). Також дані нерівності показують, що для виникнення пір унаслідок хімічної реакції, необхідне зменшення хімічного потенціалу пороутворюючого газу.

4. Підсумкова модель, що зображує зміну пористості в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему, виглядає наступним чином

$$\left\{ \begin{array}{ll} n_{pore} = \tau_s \cdot N_1 \cdot K_0 \cdot e^{-\frac{16 \cdot \pi \cdot \sigma^3}{3 \cdot k_B \cdot T \cdot (p_{kr}^{(1)} - p)^2}} & \text{if } \tau_s < \tau_1 \\ n_{pore} = \tau_s \cdot \xi_1 \cdot (1 - P) & \text{if } \tau_1 < \tau_s < \tau_2, \\ n_{pore} = \tau_s \cdot \xi_2 \cdot P & \text{if } \tau_s > \tau_2 \end{array} \right.$$

де  $\xi_1, \xi_2$  - емпіричні коефіцієнти.

5. Підсумкове рівняння теплового балансу зростаючої пори в сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу під час його термообробки з урахуванням ізотермічної стадії

$$\Delta T \cdot \lambda_l \cdot \left( \frac{2}{\delta} + \frac{1}{r} \right) = -p_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \cdot \frac{dr}{d\tau'} - C_1 \cdot \Delta T \cdot \frac{(\mu \cdot c_p)^m}{\lambda^{m-1}} \cdot \frac{\left( \frac{\tau^2}{\tau - \tau'} \cdot \sqrt{\frac{p - p_0}{\rho}} \right)^{n-1}}{\nu^n} w^n.$$

## **5 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗМІРУ, РОЗТАШУВАННЯ ТА ФОРМИ ПІР НА ЕФЕКТИВНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ**

### **5.1 Вплив розміру та розташування пір у електропровідних пористих структурах (дослідження електронної теплопровідності)**

Вироби з електропровідних пористих матеріалів використовуються в автомобільній промисловості як конструктивні елементи; в аерокосмічній галузі – як титанові і алюмінієві сендвіч - панелі; в суднобудуванні – як корпус пасажирських суден; в медицині – як металеві імплантати в організмі людини; в ядерній енергетиці – як елемент теплового захисту реактора; в енергетиці – як каркасний елемент теплового захисту енергетичного обладнання. Такі вироби в залежності від вимог споживача, повинні відповідати ряду параметрів: пористість, вага, теплопровідність, міцність, електропровідність, щільність, звукопоглинання і т.д. Розмір та розташування пір у даних матеріалах та конструкцій з них відіграє значну роль у формуванні їх теплофізичних властивостей [107,138]. Але вплив порожнеч та пір на ефективний коефіцієнт теплопровідності у електропровідних конструкціях не розглядається [139-144].

Для дослідження впливу розміру та розташування пір на електронну складову коефіцієнта теплопровідності було проведено ряд лабораторних досліджень. В якості перетину моделей пористих електропровідних конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання було обрано пластини з нержавіючої сталі, дюралюмінію та міді, в яких робилися отвори в шаховому та коридорному порядку таким чином, щоб загальна кількість отворів була однаковою, для досягнення однакової загальної пористості та ваги. Під час дослідів діаметри отворів пластин, а отже й загальна пористість конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання, поступово збільшувались.

Число Лоренца для металів буде дорівнювати [145]

$$L = \frac{\lambda}{T \cdot \sigma},$$

де  $L$  – число Лоренца;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;

$T$  – температура, за якої з довідкових даних взято коефіцієнти теплопровідності та електропровідності;

$\sigma$  – коефіцієнт питомої електропровідності.

Знаючи марку металу в довідниках знаходилися всі необхідні величини для розрахунку числа Лоренцо за вищезазначеною формулою. Оскільки число Лоренцо є константою для певного матеріалу, то, знаючи його, можна розрахувати теплопровідність пористого матеріалу. Для розрахунку коефіцієнта електронної теплопровідності розраховувались наступні величини: геометричні параметри досліджуваних зразків (штангенциркуль), температури зразків під час дослідів (термопари ХК–0.1), різниця електричних потенціалів на кінцях зразків та сила струму (мультиметр UNI-T UT39A). Для того, щоб отримати достатню силу струму та різницю потенціалів на експериментальних зразках, було побудовано експериментальні установки.

Оскільки електричний опір дослідних зразків мав малу величину, то для отримання точних експериментальних даних необхідно пропускати струм не менше 100 А через зразки. Для цього розроблено експериментальну установку №1 [146]. Схему даної установки представлено на рис. 5.1. Установка дозволяє виміряти силу струму та різницю потенціалів на зразках, що досліджуються в якості перетину конструкції теплового захисту з відносною похибкою вимірів до 1%.

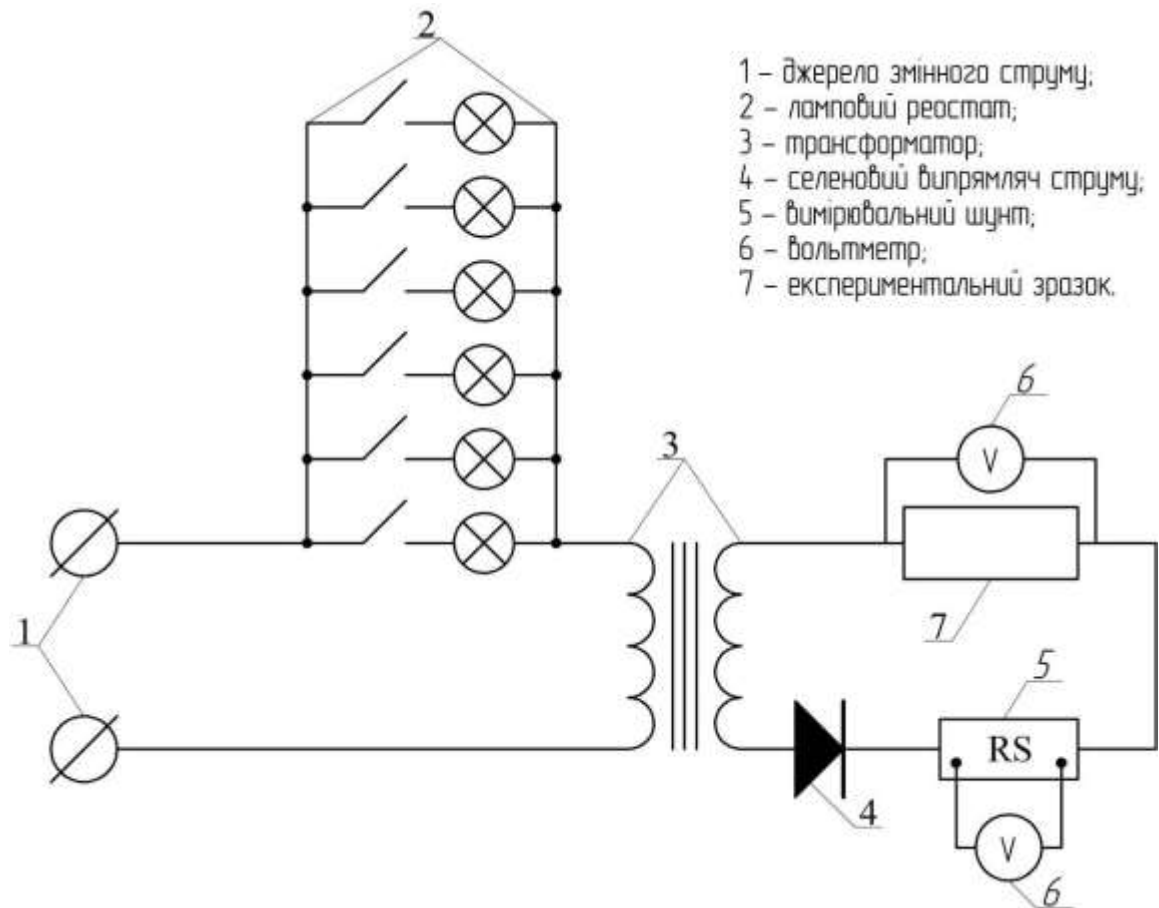


Рисунок 5.1 – Запатентована схема експериментальної установки №1 з ламповим реостатом для вимірювання коефіцієнта теплопровідності пористих електропровідних матеріалів

Ламповий реостат включений до схеми експериментальної установки для регулювання сили струму. Сполучні дроти вироблялись з міді. Селеновий випрямляч струму використано для того, щоб отримати постійний струм, який дозволить виміряти різницю потенціалів на зразках. Випрямляч такого типу володіє унікальною властивістю самовідновлення (під час пробою, селен вигорає, не викликаючи короткого замикання). Оскільки використана сила струму перевищує межу вимірювання амперметру, в схему було включено вимірювальний шунт 75ШСММ3-200-0,5. Клас точності шунта 0,5; падіння напруги на потенціальних затискачах 75 мВ; номінальний струм 200 А.

На експериментальній установці №1 було проведено серію досліджень нержавіючих пластин AISI 304 для визначення залежності коефіцієнта



теплопровідності пористих електропровідних матеріалів та конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання від діаметра пір. Параметри пластин, що моделюють переріз конструкції теплового захисту енергетичного обладнання: довжина 0,13 м; ширина 0,104 м; товщина 0,002 м. Зразки кріпилися за допомогою нержавіючих болтів по 8 штук з кожного боку. Заміри без отворів було виконано для перевірки відносної похибки установки. Так, питомий електричний опір нержавіючих сталі AISI 304 за довідниковими даними (ГОСТ – 08X18H10) складає  $7,2 \cdot 10^{-7}$  Ом·м. Отриманий під час дослідження питомий електричний опір склав  $7,27 \cdot 10^{-7}$  Ом·м. Відносна похибка вимірів склала 0,97%. Температура зразка замірялась за допомогою цифрового мультиметру DT-838 та термопари типу ХК-0,1. Заміри виконувались в початковий та кінцевий момент часу, після чого середньо арифметична температура зразка заносилась до таблиці 4.1. Діаметр отворів складав від 3,2 до 15 мм (рис. 4.2).

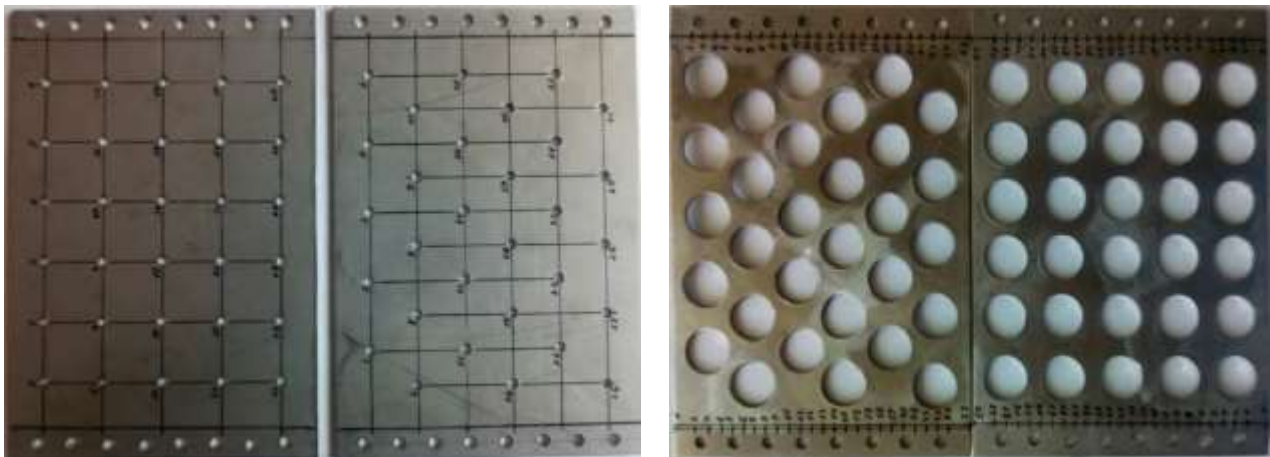


Рисунок 5.2 – Зразки пластин, що моделюють переріз конструкції теплового захисту енергетичного обладнання з нержавіючої сталі з діаметрами отворів 3,2 мм та 15 мм

Для виміру падіння напруги на потенціальних затискачах було використано прибор комбінований цифровий Щ4313. Заміри виконувались

паралельно з замірами різниці потенціалів на зразку в 25 моментах часу. Всі отримані данні занотовано в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1

Розрахунок електронної складової коефіцієнта теплопровідності з урахуванням отворів конструкції теплового захисту енергетичного обладнання з нержавіючої сталі

$d_{\text{отв.}}$	Коридорне розташування отворів					
	T, К	R, Ом	$\rho$ , Ом·м	$\sigma$ , См/м	L, Вт·Ом·К <sup>-2</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)
3,2	288	0,000468	7,48E-07	1336191,6	3,67E-08	14,137
4	288	0,000475	7,60E-07	1316260,2		13,926
5	289	0,000488	7,81E-07	1280285		13,592
6	288	0,000507	8,10E-07	1233913,7		13,055
8	293	0,000566	9,05E-07	1104705,8		11,891
10	293	0,000637	1,02E-06	981107,2		10,560
12	293,5	0,000762	1,22E-06	820114,41		8,842
15	296	0,001080	1,73E-06	578817,54		6,294
$d_{\text{отв.}}$	Шахове розташування отворів					
	T, К	R, Ом	$\rho$ , Ом·м	$\sigma$ , См/м	L, Вт·Ом·К <sup>-2</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)
3,2	288	0,000467	7,47E-07	1338236,1	3,67E-08	14,158
4	288	0,000473	7,57E-07	1320331,5		13,969
5	289	0,000488	7,80E-07	1281647,7		13,607
6	288	0,000504	8,07E-07	1238868,7		13,107
8	293	0,000562	8,99E-07	1112204,3		11,971
10	293	0,000639	1,02E-06	978510,52		10,532
12	293,5	0,000766	1,22E-06	816412,17		8,803
15	296	0,001076	1,72E-06	580656,82		6,314
Без отворів						
0	293	0,00045	7,27E-07	1375000	3,67E-08	14,8

З таблиці 5.1. можна побачити, що електронна складова коефіцієнту теплопровідності пластини нержавіючих сталі AISI 304 без отворів складає по результатам розрахунків 14,8 Вт/(м·К). За ГОСТ – 08X18H10 теплопровідність нержавіючих сталі AISI 304 складає 16,2 Вт/ (м·К). Похибка методу склала 8,64 %.

За отриманими даними (табл. 5.1) побудовано графік залежності електронної складової коефіцієнта теплопровідності електропровідних конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання від діаметра отворів, розташованих в коридорному та шаховому порядках (рис. 5.3).

Аналіз залежностей електронної складової коефіцієнта теплопровідності від діаметра отворів, розташованих в коридорному та шаховому порядках, для конструкцій теплового захисту з нержавіючої сталі AISI 304 показує загальне зменшення коефіцієнта електронної теплопровідності від діаметру отворів. Різниця між коридорним та шаховим розташуванням пір не перевищує 0,44%. В середньому по усім діаметрам різниця склала 0,15%, що менше похибки дослідницької установки, тому, місця перетину кривих між собою пояснюються похибкою методу. Але загальний вид залежності електронної складової коефіцієнта теплопровідності електропровідних конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання від діаметру отворів та його малої відмінності при різному розташуванні пір, безперечно, є важливим результатом проведеного експерименту.

Крива 1 апроксимується поліномом другого ступеню, з коефіцієнтом детермінації  $R=0,999$

$$\lambda = -0,301d^2 - 0,1263d + 14,864.$$

Крива 2 апроксимується поліномом другого ступеню, з коефіцієнтом детермінації  $R=0,9985$ , наступною залежністю

$$\lambda = -0,306d^2 - 0,1206d + 14,876.$$

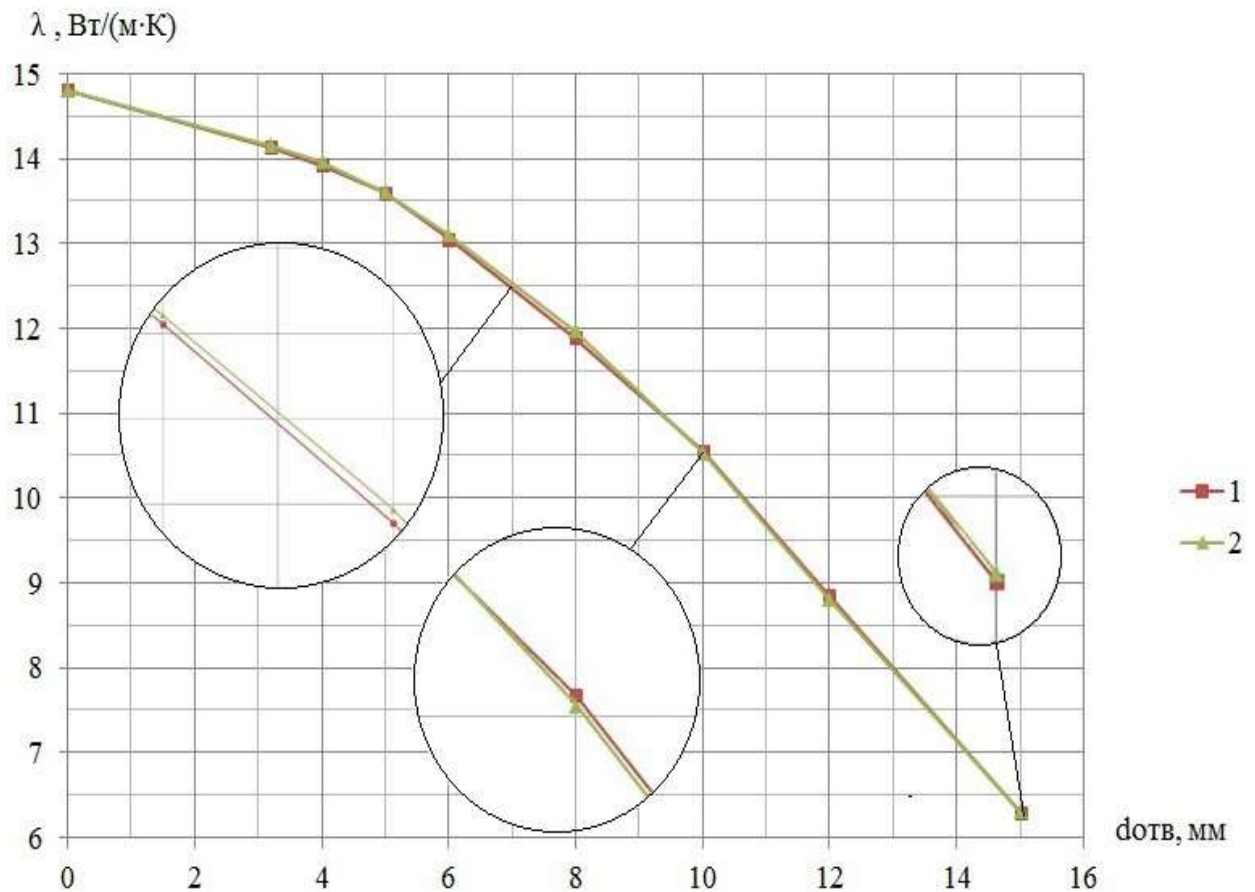


Рисунок 5.3 – Залежність електронної складової коефіцієнта теплопровідності електропровідних конструкцій теплового захисту від діаметра отворів, розташованих в коридорному (1) та шаховому (2) порядках

Залежність електронної складової коефіцієнта теплопровідності електропровідних конструкцій теплового захисту від діаметра отворів є лінійною, що також свідчить й про залежність електронної складової коефіцієнта теплопровідності електропровідних матеріалів від пористості (рис. 5.4). Аналізуючи дану залежність, можна зробити висновок про те, що на електронну складову теплопровідності електропровідних матеріалів довжина шляху проходження електронів впливає набагато менше за загальну пористість. Утворення «холодних містків» завдяки теплопровідності по пористому електропровідному матеріалу та конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання у коридорному порядку не відбувається [147].

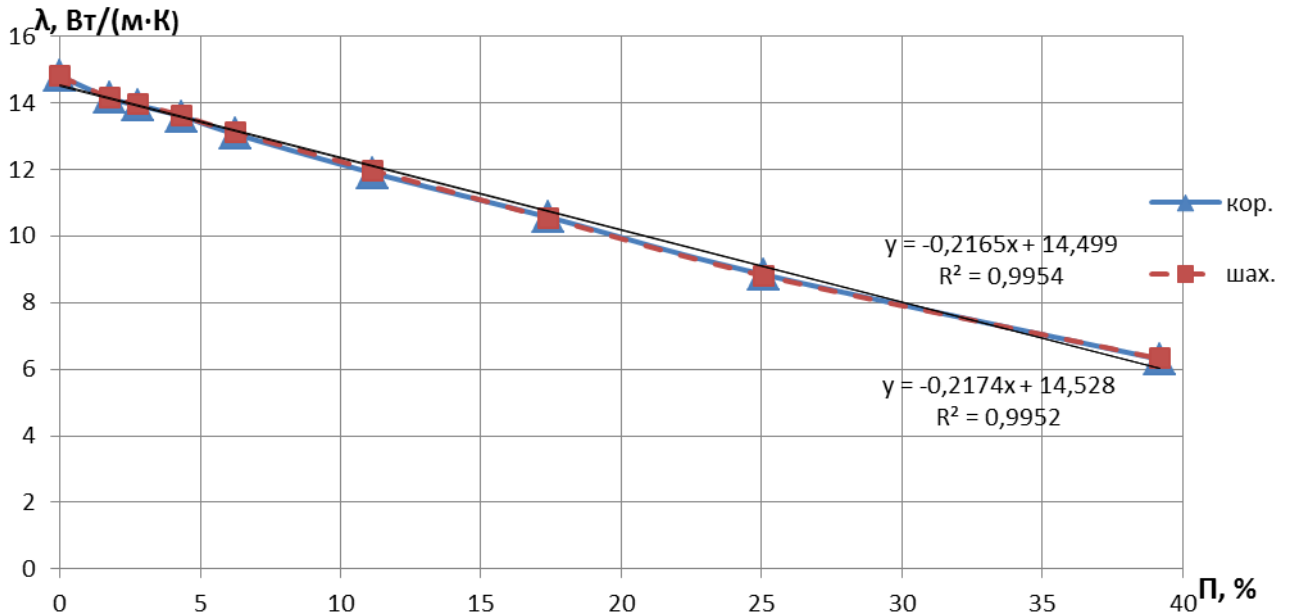
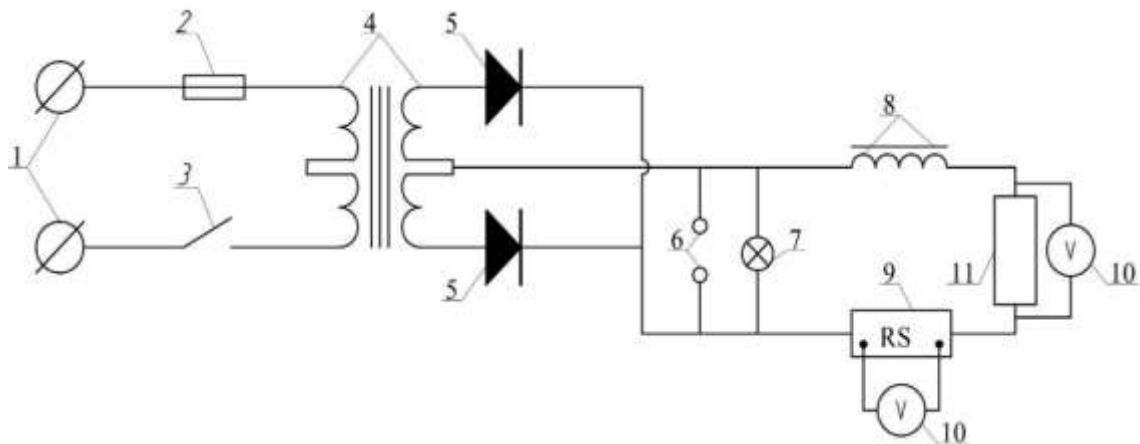


Рисунок 5.4 – Залежність електронної складової коефіцієнта теплопровідності електропровідних конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання від пористості для пір, розташованих у коридорному (1) та шаховому (2) порядках

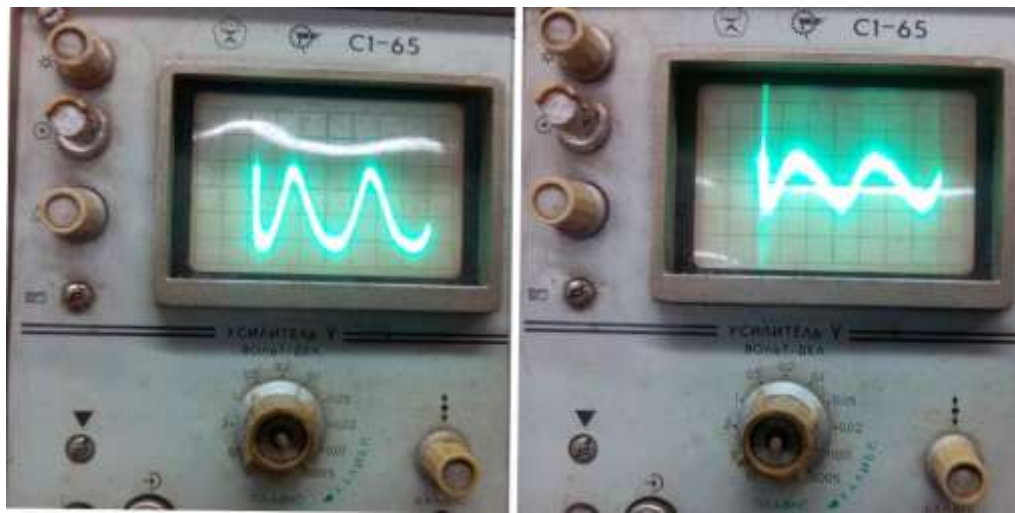
З рис. 5.4 слідує, що розташування пір та отворів у сталі та сталевих конструкціях впливає на коефіцієнт теплопровідності менш ніж на 1%. Це пов'язано з великим значенням коефіцієнту теплопровідності сталі та великою похибкою методу. Необхідно дослідити залежність електронної складової коефіцієнта теплопровідності від розташування пір та їх розміру також для інших електропровідних матеріалів, але з більшою точністю. Для цього розроблено нову дослідницьку установку №2 з виправленням ряду технічних недоліків, а саме: під час роботи установки №1 більш ніж 20 хвилин відбувався перегрів селенових випрямлячів струму; спостерігалися суттєві стрибки напруги; відсутність затискачів істотно впливало на збільшення часу дослідження. Для запобігання цих недоліків було розроблено експериментальну установку №2. Схему даної установки представлено на рис. 5.5.



1 – джерело змінного струму; 2 – запобіжник на 5 А; 3 – вимикач; 4 – трансформатор; 5 – діод; 6 – виходи для вимірювального приладу; 7 – ламповий індикатор; 8 – електричний дросель; 9 – вимірювальний шунт; 10 – вольтметр; 11 – експериментальний зразок

Рисунок 5.5 – Схема дослідницької установки №2 для вимірювання теплопровідності електропровідних пористих виробів з вирівнювачем стрибків напруги

Запобіжник було використано для того, щоб уникнути пошкоджень установки під час різкого стрибка струму в мережі. Вимикач вмонтовано для зручного вмикання та вимикання установки. Діодний напівміст, який складається з двох діодів та двох радіаторів, дозволяє отримати постійний струм та може працювати з силою струму до 200 А. Ламповий індикатор дозволяє легко перевірити наявність обривів або несправностей в електричному ланцюзі. Вимірювальний шунт, як і раніше, використовується за для можливості виміру сили струму, який перевищує межу вимірювальних приладів. Падіння напруги на потенціальних затискачах дорівнює 200 мВ та номінальний струм - 200 А. Однією з суттєвих змін експериментальної установки №2 є наявність електричного дроселя. Дросель дозволяє згладити стрибки напруги [148]. Для перевірки ефективності роботи дроселя було використано осцилограф С1-65. На рисунку 5.6 зображено безпосередньо результати вимірів перепаду напруги без дроселя та з ним.



а)

б)

Рисунок 5.6 – Показники перепаду напруги на осцилографі С1-65, при відсутності електричного дроселя (а) та при його наявності (б) на дослідницькій установці №2

Згідно показникам осцилографа (рис. 5.6) видно, що при відсутності електричного дроселя перепад складає 0,3 В, у той час як при його наявності перепад складає 0,02 В. Виходячи з чого можна сказати, що електричний дросель є високоефективним у даній схемі, адже він дозволяє зменшити перепад напруги у 15 разів. Фотографія дослідницької установки в зборі без кришки представлено на рис. 4.7.



Рисунок 5.7 – Дослідницька установка №2 для вимірювання теплопровідності електропровідних пористих виробів з вирівнювачем стрибків напруги без кришки

Отриманий під час дослідження питомий електричний опір нержавіючих пластин на дослідницькій установці №2 склав  $7,23 \cdot 10^{-7}$  Ом·м. Відносна похибка експериментальної установки №2 склала 0,42 %. Похибка дослідницької установки №2 відрізняється від похибки на установці №1 на 0,55%. Але при діаметрі отворів 15 мм абсолютна похибка між експериментальною установкою №1 та №2 досягла 6,73% (табл. 5.2).

На дослідницькій установці №2 було проведено експериментальні дослідження, аналогічні дослідженням на першій установці, для конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання з міді та з дюралюмінію. Отвори в зразках виконувались в коридорному та шаховому порядку. Марка використаної міді – М2. Марка використаного дюралюмінію – Д16. Параметри пластин з дюралюмінію, що моделюють переріз конструкції теплового захисту енергетичного обладнання: довжина - 0,156 м; ширина - 0,138 м; товщина - 0,000165 м. Параметри пластин з міді, що моделюють переріз конструкції теплового захисту енергетичного обладнання: довжина - 0,156 м; ширина - 0,139 м; товщина - 0,000125 м. Діаметр отворів варіювався від 4 до 20 мм. Додатково було проведено серію експериментів з діелектриками всередині отворів для врахування впливу електромагнітного поля, що створюється за рахунок пір та отворів в електропровідних пористих матеріалах та конструкціях теплового захисту енергетичного обладнання (рис. 5.8). Заміри виконувались в початковий та кінцевий момент часу, після чого середньо арифметична температура зразка заносилась до таблиці 5.3 для дюралюмінію та до таблиці 5.4 для міді. Для виміру падіння напруги на затискачах було використано вольтметр В7-35. Заміри виконувались паралельно з замірами різниці потенціалів на зразку в 27 моментах часу. Оскільки на використаному шунті  $1 \text{ мВ} = 1 \text{ А}$ , отримані данні відразу заносились до розрахункових таблиць (табл.5.3, табл.5.4) як і сила струму. Різниця потенціалів на кінцях зразка замірялась за допомогою цифрового мультиметру DT-830В та щупів.





а)

б)

Рисунок 5.8 – Зразки з міді та дюралюмінію з перфорацією в коридорному та шаховому порядках, з ізоляцією (а) та без неї (б), для діаметру отворів 4 мм та 20 мм.

Таблиця 5.2

Розрахунок електронної складової коефіцієнта теплопровідності конструкції теплового захисту енергетичного обладнання з урахуванням отворів 15 мм із нержавіючої сталі на дослідницькій установці №2

$l, м$	$S, м^2$	$T, К$	$R, Ом$	$\rho, Ом \cdot м$	$\sigma, См/м$	$L, Вт \cdot Ом \cdot К^{-2}$	$\lambda, Вт/(м \cdot К)$
Коридорне розташування отворів							
0,13	0,000208	308,5	0,001072	1,715E-06	583171,62	3,6736E-08	6,6091
Шахове розташування отворів							
0,13	0,000208	308	0,001043	1,669E-06	599081,84	3,6736E-08	6,77842

Заміри нержавіючих пластин, що моделюють переріз конструкції теплового захисту енергетичного обладнання проводились в 25 контактних точках. За отриманими даними з установки №1 та з установки №2 було побудовано порівняльну діаграму (рис. 5.9), з якої видно, що за рахунок стрибків напруги експериментальна установка №1 дає завищені результати електронної складової коефіцієнта теплопровідності пластини при діаметрі отворів 15 мм. Це пояснює отримані раніше завищені результати експерименту по визначенню залежності електронної складової коефіцієнта теплопровідності електропровідних конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання від пористості (рис. 5.4) в порівнянні з прямою апроксимації при значенні загальної пористості 39%.

Для конструкції теплового захисту енергетичного обладнання з міді та дюралюмінію було проведено додаткове дослідження впливу електромагнітного поля на коефіцієнт електронної теплопровідності. В якості електричного ізолятора було використано папір. Температури та розрахункові дані були внесено до таблиці 5.3 для зразків з дюралюмінію та до таблиці 5.4 для зразків з міді.

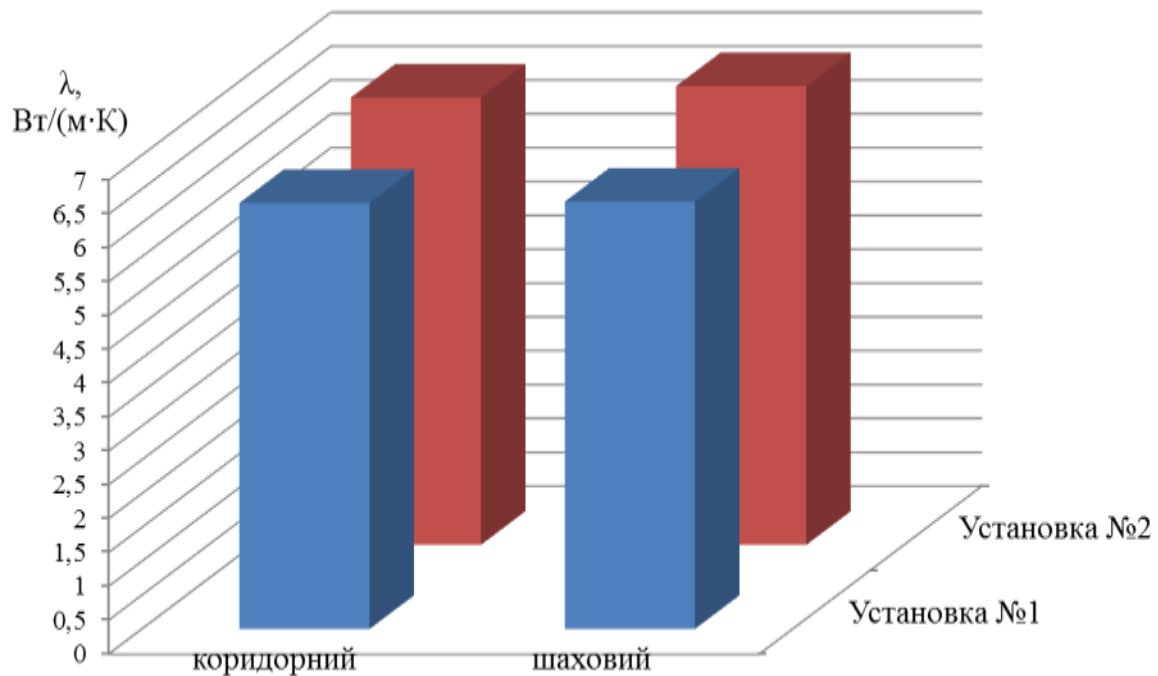


Рисунок 5.9 – Порівняльна діаграма електронної складової коефіцієнта теплопровідності нержавіючих пластин при діаметрі отворів 15 мм

За отриманими даними було побудовано залежності електронної складової коефіцієнта теплопровідності електропровідного матеріалу від діаметра отворів (рис. 5.10, 5.11) для пластин, що моделюють переріз конструкції теплового захисту енергетичного обладнання. З аналізу отриманих залежностей слідує, що діелектрична ізоляція в отворах впливає на залежність електронної складової коефіцієнта теплопровідності електропровідного матеріалу від діаметру отворів. Коефіцієнт теплопровідності електропровідного матеріалу у власному електромагнітному полі без електричної ізоляції більше, ніж для матеріалу з електричною ізоляцією у середині пір.

Гіпотеза: магнітні поля в електропровідному матеріалі з порами, що виникають при проходженні струму крізь нього, збільшують коефіцієнт теплопровідності завдяки створенню додаткового градієнту фазових напруг на поверхні пори.

Таблиця 5.3

Розрахунок коефіцієнта електронної теплопровідності зразків з дюралюмінію

d <sub>отв</sub> , мм	Т, К				R, Ом				ρ, Ом·м			
	Кор. без ізол.	Кор. з ізол.	Шах. без ізол.	Шах. з ізол.	Кор. без ізол.	Кор. з ізол.	Шах. без ізол.	Шах. з ізол.	Кор. без ізол.	Кор. з ізол.	Шах. без ізол.	Шах. з ізол.
4	300,5	302	303	305	6,3092E-05	6,2E-05	6,3E-05	6,292E-05	6,6671E-08	6,58065E-08	6,70271E-08	6,7E-08
6	303	305	303	304,5	6,5505E-05	6,6E-05	6,4E-05	6,406E-05	6,92211E-08	6,93199E-08	6,81815E-08	6,8E-08
8	304	303,5	305,5	305	7,1023E-05	7,1E-05	7E-05	6,9852E-05	7,5052E-08	7,49753E-08	7,48008E-08	7,4E-08
10	304,5	306,5	304	305	7,6446E-05	7,6E-05	7,5E-05	7,4657E-05	8,07827E-08	8,06659E-08	7,94813E-08	8E-08
12	302,5	303,5	303	305	8,464E-05	8,4E-05	8,4E-05	8,3652E-05	8,94418E-08	8,91738E-08	8,89683E-08	8,9E-08
16	305,5	307,5	303,5	306	0,0001127	0,00011	0,00011	0,00011341	1,19095E-07	1,19393E-07	1,21192E-07	1,2E-07
20	306,5	308,5	305,5	308,5	0,00015855	0,00016	0,00015	0,00015492	1,67541E-07	1,66268E-07	1,64215E-07	1,6E-07

Продовження таблиці 5.3

d <sub>отв</sub> , мм	σ, См/м				L, Вт·Ом·К <sup>-2</sup>	λ, Вт/(м·К)			
	Кор. без ізол.	Кор. з ізол.	Шах. без ізол.	Шах. з ізол.		Кор. без ізол.	Кор. з ізол.	Шах. без ізол.	Шах. з ізол.
4	14999027	15196074	14919332	14922307	2,771E-08	124,8789	127,1510	125,2488	126,1006
6	14446472	14425882	14666726	14656740		121,2791	121,9056	123,1281	123,6534
8	13324092	13337732	13368833	13441350		112,2258	112,1559	113,1582	113,5858
10	12378892	12396811	12581581	12576306		104,4361	105,2742	105,9718	106,2758
12	11180453	11214051	11239953	11224039		93,7057	94,2980	94,3601	94,8485
16	8396659	8375700	8251395	8278810		71,0721	71,3588	69,3853	70,1893
20	5968700	6014385	6089584	6060651		50,6864	51,4077	51,5443	51,8031

Таблиця 5.4

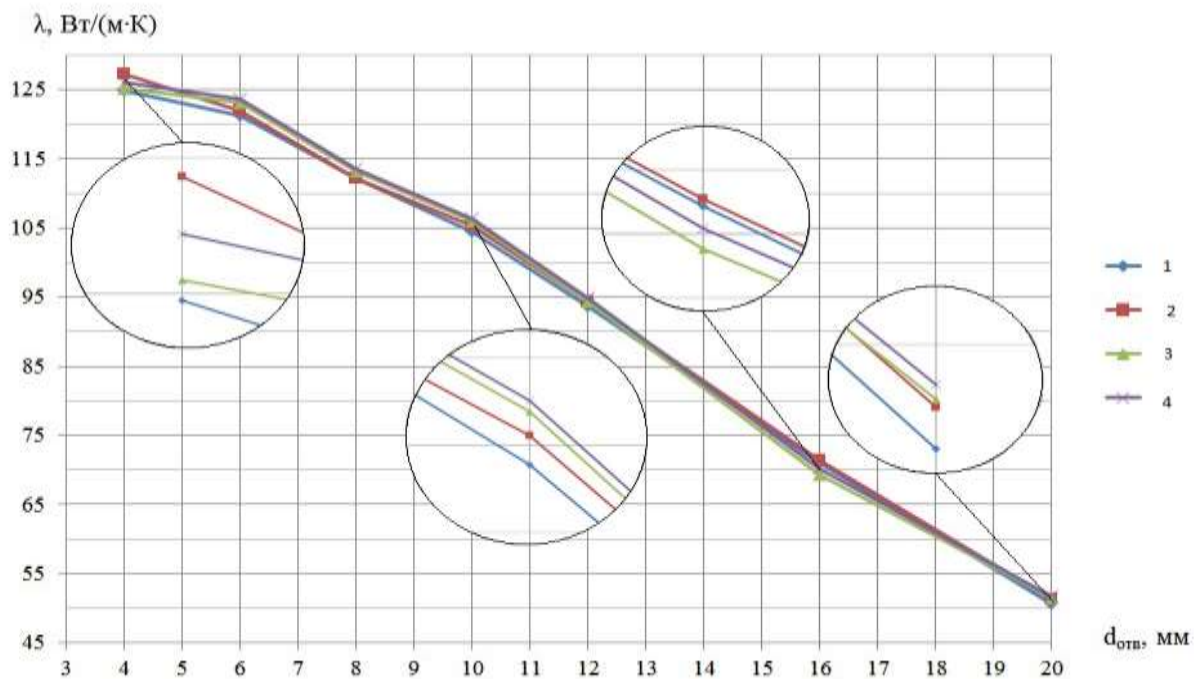
Розрахунок коефіцієнта електронної теплопровідності зразків з міді

$d_{\text{отв}}$ , мм	Т, К				R, Ом				$\rho$ , Ом·м			
	Кор. без ізол.	Кор. з ізол.	Шах. без ізол.	Шах. з ізол.	Кор. без ізол.	Кор. з ізол.	Шах. без ізол.	Шах. з ізол.	Кор. без ізол.	Кор. з ізол.	Шах. без ізол.	Шах. з ізол.
4	302	302,5	301	303	2,4745E-05	2,4504E-05	2,5301E-05	2,5215E-05	1,9888E-08	1,9694E-08	2,0553E-08	2E-08
6	301,5	303	300	301,5	2,6069E-05	2,5972E-05	2,5776E-05	2,6107E-05	2,0952E-08	2,0874E-08	2,0939E-08	2,1E-08
8	301,5	303,5	304,5	305,5	2,8071E-05	2,8261E-05	2,8082E-05	2,8213E-05	2,2561E-08	2,2714E-08	2,2812E-08	2,3E-08
10	306,5	310,5	306	308,5	3,0586E-05	3,0782E-05	3,0845E-05	3,0965E-05	2,4583E-08	2,4740E-08	2,5056E-08	2,5E-08
12	304,5	306	303	303,5	3,4512E-05	3,4298E-05	3,3847E-05	3,3867E-05	2,7738E-08	2,7566E-08	2,7495E-08	2,8E-08
16	304,5	303	305	306	4,5565E-05	4,4840E-05	4,6480E-05	4,6480E-05	3,6622E-08	3,6039E-08	3,7757E-08	3,8E-08
20	305	304,5	305	307,5	6,4505E-05	6,4464E-05	6,9781E-05	7,0036E-05	5,1844E-08	5,1812E-08	5,6686E-08	5,7E-08

Продовження таблиці 5.4

$d_{\text{отв}}$ , мм	$\sigma$ , См/м				L, Вт·Ом·К <sup>-2</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)			
	Кор. без ізол.	Кор. з ізол.	Шах. без ізол.	Шах. з ізол.		Кор. без ізол.	Кор. з ізол.	Шах. без ізол.	Шах. з ізол.
4	50280730	50775107	48654709	48819987	2,363E-08	358,8480	362,9763	346,0934	349,5765
6	47726339	47905633	47757109	47151240		340,0536	343,0293	338,5800	335,9560
8	44323186	44025348	43835953	43632818		315,8059	315,7646	315,4422	315,0115
10	40678556	40419909	39909344	39754434		294,6443	296,5916	288,6011	289,8296
12	36050662	36275467	36369938	36347851		259,4194	262,3230	260,4277	260,6990
16	27305724	27747557	26484533	26484487		196,4911	198,6870	190,8948	191,5204
20	19288290	19300510	17640976	17576691		139,0258	138,8859	127,1524	127,7274

З рис. 5.10 слідує, що діелектрична ізоляція в отворах пластин, що моделюють переріз конструкції теплового захисту енергетичного обладнання найбільш впливає на результат при малих діаметрах отворів. Так, для коридорного розташування отворів при їх діаметрі 4 мм для дюралюмінію коефіцієнт теплопровідності без електричної ізоляції більше, ніж з ізоляцією, на 1,82 %. Для діаметрів отворів 20 мм коефіцієнт теплопровідності без електричної ізоляції більше, ніж з ізоляцією в отворах, на 1,42 %.

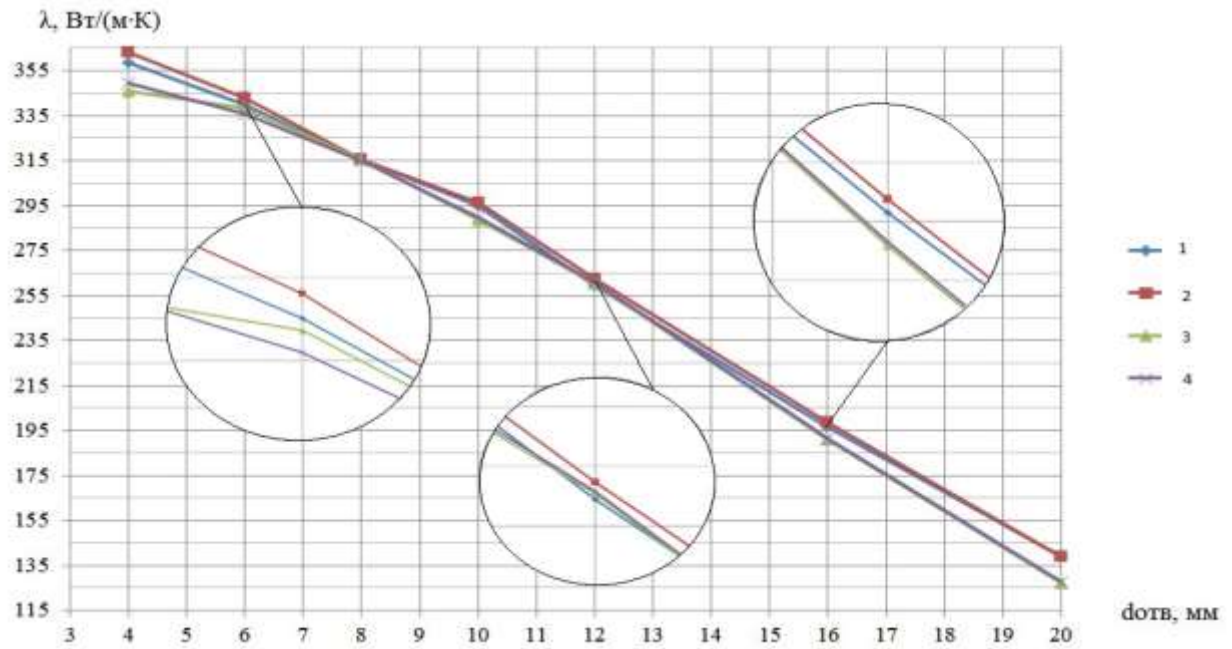


1-коридорне розташування отворів, з ізоляцією; 2 - коридорне розташування отворів, без ізоляції; 3- шахове розташування отворів, з ізоляцією; 4 – шахове розташування отворів без ізоляції

Рисунок 5.10 – Залежність електронної складової ефективного коефіцієнта теплопровідності від діаметра отворів в дослідних зразках з дюралюмінію

Як можна побачити з рис. 5.11, коефіцієнт теплопровідності для мідних пластин, аналогічно дюралюмінію, з електричною ізоляцією більше, ніж без ізоляції, а електрична ізоляція має більший вплив при діаметрах отворів менше за 6 мм.





1-коридорне розташування отворів, з ізоляцією; 2 - коридорне розташування отворів, без ізоляції; 3- шахове розташування отворів, з ізоляцією; 4 – шахове розташування отворів без ізоляції

Рисунок 5.11 – Залежність електронної складової ефективного коефіцієнта теплопровідності від діаметра отворів в дослідних зразках з міді

Електромагнітне поле, що виникає в отворах електропровідних структур під час протікання струму крізь них впливає на коефіцієнт теплопровідності при мінімальних діаметрах отворів до 6 мм. Це можна пояснити тим, що створюється додатковий градієнт фазових напруг на поверхні пори. Це означає, що для зменшення теплопровідності пористих електропровідних виробів з невеликим розміром пір (до 6 мм) необхідна діелектрична ізоляція по внутрішній поверхні пір. 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 крізь нього, збільшують коефіцієнт теплопровідності до 2 % завдяки створенню додаткового градієнту фазових напруг на поверхні пори.

## 5.2 Дослідження впливу форми пір на коефіцієнт теплопровідності пористих структур та конструкцій теплового захисту без врахування конвекції всередині пір

У зв'язку зі складнощами створення фізичних моделей пористих структур та конструкцій теплового захисту з різноманітною формою пір було проведено дослідження впливу форми пір на коефіцієнт теплопровідності пористих структур та конструкцій теплового захисту без врахування конвекції всередині пір шляхом комп'ютерного моделювання. Числове моделювання з використанням комп'ютерної техніки широко використовується провідними спеціалістами країни [149, 150]. Для оцінки похибки комп'ютерної моделі було проведено моделювання теплового потоку крізь переріз конструкції теплового захисту енергетичного обладнання й порівняння результатів комп'ютерного моделювання з отриманими раніше експериментальними даними. Для комп'ютерного моделювання та проведення теплових розрахунків було використано спеціальне програмне забезпечення. Змодельовані комп'ютерні зразки, які відповідали фізичним моделям нержавіючих пластин по геометричним розмірам, та теплофізичним характеристикам матеріалу зображені на рис. 5.12.

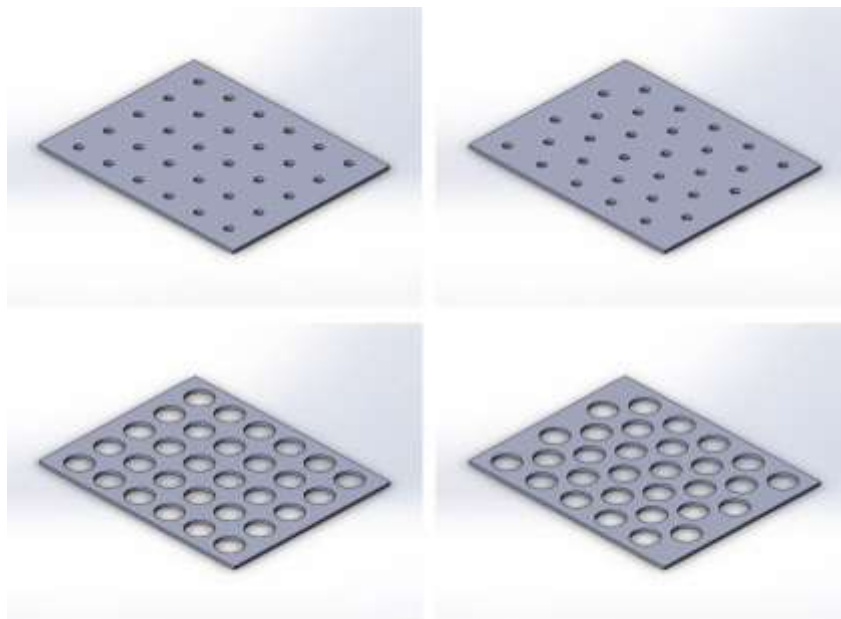


Рисунок 5.12 – Комп'ютерна модель перерізу конструкції теплового захисту енергетичного обладнання з отворами діаметрами 5 та 15 мм



Під час моделювання теплообмінних процесів у конструкції теплового захисту енергетичного обладнання при протіканні теплового потоку задавалися наступні граничні умови: величина теплового потоку з боку енергетичного обладнання складала 0,1 Вт; інтервал запису результатів моделювання - 1 с; температура навколишнього середовища - 20 °С; коефіцієнт тепловіддачі - 23 Вт/м<sup>2</sup>·К за температури середовища 20 °С. Конвективна поверхня знаходилась з протилежного боку від поверхні, до якої підводилось тепло. Усі ж інші бокові поверхні адіабатні. Блочна сітка мала розміри елементів 0,0004 м (рис. 5.13). Кількість елементів моделі перерізу конструкції теплового захисту енергетичного обладнання складала більше 250 000.

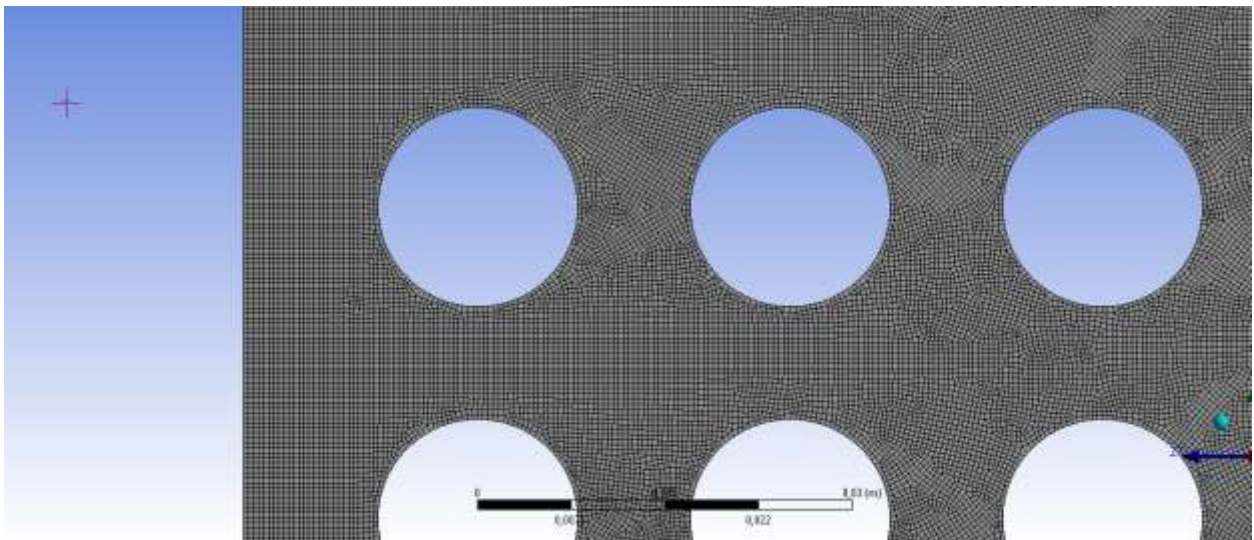


Рисунок 5.13 – Частина сітки на комп'ютерній моделі перерізу конструкції теплового захисту енергетичного обладнання

Визначення температур по перерізу конструкції теплового захисту енергетичного обладнання дозволить визначити коефіцієнт теплопровідності за наступної формулою

$$\lambda = \frac{Q \cdot l}{(T_2 - T_1) A},$$

де  $l$  – довжина зразка;

$Q$  – підведений тепловий потік;

$T_1, T_2$  – температури на протилежних кінцях зразка;

$A$  – площа поперечного перетину.

При комп'ютерному моделюванні теплообмінних процесів перерізу конструкції теплового захисту енергетичного обладнання для дослідження електронної складової використовувалися адіабатні поверхні в отворах, це дозволяло не враховувати конвективну та радіаційну складову ефективного коефіцієнта теплопровідності. Отримані данні під час комп'ютерного моделювання перерізу конструкції теплового захисту енергетичного обладнання з нержавіючої сталі відображені у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

Результати моделювання та розрахунків конструкції теплового захисту енергетичного обладнання з нержавіючої сталі без врахування конвективної складової ефективного коефіцієнту теплопровідності

$d_{\text{отв}}$ , мм	Коридорне розташування пор			Шахове розташування пор		
	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\lambda_{\text{к}}$ , Вт/(м·К)	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\lambda_{\text{ш}}$ , Вт/(м·К)
3,2	40,906	45,281	14,2857	40,91	45,284	14,2889
4	40,907	45,371	14,00089	40,914	45,375	14,0103
5	40,91	45,515	13,5722	40,92	45,524	13,5751
6	40,913	45,699	13,0589	40,928	45,711	13,0671
8	40,922	46,204	11,8326	40,949	46,232	11,83039
10	40,938	46,947	10,4010	40,982	47,002	10,382
12	40,962	48,042	8,8276	41,028	48,155	8,7694
15	41,04	50,924	6,3233	41,146	51,28	6,1673

Аналізуючи таблицю 5.5 та порівнюючи результати комп'ютерного моделювання з результатами емпіричних досліджень (табл. 5.1), можна зробити висновки про відповідності комп'ютерного моделювання дійсному експерименту. Так, максимально відносна похибка між комп'ютерним моделюванням та натурним експериментом склала 0,89%, що пояснюється фонною складовою ефективного коефіцієнту теплопровідності електропровідних конструкцій. Середня відносна похибка між комп'ютерним моделюванням та натурним експериментом по шаховому та коридорному розташування пір склала 0,31%. Комп'ютерне моделювання теплопередачі конструкції теплового захисту енергетичного обладнання цілком приємне для дослідження впливу отворів на ефективний коефіцієнт теплопровідності без врахування конвективних потоків, а значить й цілком ефективно для дослідження впливу пір на ефективний коефіцієнт теплопровідності пористих матеріалів. Тому для дослідження впливу форми пір на коефіцієнт теплопровідності були змодельовані перерізи конструкції теплового захисту енергетичного обладнання з отворами різних форм: коло, еліпс, квадрат, рівнобічний трикутник та шестикутник. Їх геометричні розміри представлено на рис. 5.14.

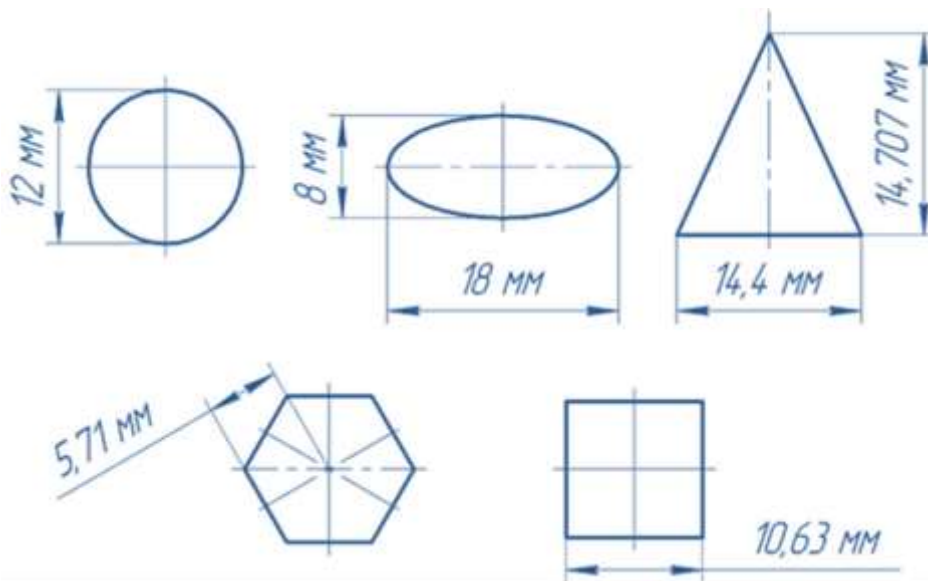


Рисунок 5.14 – Геометричні розміри перерізу каналів конструкції теплового захисту енергетичного обладнання, що досліджувались

Розміри усіх каналів розраховані таких чином, щоб їх площі були однакові і дорівнювали  $0,000113094 \text{ м}^2$ . За матеріал конструкції теплового захисту енергетичного обладнання було обрано нержавіючу сталь AISI 304. Канали розміщені в коридорному та шаховому порядках, відстань між центрами каналів однакова в усіх випадках. Бокові поверхні конструкції теплового захисту енергетичного обладнання задавалися адіабатні. Внутрішня поверхня каналів задана адіабатною, щоб дослідити зміну тільки коефіцієнта теплопровідності конструкції від форми каналу.

За результатами комп'ютерного моделювання до таблиці 5.6 занесене коефіцієнт теплопровідності конструкції теплового захисту енергетичного обладнання з різною формою каналів.

Таблиця 5.6

Дослідження коефіцієнту теплопровідності конструкції теплового захисту енергетичного обладнання з різною формою каналів

Форма пор	$\lambda_k, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\lambda_{ш}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
Коло	8,8277	8,7695
Еліпс 1	10,4393	10,1692
Еліпс 2	5,1833	6,3952
Квадрат	8,5127	8,2118
Рівн. трик.	8,2968	8,2683
Шестикутник	8,3769	8,2902

За еліпс 1 прийнято випадок, коли довша діагональ еліпса розташована паралельно тепловому потоку, а за еліпс 2 – випадок, коли довша діагональ розташована перпендикулярно тепловому потоку. На рис. 5.15 зображено дослідні перерізи конструкції теплового захисту енергетичного обладнання з розподілом температури в них в кінцевий момент часу.

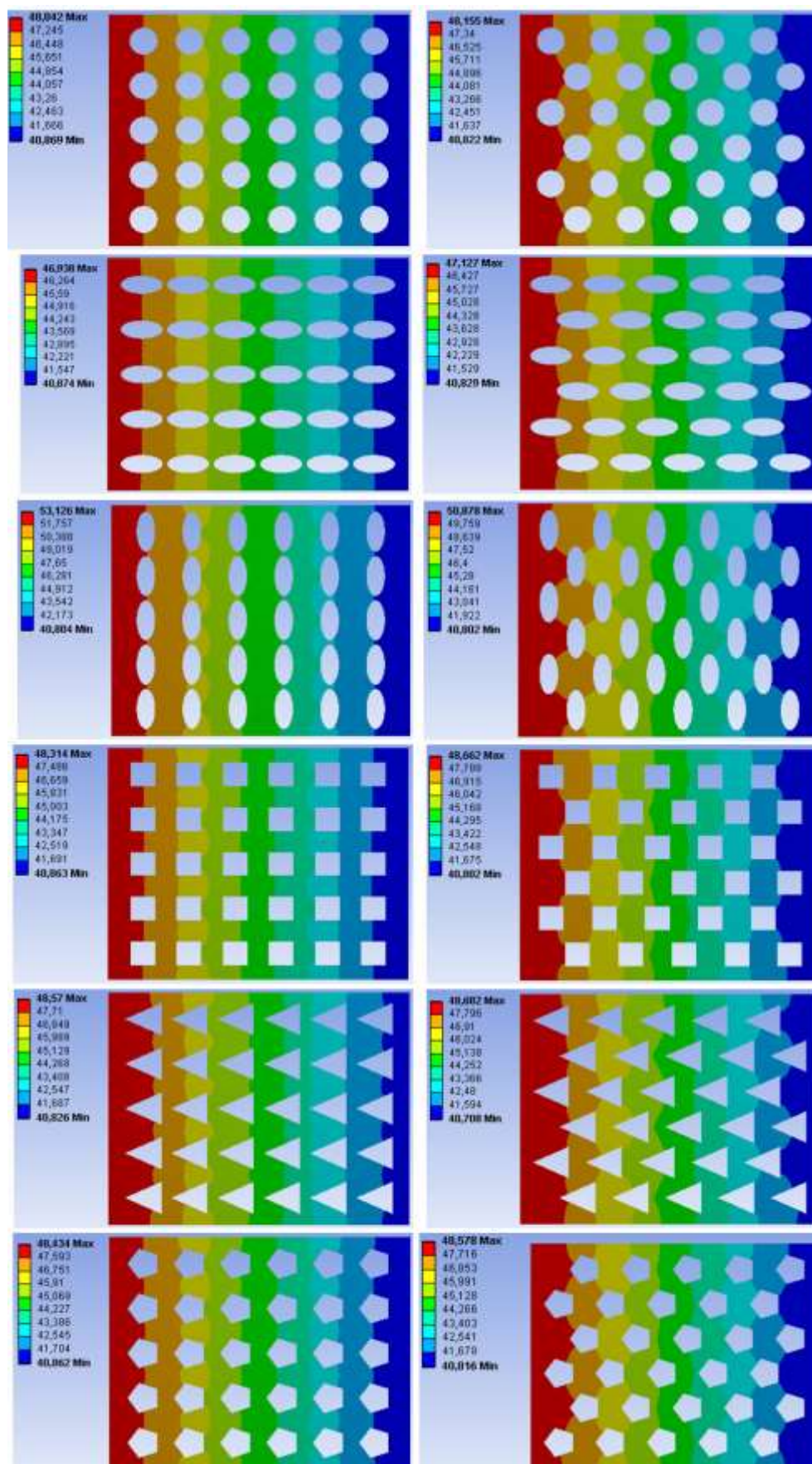


Рисунок 5.15 – Розподіл температури в перетині конструкції теплового захисту енергетичного обладнання з різною формою каналів



З рис. 5.15 можна побачити холодні мости при коридорному розташуванні каналів, крім еліпсів, розташованих перпендикулярно тепловому потоку. З шахового розташування можна побачити, що найменше розсіювання температури при еліптичній формі пір, розташованих уздовж теплового потоку. В усіх інших випадках шахове розташування пір більше за коридорне розсіює теплову енергію. Враховуючі, що досліджувався коефіцієнт теплопровідності конструкції теплового захисту енергетичного обладнання без врахування конвекції всередині каналів, аналогічні результати можна очікувати й для пористих матеріалів з різною формою пір.

З рисунку 5.16 видно основні закономірності впливу форми пір на коефіцієнт теплопровідності без врахування конвекції всередині пір у пористих матеріалів та виробів. Можна стверджувати, що на коефіцієнт теплопровідності у пористих матеріалів та виробів більше впливає форма пір, чим їх розташування (при однаковій пористості). Так, при формі пір - еліпс, що розташований більшим діаметром перпендикулярно тепловому потоку, у шаховому порядку й при розташуванні даного еліпса більшим діаметром вздовж теплового потоку, різниця в коефіцієнті теплопровідності матеріалу склала 59%. При заміні форми пір з кола на еліпс розташований більшим діаметром перпендикулярно тепловому потоку теплопровідність матеріалу знизиться на 27%. Різниця між шаховим та коридорним розташуванням пір у формі кола різниця склала усього 0,66%.

Найліпшою формою пір у пористих матеріалах та виробках є форма витягнутого еліпса розміщеного більшим діаметром перпендикулярно тепловому потоку. При чому, при коридорному розташуванні таких пір коефіцієнт теплопровідності пористих матеріалів та виробів найменший. Це пояснюється малою відстанню між порами, що спричиняє великі розсіювання теплової енергії.

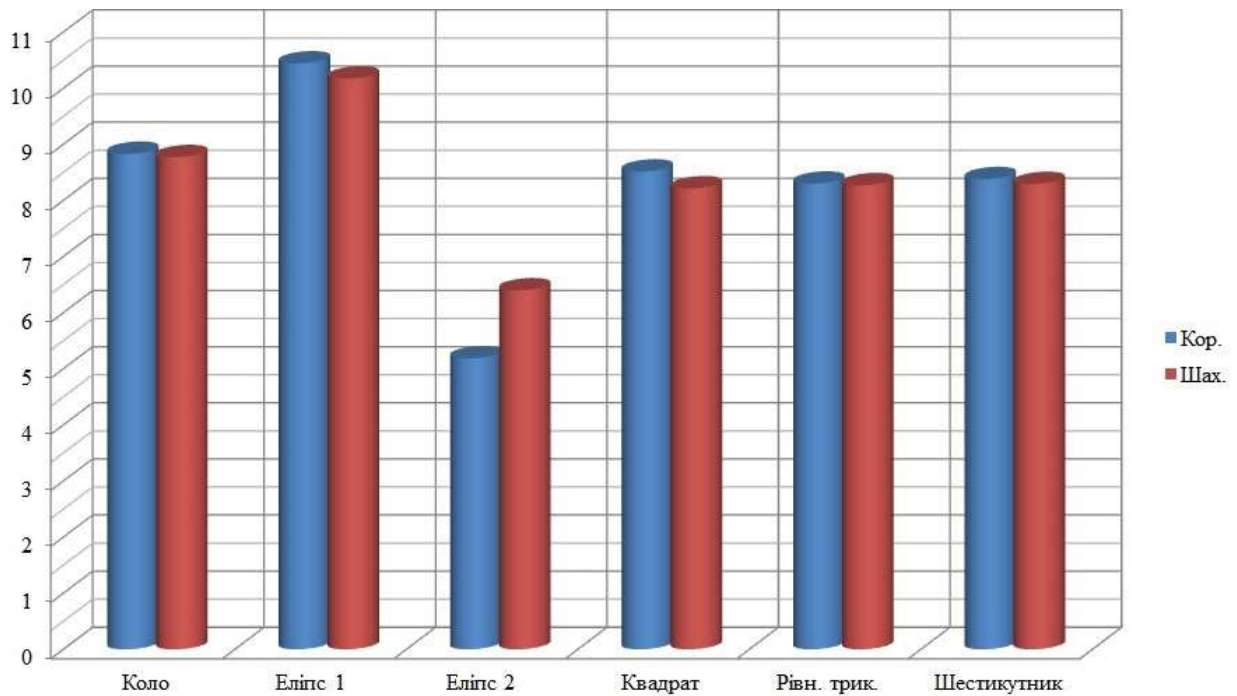


Рисунок 5.16 – Коефіцієнти теплопровідності пористих матеріалів та виробів з різною формою пір

З рис. 5.16 можна побачити, що у пористих матеріалів та виробів з порами в формі квадрату, рівностороннього трикутника та шестикутника дуже близький за значенням коефіцієнт теплопровідності при однаковій загальній пористості та він менший ніж у пористих матеріалів та виробів з порами в формі кола на 3,57 % - 6 %.

Оскільки розташування пір практично не впливає на коефіцієнт теплопровідності пористих структур та конструкцій теплового захисту без врахування конвекції всередині пір, то можна зробити висновок, що для пористих матеріалів та виробів з мікропорами в першу чергу необхідно зосереджуватись на формі пір та загальній пористості.

Для визначення впливу форми пір на ефективний коефіцієнт теплопровідності пористих структур та конструкцій теплового захисту, необхідно дослідити конвективну складову у ефективному коефіцієнті теплопровідності.

### 5.3 Дослідження зміни конвективної складової ефективного коефіцієнту теплопровідності електропровідних пористих структур від розміру та розташування пір

Було розроблено комп'ютерні моделі, що симулюють перетин електропровідних конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання, в яких розраховувався повний ефективний коефіцієнт теплопровідності пористої конструкції (з врахуванням конвективної та радіаційної складової). На рис. 5.17 відображено частину сітки перетину конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання з повітрям у каналах. Кількість елементів сітки по перетину складала близько 550 000. Кількість вузлів складала більше двох мільйонів. Приймалася кубічна сітка, з автоматичним вибором близькості й кривизни елементів. Згладжування та актуальність центрів елементів – середнє. Метод побудови – механічний автоматичний з складною паралельною побудовою.

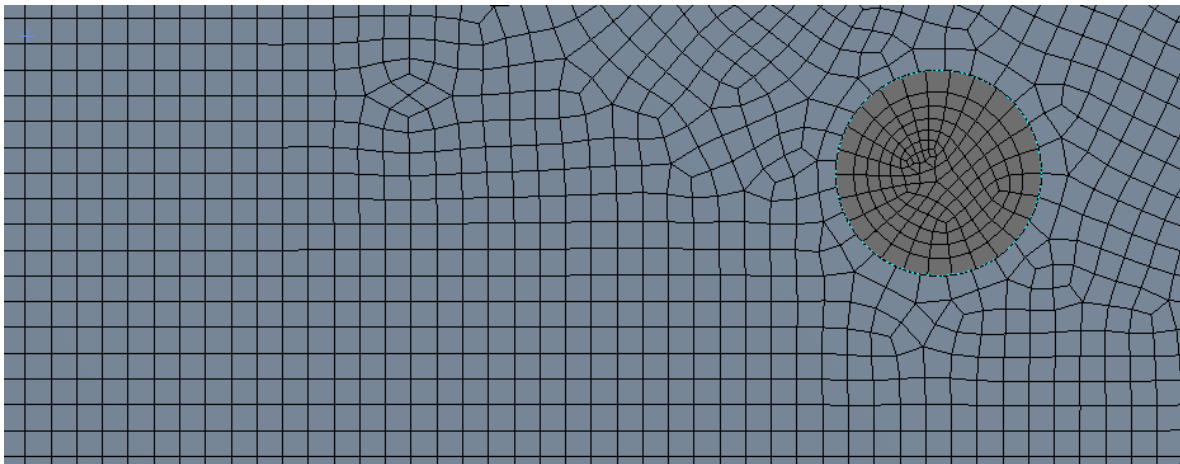


Рисунок 5.17 – Частина сітки комп'ютерної моделі перетину електропровідних конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання з врахуванням повітря у каналах

Отримані значення температур та ефективного коефіцієнту теплопровідності моделей під час проходження теплового потоку крізь електропровідні конструкції теплового захисту енергетичного обладнання



наведено у таблиці 5.7. Максимальна конвективна складова у ефективному коефіцієнті теплопровідності електропровідних конструкцій по результатам комп'ютерного моделювання склала 40,25% (при діаметрі каналів 15 мм). Середній вплив конвекції повітря по усім діаметрам склав 24,69% від ефективного коефіцієнта теплопровідності. В абсолютному значенні конвекція повітря у каналах при їх діаметрі 15 мм з коридорним розташуванням збільшує ефективний коефіцієнт теплопровідності електропровідних конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання на 4,26 Вт/(м·К), а у шаховому – на 4,15 Вт/(м·К).

За даними комп'ютерного моделювання (табл. 5.5, табл. 5.7) побудовано залежність відношення різниці ефективного та електронного коефіцієнта до ефективного коефіцієнта теплопровідності від діаметра отворів для комп'ютерних моделей з нержавіючої сталі (рис. 5.18).

Таблиця 5.7

Результати моделювання та розрахунків ефективного коефіцієнта теплопровідності перетину конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання з нержавіючої сталі при різних діаметрах каналів

$d_{\text{отв}}$ , мм	Коридорне розташування пір			Шахове розташування пір		
	$T_1$ , °C	$T_2$ , °C	$\lambda_k$ , Вт/(м·К)	$T_1$ , °C	$T_2$ , °C	$\lambda_{ш}$ , Вт/(м·К)
3,2	34,334	37,918	17,438616	34,295	37,944	17,128
4	33,241	36,853	17,303433	33,183	36,786	17,3467
6	31,166	34,784	17,2747374	31,185	34,796	17,3082
8	29,596	33,37	16,5606783	29,626	33,403	16,5475
10	26,865	30,73	16,1707633	28,366	32,459	15,27
12	28,314	33,064	13,1578947	27,303	31,93	13,5077
15	25,835	31,74	10,5842506	25,844	31,903	10,3152

З рис. 5.18 видно збільшення конвективної складової ефективного коефіцієнту теплопровідності електропровідних конструкцій теплового захисту та пористого матеріалу, як різниці між ефективним коефіцієнтом теплопровідності (повним) та його електронною складовою. З ростом діаметру пір у пористих електропровідних виробках та ростом каналів у конструкцій теплового захисту конвективна складова ефективного коефіцієнту теплопровідності зростає як для коридорного розташування пір, так й для шахового. При коридорному розташуванні пір ріст конвективної складової незначно вищий ніж при шаховому розташуванні, від 1,5 % (при діаметрі пір 3,5 мм.) до 0,04% (при діаметрі пір 15 мм.). Тобто, різниця конвективної складової ефективного коефіцієнту теплопровідності між коридорним та шаховим розташуванням пір з ростом діаметру пір зникає.

З рисунку 5.18 також видно, що конвективна складова ефективного коефіцієнту теплопровідності з збільшенням діаметру каналів зростає по логарифмічному закону.

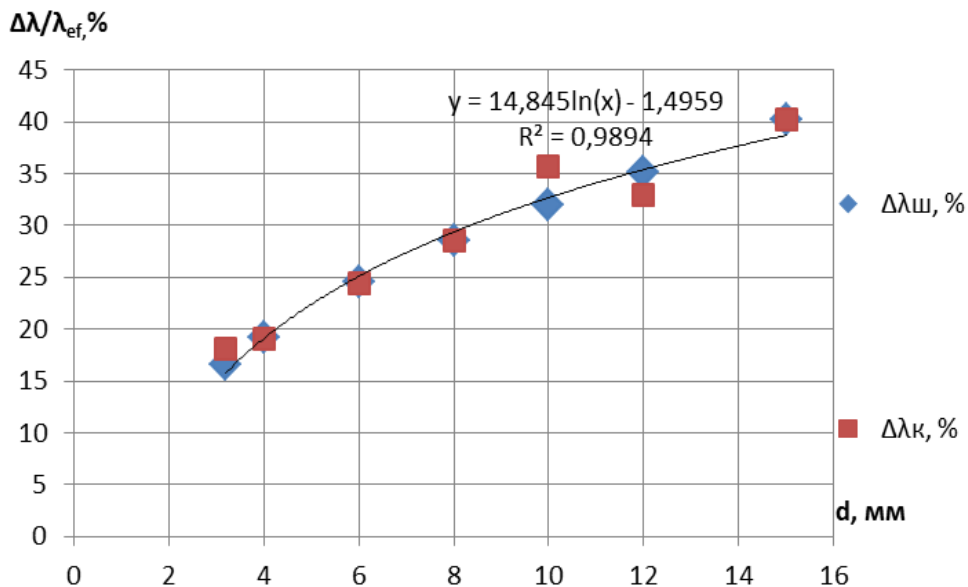


Рисунок 5.18 – Залежність відношення конвективної складової до повного ефективного коефіцієнта теплопровідності від діаметра пір для комп'ютерних моделей електропровідних пористих структур

Отже розташування каналів у електропровідних конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання має незначний вплив на конвективну складову ефективного коефіцієнту теплопровідності, в порівнянні з розміром каналів. При збільшенні розміру каналів з 3,2 мм до 15 мм конвективна складова ефективного коефіцієнту теплопровідності збільшується у 2,5 рази.

Розподіл теплового потоку по перетину конструкції теплового захисту з отворами діаметром 8 мм розташованими у коридорному та шаховому порядку відображено на рис. 5.19.

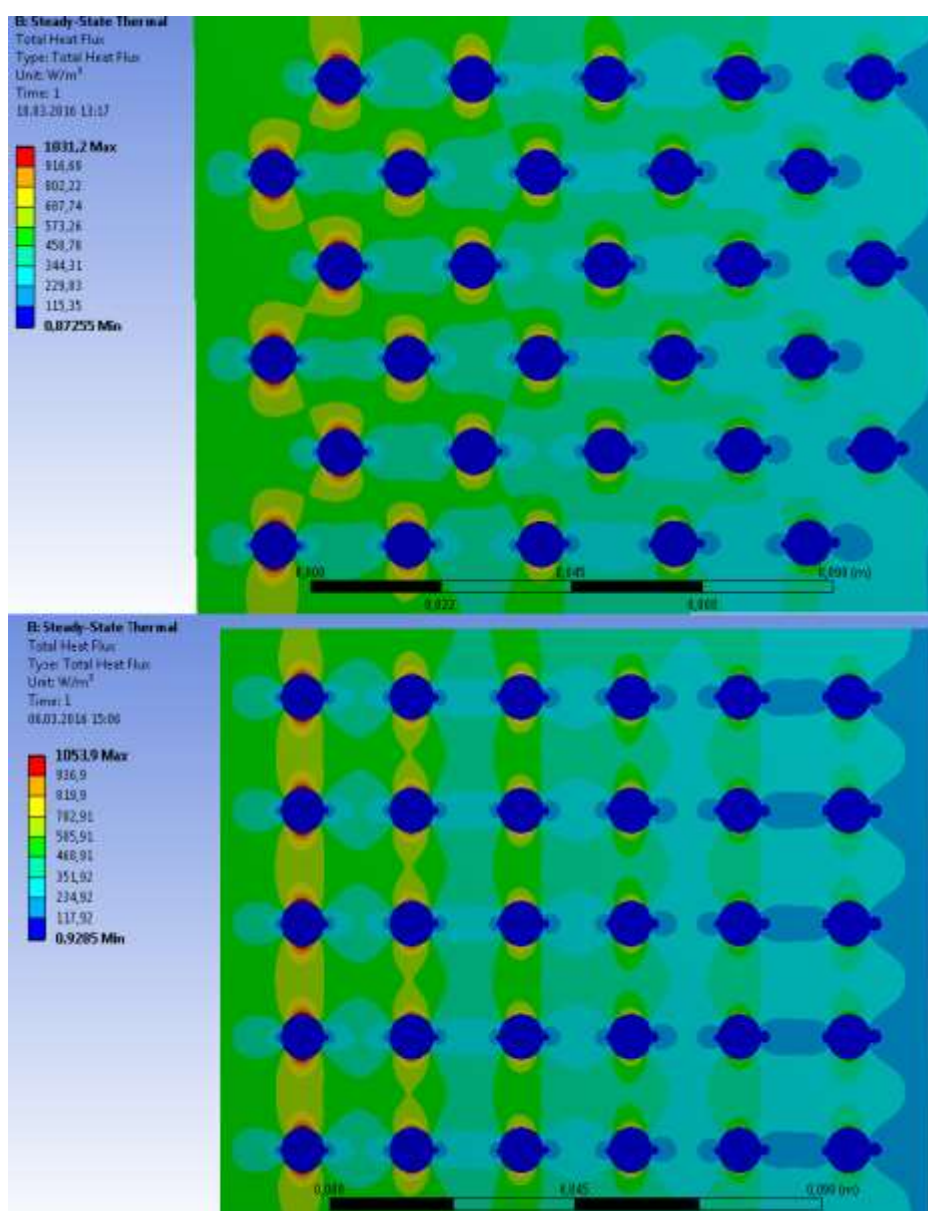


Рисунок 5.19 – Розподіл теплового потоку по перетину електропровідної конструкції теплового захисту з каналами діаметром 8 мм

З рис. 5.19 видно, що максимальний градієнт температури направлено по найкоротшій відстані між каналами конструкції теплового захисту, а по аналогії й між порами електропровідних пористих виробів та матеріалів, що сприяє збільшенню конвекції у даному напрямі. Так, у конструкції теплового захисту з шаховим розподілом каналів та пір, конвекція буде максимальною у напрямі  $45^\circ$  до теплового потоку, що впливає на тепловий потік який протікає крізь пористі структури (рис. 5.19, 5.20).

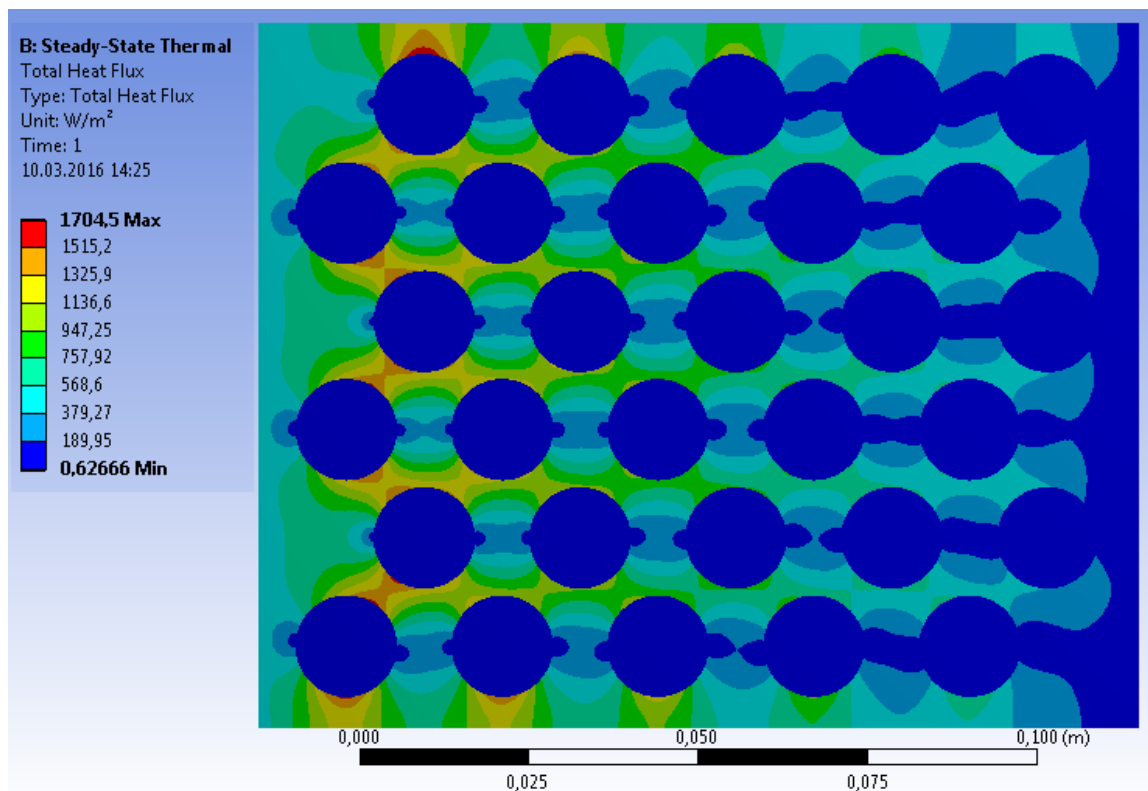


Рисунок 5.20 – Розподіл теплового потоку у пористій конструкції теплового захисту з каналами 15 мм розташованими у шаховому порядку

На рис. 5.21 наведено розподіл температур по перетину конструкції теплового захисту енергетичного обладнання. Можна побачити, що за температур повітря по порі більше  $31^\circ\text{C}$  в каналах діаметром 8 мм інтенсифікується енергообмін у пористій структурі завдяки передачі теплоти конвекцією, а при нижчих температурах наявність повітря збільшує тепловий опір пористої структури (конвекція незначна або відсутня). Це підтверджує

висловлену раніше гіпотезу про вплив на конвективні рухи не тільки розміру пори, а й температури.

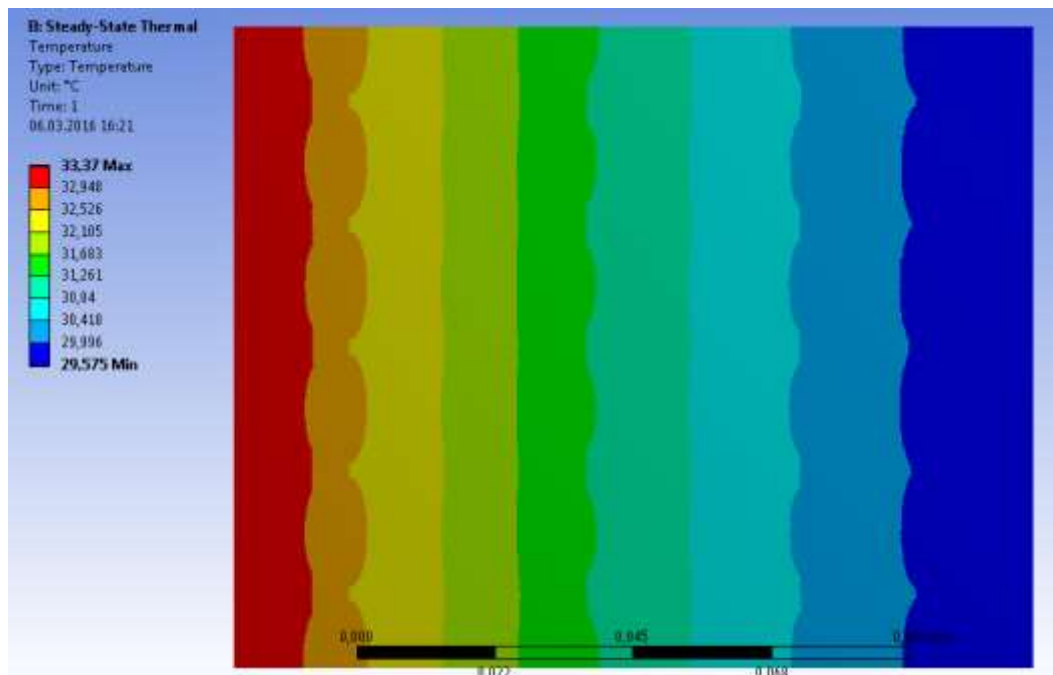


Рисунок 5.21 – Розподіл температури вздовж пластини з отворами 8 мм, розташованими у коридорному порядку

Також, аналогічні моделювання було проведено для пористих конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання з міді та дюралюмінію, що підтвердило логарифмічне збільшення конвективної складової ефективного коефіцієнту теплопровідності при збільшенні діаметру пір у електропровідних пористих структурах. У процентному відношенні конвективна складова ефективного коефіцієнту теплопровідності електропровідних пористих структур найменша у міді 14 % (для 15 мм), що пов'язано з високим коефіцієнтом теплопровідності міді. У абсолютному значенні конвективна складова ефективного коефіцієнту теплопровідності у мідних пористих конструкціях теплового захисту відрізняється від конвективної складової у сталевих пористих конструкціях теплового захисту менше ніж на 5,4 %.

Для знаходження узагальненого рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів та виробів, які

використовуються для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок, необхідно провести аналогічні дослідження для пористих теплоізоляційних матеріалів. На відміну від електропровідних виробів, теплопровідність теплоізоляційних матеріалів дуже мала, тому невеликі зміни руху потоків конвекції у порах будуть значно впливати на ефективний коефіцієнт теплопровідності цих теплоізоляційних матеріалів.

#### **5.4 Дослідження впливу форми пір на тепловий опір пористих теплоізоляційних матеріалів**

Експериментально доведено, що форми пір, які близькі до сфери, задають практично однаковий коефіцієнт ефективної теплопровідності пористого матеріалу [151], так як конвективні потоки газу в них мають однакову траєкторію та швидкість. Найбільший вплив на значення коефіцієнта ефективної теплопровідності, а значить і на термічний опір теплоізоляційного матеріалу та конструкцію теплового захисту енергетичного обладнання, дають еліптичні пори, розташовані більшим діаметром перпендикулярно та вздовж теплового потоку. Тому, для знаходження узагальненого рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів та виробів, які використовуються для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок, необхідно визначитись з впливом кута нахилу еліптичної пори по відношенню до теплового потоку. Оскільки розглядаються граничні варіанти форми пір, що впливають на теплофізичні властивості пористого теплоізоляційного матеріалу та конструкції теплового захисту енергетичних установок, то вплив будь-якої форми пори буде знаходитись у цьому діапазоні.

Було побудовано комп'ютерні трьохвимірні моделі теплоізоляційного матеріалу з порами. За геометричну форму моделі було обрано куб зі сторонами 0,1 м, а в якості пір - еліпс з розмірами діаметрів 7x3 мм. Довжина пори – 14 мм. Сітка вибиралася тетраедна з функцією FaceMesh на зовнішній

поверхні. Також, було включено функцію автоматичного зменшення сітки поблизу пір для більш кращої симуляції проходження теплового потоку крізь теплоізоляційний пористий матеріал. Теплоізоляційний матеріал задавався з коефіцієнтом теплопровідності  $0,036 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Комп'ютерна модель з нанесеною сіткою відображена на рисунку 5.22.

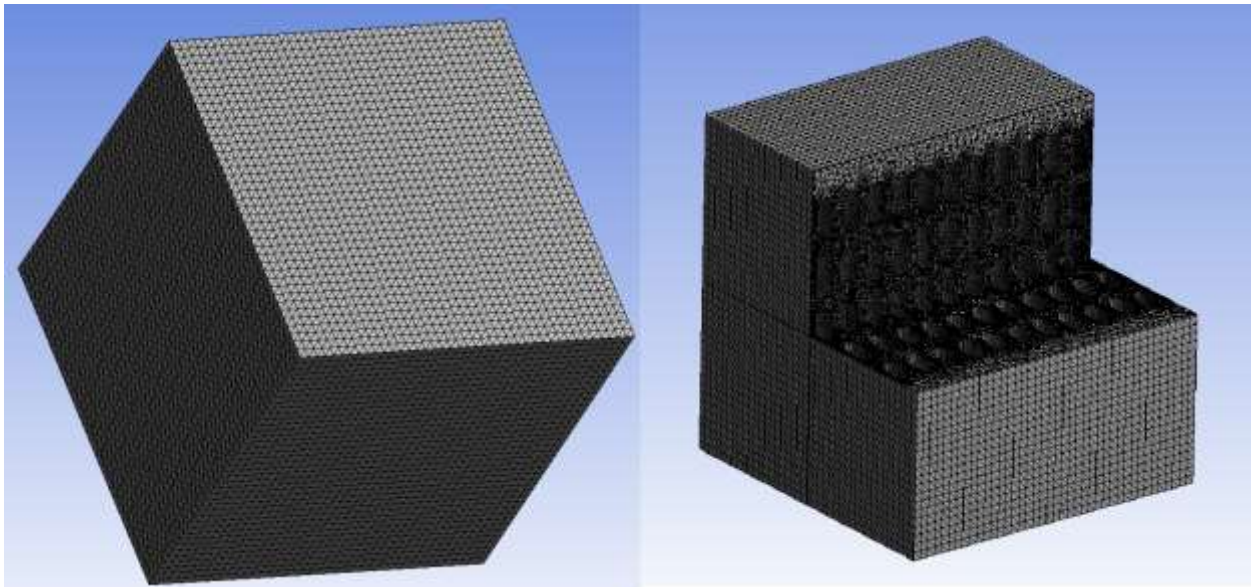


Рисунок 5.22 – Комп'ютерна модель теплоізоляційного матеріалу з порами: зовнішній вигляд та з розрізом

Пори – замкнуті, наповнені повітрям з атмосферним тиском. Початкова температура приймалася  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коефіцієнт теплопровідності повітря задавався  $0,026 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу задавався  $0,036 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Сітка на пори наносилася окремо автоматичним методом для врахування конвективних потоків всередині пори. Пори з нанесеною сіткою відображено на рис. 5.23.



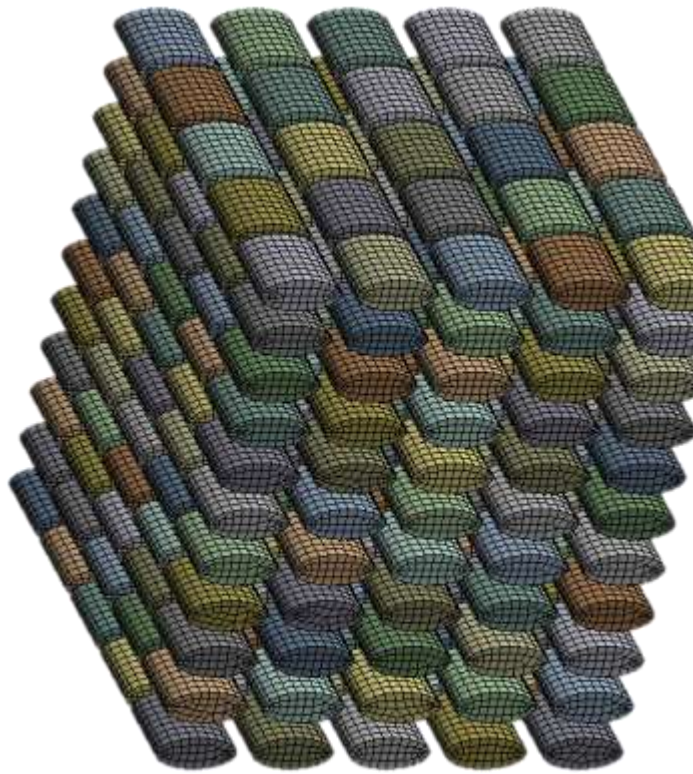


Рисунок 5.23 – Комп’ютерна модель пір в теплоізоляційному матеріалі з нанесеною сіткою

Досліджено зміну теплового опору теплоізоляційного пористого матеріалу від кута нахилу більшого діаметру пори по відношенню до напрямку теплового потоку. Будувалися комп’ютерні моделі теплоізоляційного матеріалу з кутом нахилу, більшим діаметром до теплового потоку від 0 град. (рис.5.23) до 90 град. з шагом у 10 град. При куті нахилу 0 град. еліптичні пори у теплоізоляційному матеріалі розташовувались вздовж теплового потоку, а при 90 град. - перпендикулярно.

Тепловий потік задавався  $100 \text{ Вт/м}^2$  та підводився до однієї поверхні теплоізоляційного матеріалу, а протилежна поверхня охолоджувалась шляхом природної конвекції з коефіцієнтом тепловіддачі  $23 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

Результати досліджень теплового опору теплоізоляційного матеріалу з еліптичними порами відображені на рис. 5.24. Як можна побачити з цього рисунку, зміна теплового опору теплоізоляційного матеріалу від кута нахилу



еліптичних пір до теплового потоку найточніше описується поліномом другого ступеню.

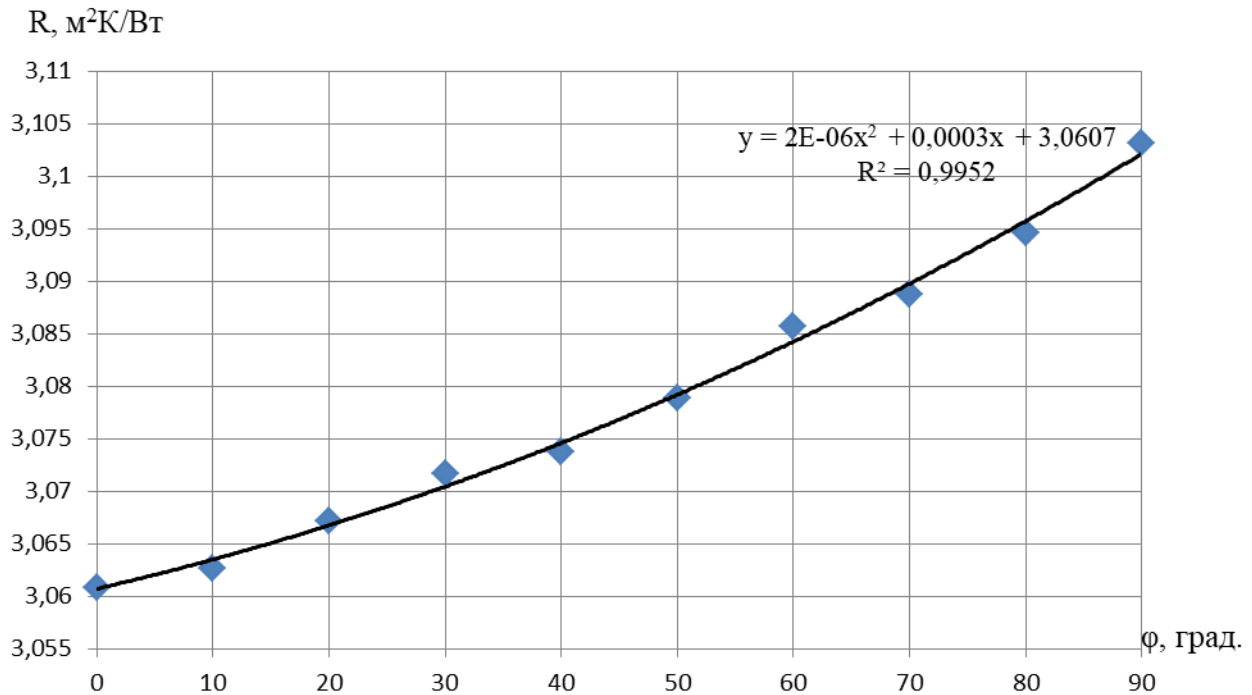


Рисунок 5.24 – Залежність теплового опору пористого теплоізоляційного матеріалу при різному куті нахилу еліптичних пір до теплового потоку

Результати комп'ютерного моделювання залежності теплового опору пористого теплоізоляційного матеріалу від кута нахилу еліптичних пір свідчать, що в пористому теплоізоляційному матеріалі при розташуванні еліптичних пір більшим діаметром вздовж теплового потоку тепловий опір теплоізоляційного матеріалу менший за тепловий опір того ж матеріалу з порами розташованими більшим діаметром перпендикулярно тепловому потоку на 1,38%. Ефективний коефіцієнт теплопровідності пористого теплоізоляційного матеріалу з еліптичними порами, розташованими більшим діаметром перпендикулярно тепловому потоку склав 0,03222 Вт/(м·К), а з порами розташованими більшим діаметром вздовж теплового потоку – 0,03267 Вт/(м·К).

Вже було доказано, що формами пір, як у теплоізоляційному пористому матеріалі, так і у електропровідних конструкціях теплового захисту

енергетичного обладнання, які найбільшим чином впливають на ефективний коефіцієнт теплопровідності пористої структури, є еліпс, розташований більшим діаметром вздовж теплового потоку та еліпс розташований більшим діаметром перпендикулярно тепловому потоку. Спираючись на результати комп'ютерного моделювання (рис. 5.24) можна стверджувати, що при габаритному розмірі пори 7 мм зміни теплового опору теплоізоляційного матеріалу в залежності від форми пори не суттєві та не перевищують 1,38%. Це пов'язано з низьким коефіцієнтом теплопровідності матеріалу та з низькою швидкістю руху конвективних потоків у порах.

### **5.5 Дослідження впливу конвекції у порах на тепловий опір пористих теплоізоляційних матеріалів**

Визначення впливу конвективних потоків у порах на тепловий опір матеріалу дуже складна задача, якою займаються багато вчених [152-155]. Характерною рисою багатьох досліджень конвекції у замкнутих порах є їхня застосовність тільки для вузького специфічного теплоізоляційного матеріалу або виробу [156]. Так, рішення трьохвимірної задачі термогравітаційної конвекції у наближенні Буссінеска наведено в статті [157], але отримані рішення прийнятні тільки для конкретних розмірів повітряного прошарку, що не дає можливості використовувати дану модель для створення узагальненого рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих структур.

Для дослідження впливу конвективних потоків в середині пір на тепловий опір пористих теплоізоляційних матеріалів та виробів було побудовано наступні комп'ютерні моделі крізь які протікав тепловий потік. Змодельований теплоізоляційний матеріал у вигляді куба зі сторонами 0,04 м та заданими теплофізичними характеристиками. У центрі моделі розташовувалася сферична пора, різного діаметру від 2 мм до 20 мм. На одну з поверхонь кубічної моделі задавався тепловий потік  $100 \text{ Вт/м}^2$  та  $10 \text{ Вт/м}^2$ , а протилежна поверхня теплоізоляційного матеріалу задавалося граничними умовами

третього роду з початковою температурою 22 °С. Інші поверхні теплоізоляційного матеріалу – адіабатні. Матеріал у порі – ідеальне повітря з тиском 1 ат. Сила тяжіння задавалася по осі паралельної до поверхонь нагріву та охолодження та дорівнювала  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

Сітка складалася з тетраїдерів. Для визначення впливу конвективних потоків у порах на тепловий опір матеріалу перевага комп'ютерної моделі надавалася методу розрахункової гідродинаміки. Пограничні розрахункові шари сітки вибиралися в кількості п'яти, як для пори, так і для матеріала. Теплоізоляційний матеріал та пору діаметром 20 мм з нанесеною сіткою відображено на рис. 5.25.

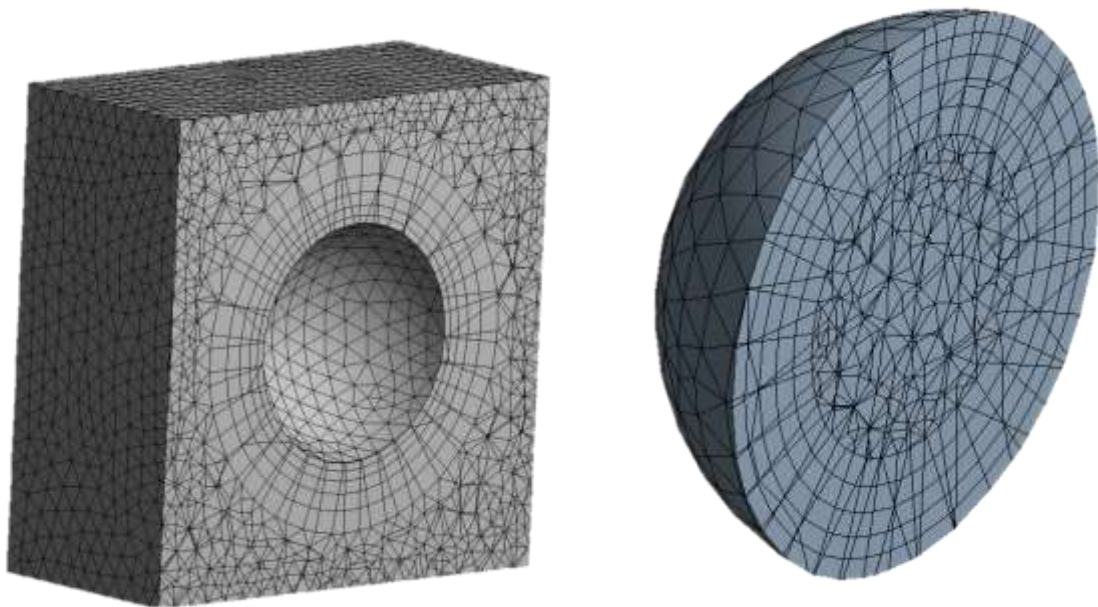


Рисунок 5.25 – Розрахункова сітка на теплоізоляційному матеріалі та порі по перерізу навпіл

Для визначення зміни руху конвективних потоків в середині пір теплоізоляційних матеріалів змодельовані розподіли швидкостей ліній току конвекції в замкнутій сферичній порі для різних діаметрів (рис. 5.26, рис. 5.27). З рис.5.26 видно, що конвекція у порі с діаметром 20 мм відбувається перпендикулярно тепловому потоку та вздовж нижнього та верхнього полюсів

пори по відношенню до гравітаційних ліній. Це пов'язано з тим, що рушійною силою конвекції є гравітаційні сили. Швидкість повітря у порі не перевищує  $0,00008$  м/с, при цьому швидкість біля центра пори найменша і наближається до нуля.

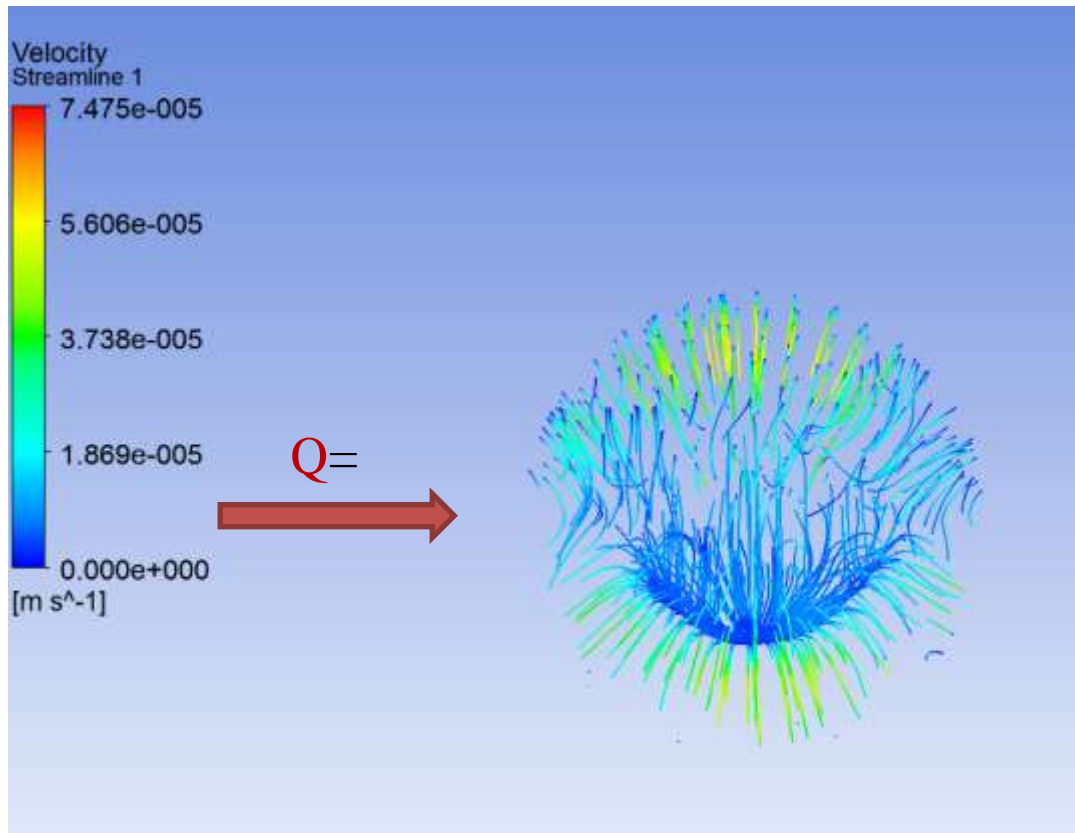


Рисунок 5.26 – Розподіл швидкості ліній току конвекції в замкнутій сферичній порі діаметром 20 мм

Необхідно відмітити зміну руху ліній току у порі при діаметрі 10 мм. На рис. 5.27. відображено розподіл швидкостей ліній току конвекції в замкнутій сферичній порі діаметром 10 мм. Як видно з рисунку, лінії току розташовано спірально. При цьому швидкість руху повітря у порі діаметром 10 мм менша за швидкість руху повітря у порі діаметром 20 мм на порядок, що збільшить тепловий опір пористого теплоізоляційного матеріалу. Спіральність руху ліній току у порі пояснюється самоорганізацією конвективної комірки подібно до комірки Бенара. Однак в комірці Бенара тепловий потік направлено вздовж

вектору гравітації, а на рис. 5.27 тепловий потік направлено перпендикулярно гравітації.

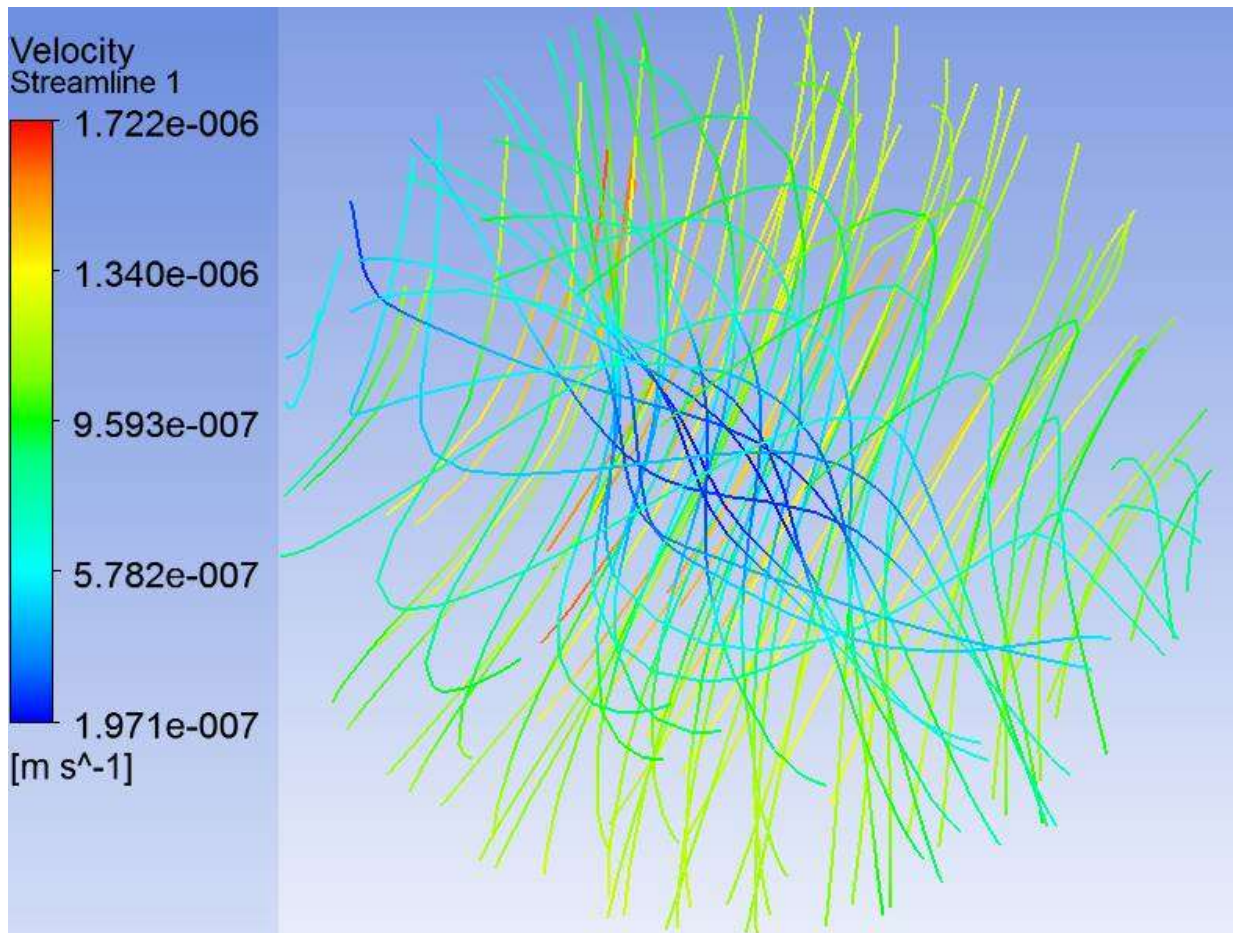


Рисунок 5.27 – Розподіл ліній току конвекції в замкнутій сферичній порі діаметром 10 мм

Менша швидкість конвективного потоку у порах при спіральному русі ліній току конвекції означає, що для збільшення теплового опору теплоізоляційних матеріалів спіральний рух ліній току конвекції у сферичних замкнутих порах ефективніший за поперечний рух з частковим потоком вздовж нижнього та верхнього полюсів пори.

Для знання розташування ізотерм по пористому матеріалу на рис. 5.28 наведено розподіл температур по теплоізоляційному матеріалу з порою діаметром 20 мм. Як можна побачити з рисунку, температура повітря у порі приблизно однакова. Температура по поверхні пори відрізняється максимум на 7 °С, у той час коли різниця градієнт температур по перерізу теплоізоляційного

матеріалу склав більше  $63,353\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Також з розподілу температур по пористому теплоізоляційному матеріалу видно, що пора діаметром 20 мм для поставлених умов володіє достатнім опором тепловому потоку навіть у теплоізоляційних матеріалах, так як змінює вгнутість ізотерм.

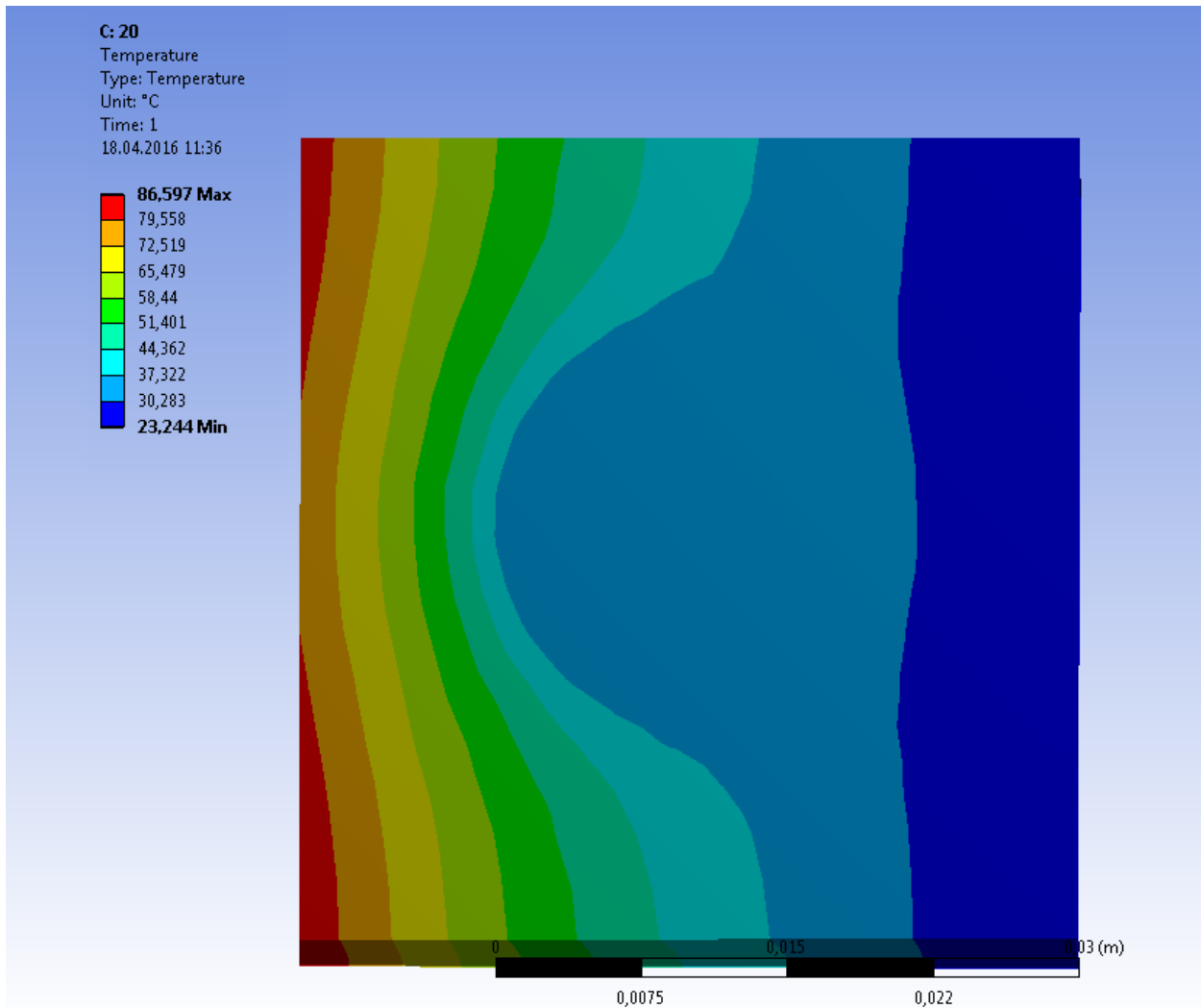


Рисунок 5.28 – Розподіл температури у теплоізоляційному матеріалі з сферичною порою діаметром 20 мм по розрізу

Для визначення особливостей протікання теплового потоку крізь пористий теплоізоляційний матеріал, розраховано та наведено вектори теплового потоку вздовж теплоізоляційного матеріалу з порою діаметром 20 мм по центральному розрізу (рис. 5.29) для початкового теплового потоку  $10\text{ Вт/м}^2$ . З рисунка видно, що тепловий потік значно зменшується у самій порі та після неї, а максимального значення тепловий потік набуває на фронтальній



поверхні пори й збільшується до  $27,17 \text{ Вт/м}^2$ . Збільшення теплового потоку пояснюється після сумісного аналізу рис. 5.29 й рис. 5.26. Так, збільшення теплового потоку пояснюється впливом конвекції, а саме тим, що тепловий потік під впливом конвективного потоку розгортається від полюсів й частково прямує в зворотню сторону, де складається з тепловим потоком, що йде на фронтальну частину пори.

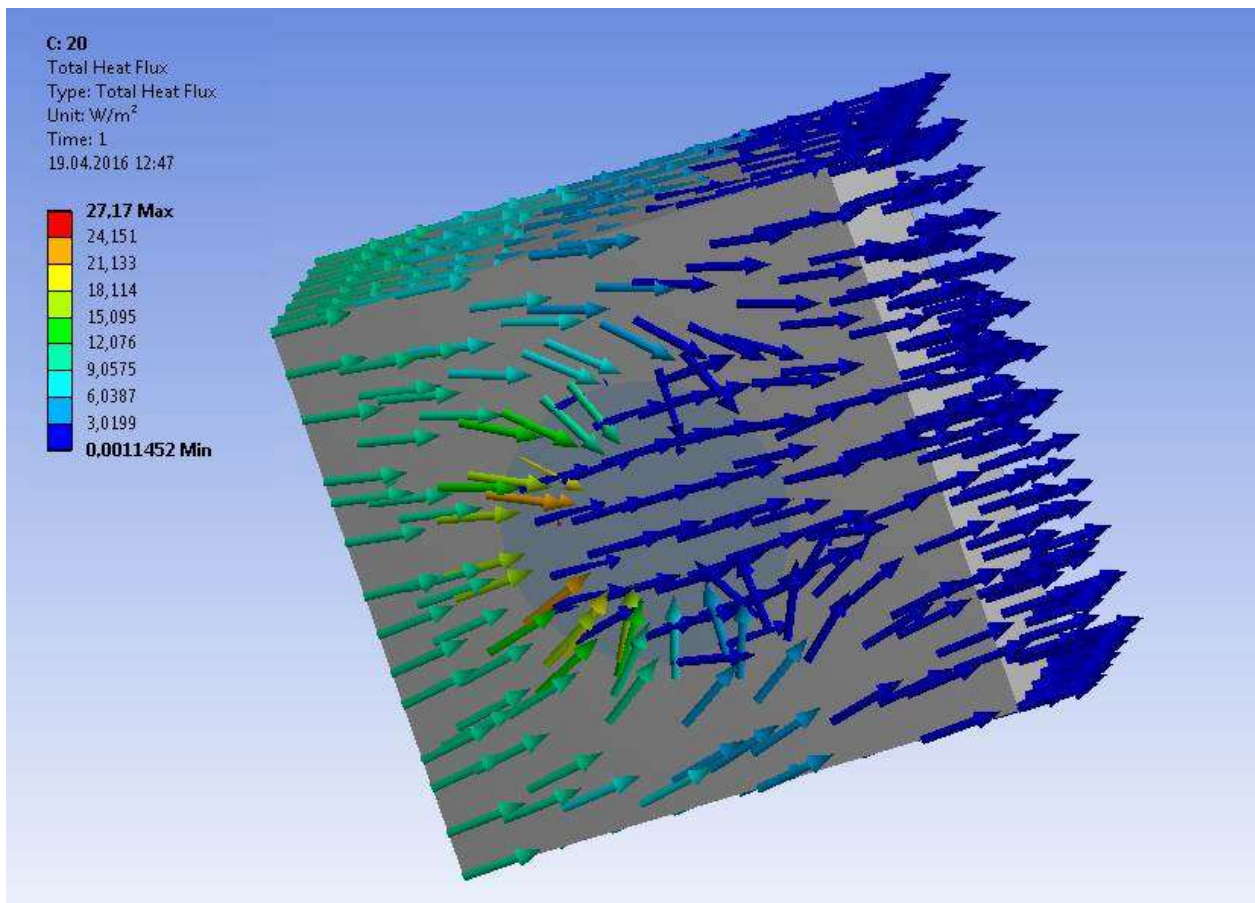


Рисунок 5.29 – Розподіл векторів теплового потоку у теплоізоляційному матеріалі з сферичною порою діаметром 20 мм

Для дослідження впливу конвекції на тепловий опір теплоізоляційних матеріалів в залежності від розміру пор було розроблено комп'ютерні моделі з різним діаметром пори. Діаметри замкнутої сферичної пори склали 2, 5, 10, 15, 20 мм. Для кожного діаметру проводилося комп'ютерне моделювання конвекції у порах та робився тепловий статичний аналіз теплоізоляційного матеріалу. В якості теплоізоляційного матеріалу було обрано пінополістирол з

густиною  $40 \text{ кг/м}^3$  з коефіцієнтом теплопровідності при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  рівним  $0,036 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  та теплоємністю  $1,34 \text{ КДж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Мінімальна кількість ітерацій для конвективного аналізу дорівнювала 1100. Максимальна розрахункова похибка по балансам дорівнювала  $10^{-5}$ .

На рис. 5.30 відображено залежність теплового опору теплоізоляційного матеріалу від діаметру пори. Штрих-пунктирною фіолетовою лінією позначено тепловий опір матеріалу з розрахунку, що у порі абсолютний вакуум. Пунктирною зеленою лінією позначено тепловий опір матеріалу з порою, заповненою повітрям, але без конвекції. Чорною горизонтальною лінією позначено тепловий опір матеріалу без пори. Суцільними синьою та червоною лініями позначено зміну опору матеріалу від діаметра пори з врахуванням впливу конвекції.

Аналізуючи результати комп'ютерного моделювання (рис. 5.30) можна зробити висновок, що при відсутності конвекції збільшення діаметру пори (як і загальної пористості матеріалу) збільшує тепловий опір теплоізоляційних матеріалів, але конвективні потоки у середині пори значно знижують тепловий опір. При діаметрі пори у 2 мм конвекція практично відсутня та не впливає на тепловий опір теплоізоляційного матеріалу. При діаметрі пори 5 мм конвективні потоки у порі впливають на проходження теплової енергії крізь пористу структуру теплоізоляційного матеріалу, але загальний опір теплоізоляційного матеріалу з порою вище за опір теплоізоляційного матеріалу без пори. При даному діаметрі пори суттєвим є вплив температури. Так, при невеликому тепловому потоку  $10 \text{ Вт/м}^2$  тепловий опір менший за тепловий опір при тепловому потоку  $100 \text{ Вт/м}^2$ . Це пояснюється градієнтом температури по поверхні пори. При діаметрі пори 10 мм та більше конвективні токи стають спочатку спіральними, а потім перпендикулярними тепловому потоку та протікають вздовж нижнього та верхнього полюсів пори, що суттєво зменшує тепловий опір теплоізоляційного матеріалу та він стає менший за тепловий опір матеріалу без пори. При діаметрі пори 8 мм вже спостерігається зменшення теплового опору теплоізоляційного матеріалу, отже для створення пористої



структури теплоізоляційного матеріалу рекомендується використовувати пори менше за 8 мм при невеликій різниці температур (до 10 °С). Визначено рівні варіювання габаритного розміру пір (4 - 8 мм) при якому конвективна потоки впливають 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.

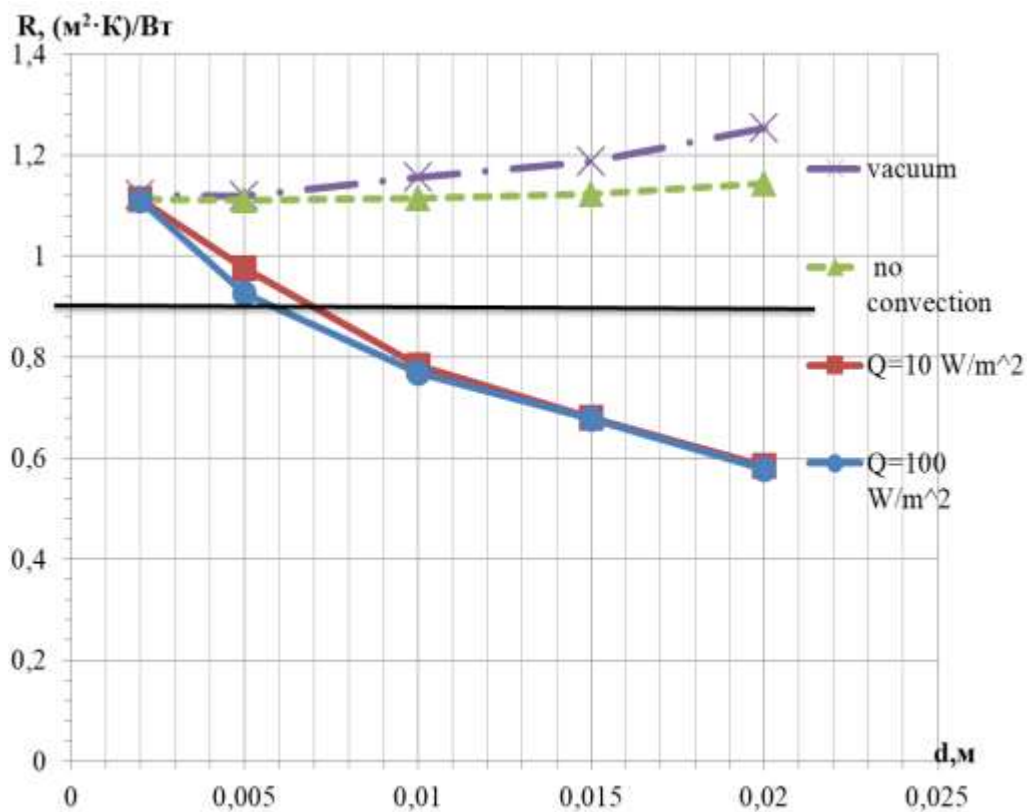


Рисунок 5.30 – Залежність теплового опору теплоізоляційного матеріалу від діаметра пори

З рис. 5.30 також можна побачити, що залежність теплового опору теплоізоляційного матеріалу від діаметра пори є логарифмічною. Використання логарифмічних залежностей зміни теплового опору від діаметра пори спрощує формування граничних умов та кількість дослідів при формуванні плану експерименту по визначенню регресійного рівняння ефективного коефіцієнту

теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів та конструкцій теплового захисту енергетичних установок.

Для підтвердження отриманих залежностей теплового опору теплоізоляційного матеріалу від діаметру пори з врахуванням конвективних потоків в середині пір було проведено лабораторний експеримент. Лист пінополістиролу різався на прямокутні паралелепіеди та з п'яти паралелепіедів збирався єдиний, який використовувався як дослідницький зразок. Перед зборкою два паралелепіеди перфоровалися дев'ятьма симетрично розташованими отворами. Для того, щоб прибрати контактний опір, контактні поверхні змащувалися тонким шаром термопасти МХ-4. Збірка здійснювалася шляхом проклеювання бокових поверхонь на місцях стику. На торці готового зразка робився глухий отвір діаметром 5,1 мм та довжиною 76 мм під щуп вимірювача теплопровідності. Схематично збірку зразка пористого теплоізоляційного матеріалу з закритою пористістю відображено на рис. 5.31. Аналогічно робилися зразки з відкритою пористістю.

Використовувався пінополістирол фірми «ТехноНіколь екопліт» з теплопровідністю  $0,036 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , щільністю  $2,6 \text{ кг}/\text{м}^3$  та теплоємністю  $1,45 \text{ КДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ . Теплопровідність вимірювалась вимірювачем теплопровідності ИТП-МГ4 фірми «СКБ Стройприбор». Зразки вироблялися як с закритою пористістю, так й з відкритою. Відкрита пористість досягалася наскрізними отворами. Діаметр пір та отворів в зразках складав 4, 6, 7, 8 та 10 мм. Щуп вимірювача теплопровідності перед кожним заміром змащувався тонким шаром термопасти КПТ-8. Фото дослідних зразків та вимірювача теплопровідності відображено на рис. 5.32.

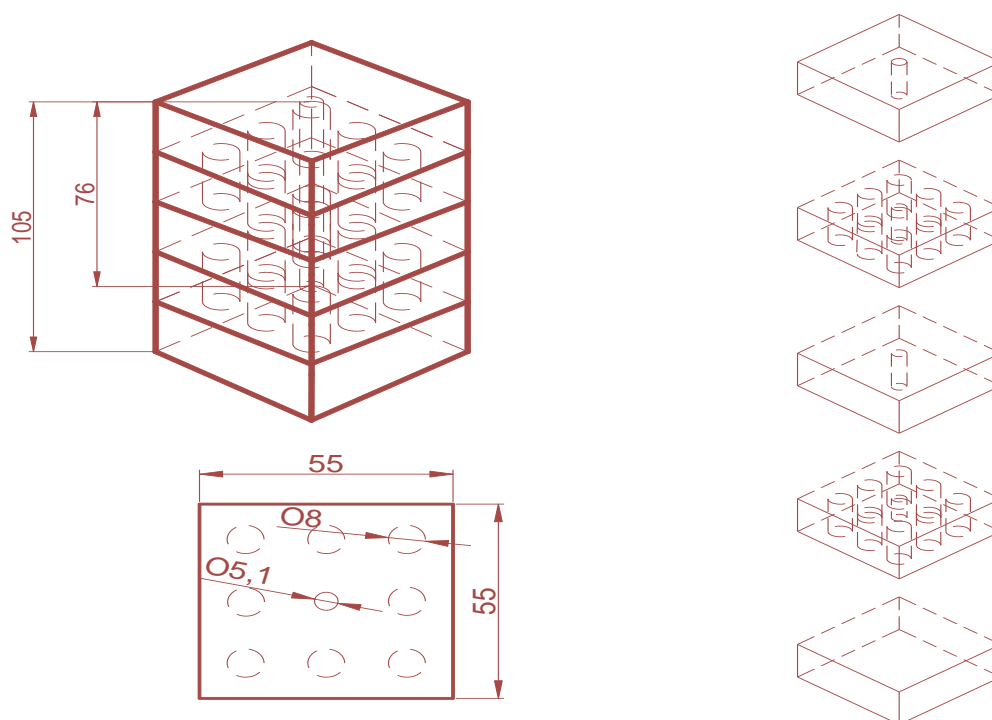


Рисунок 5.31 – Схема збірки дослідницького зразка



Рисунок 5.32 – Фото дослідницьких зразків теплоізоляційного матеріалу з порами

По результатам експерименту побудовано залежність коефіцієнту теплопровідності пористого теплоізоляційного матеріалу від діаметру пір

(рис. 5.33). Чорною горизонтальною лінією відображено коефіцієнт теплопровідності матеріалу без пори. Отримані залежності підтверджують, що пори з розміром вздовж теплового потоку менше 7 мм збільшують тепловий опір теплоізоляційних матеріалів. В проведеному експерименті відкриті пори з розміром 7 та 8 мм збільшили значення коефіцієнту теплопровідності теплоізоляційного матеріалу на 2,86 %. Це можна пояснити тим, що форма пір була циліндрична, а не сферична, а також похибкою прибору.

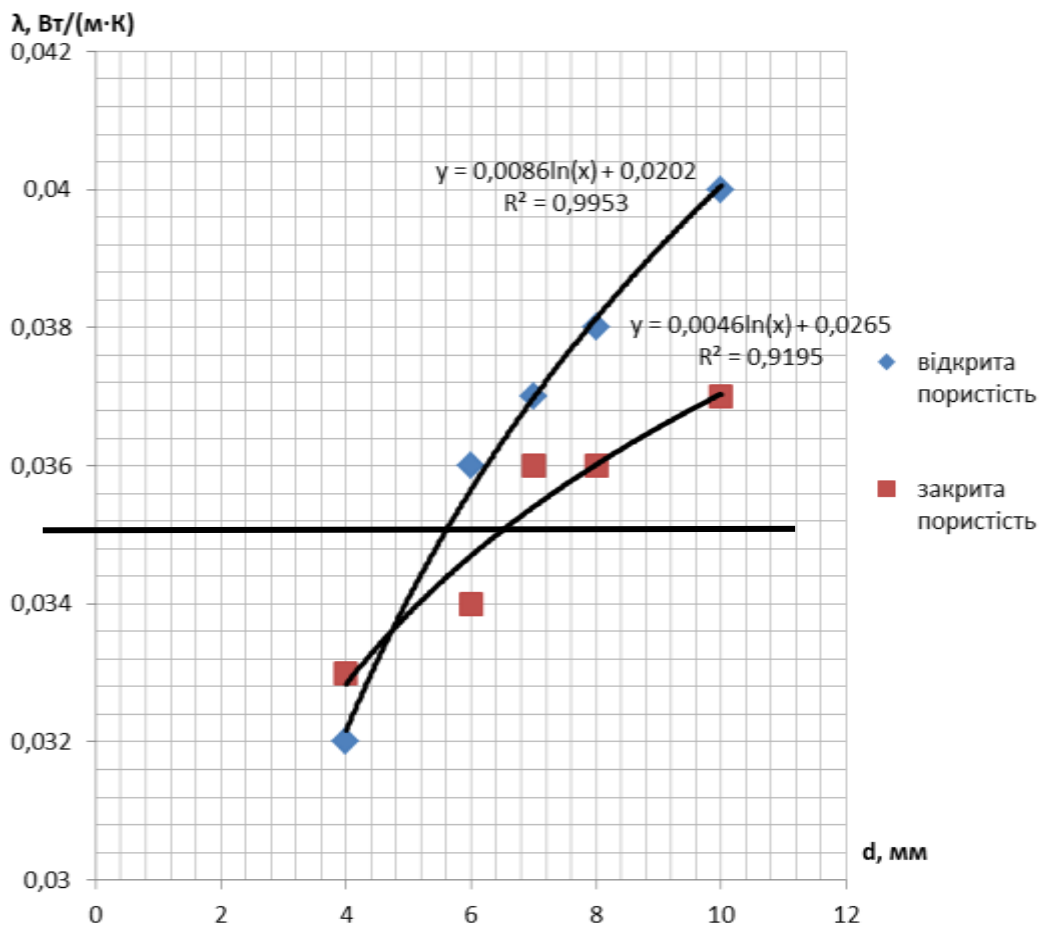


Рисунок 5.33 – Залежність коефіцієнту теплопровідності дослідницьких зразків теплоізоляційного пористого виробу від діаметру пір

Також з рис. 5.33 видно, що при відкритій пористості коефіцієнт теплопровідності матеріалу більше за коефіцієнт теплопровідності матеріалу при закритій пористості, крім випадку, коли діаметр пори дорівнює та менше 4 мм. Це можна пояснити збільшенням конвективної складової ефективного коефіцієнту теплопровідності при відкритій пористості завдяки зміни руху

конвективних потоків та збільшення їх швидкості. Зменшення коефіцієнту теплопровідності теплоізоляційного матеріалу при відкритій пористості діаметром 4 мм пояснюється тим, що загальна пористість у відкритій пористості вище за пористість закритого типу (у даному експерименті), а конвективна складова суттєво не впливає на ефективний коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу.

Результати проведеного лабораторного експерименту дозволяють підтвердити правильність раніше отриманих залежностей за допомогою комп'ютерного моделювання, а також, що залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності пористих структур від діаметра пори є логарифмічною.

Також, у ході проведення лабораторного експерименту визначено, що при діаметрі пір 4 мм конвективна складова ефективного коефіцієнту теплопровідності пінополістиролу у середині пори не значна при експлуатації матеріалів до температури 50 °С, тому її можна не враховувати.

## 5.6 Метод опису розташування пір

Як відомо, будь-яка структурована система може бути описаною при наявності в ній хоча б декількох констант, які повторюються з певною періодичністю. Отже, якщо в пористій системі знайти хоча б декілька вузлів, які повторюються в об'ємі з певною періодичністю, то система за визначенням вже не буде хаотичною і її можна описати.

При виборі методу опису пористої системи було вирішено провести аналогію між вузлами кристалічної решітки та порами. Для опису розташування пір обрано решітку Браве. Різновиди решіток Браве дозволяють описати велику кількість способів розташування пір.

Для прикладу було розраховано радіус-вектори  $R$ , які утворюють двомірну решітку при шаховому та коридорному розташуванні отворів в дослідних зразках. За вузли було взято точки, які знаходяться в центрі отворів (рис. 5.34).

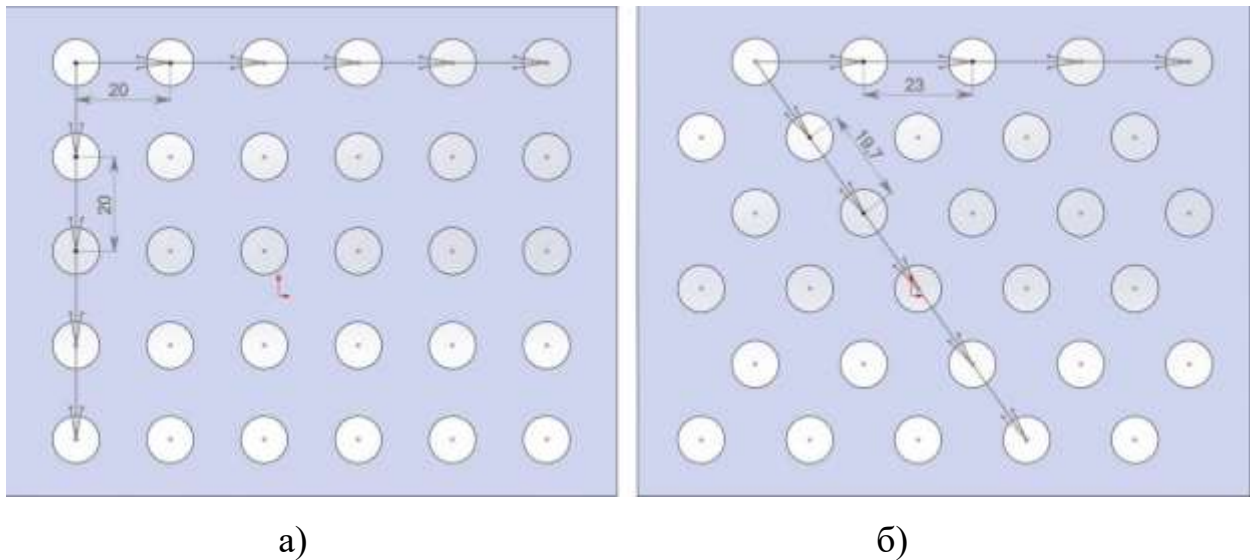


Рисунок 5.34 – Дослідні зразки з коридорним (а) і шаховим (б) розташуванням отворів з зображеними векторами на них

Довжини векторів на рисунку 5.34 вказано в міліметрах, оскільки ключову роль грає порівняння та співвідношення отриманих характеристик пористої структури та решітки Браве, то можна використовувати різні розмірності довжини вектору. Всі вектори в одному напрямку мають однакову величину. Оскільки отвори в зразках представляють собою кінцеву решітку з  $N$  вузлами, утворену рядом точок, яка відповідає наступним вимогам:  $N = N_1 N_2$ ;  $0 \leq n_1 < N_1$  і  $0 \leq n_2 < N_2$  (де  $n$  – кількість векторів у певному напрямку).

Радіус-вектори для коридорного та шахового розташування пір (рис. 5.34) будуть дорівнювати:

$$R_{\text{кор.}} = n_1 a_1 + n_2 a_2 = 5 \cdot 20 + 4 \cdot 20 = 180;$$

$$R_{\text{шах.}} = n_1 a_1 + n_2 a_2 = 4 \cdot 23 + 5 \cdot 19,7 = 190,5.$$

Як відомо, основна кубічна решітка породжується векторами:  $a\hat{x}$ ;  $a\hat{y}$ ;  $a\hat{z}$  (де  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$ ,  $\hat{z}$  – три ортогональних одиничних вектори;  $a$  – коефіцієнт, який характеризує щільноупакованість структури). Отже отримаємо

$$R = n_1 a\hat{x} + n_2 a\hat{y} + n_3 a\hat{z}.$$

Однак, для використання цього рівняння, вектори мають бути однаковими за скалярною величиною. Це допоможе розрахувати необхідну величину структурної характеристики пористості лише для зразку з коридорним розташуванням отворів. Всі ж інші випадки можуть бути описані решіткою з базисом, об'ємноцентрованою або гранецентрованою кубічною решіткою. Трійка основних векторів для кубічних решіток буде дорівнювати:

- об'ємноцентрована кубічна решітка (рис. 5.35)

$$a_1 = a\hat{x}; a_2 = a\hat{y}; a_3 = \frac{a}{2}(\hat{x} + \hat{y} + \hat{z});$$

або ж (рис. 4.36)

$$a_1 = \frac{a}{2}(\hat{y} + \hat{z} - \hat{x}); a_2 = \frac{a}{2}(\hat{z} + \hat{x} - \hat{y});$$

$$a_3 = \frac{a}{2}(\hat{x} + \hat{y} - \hat{z});$$

- гранецентрована кубічна решітка (рис. 5.37)

$$a_1 = \frac{a}{2}(\hat{y} + \hat{z}); a_2 = \frac{a}{2}(\hat{z} + \hat{x});$$

$$a_3 = \frac{a}{2}(\hat{x} + \hat{y}).$$

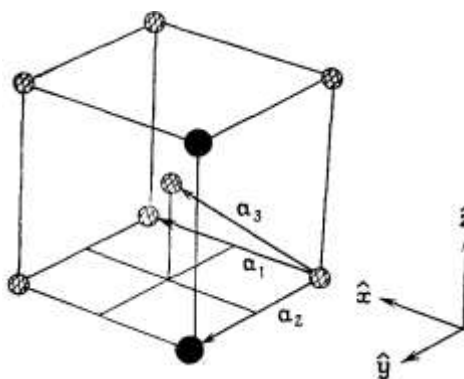


Рисунок 5.35 – Перший варіант трійки основних векторів для об'ємноцентрованої кубічної решітки

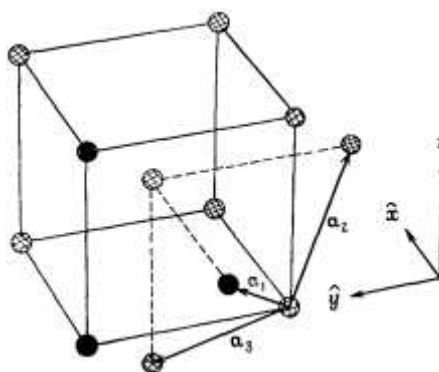


Рисунок 5.36 – Другий варіант трійки основних векторів для об'ємноцентрованої кубічної решітки

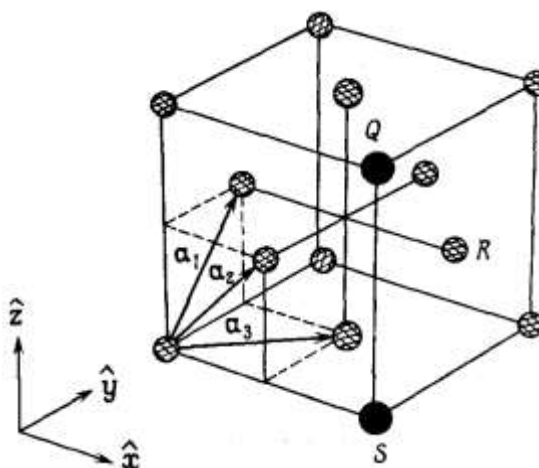


Рисунок 5.37 – Трійки основних векторів для гранецентрованої кубічної решітки

Коефіцієнт, який характеризує щільноупакованість структури для пористого матеріалу, буде дорівнювати  $1/\Pi$ . Формула для опису розташування



пір в пористому матеріалі з врахуванням щільноупакованості буде виглядати наступним чином

$$R = \frac{1}{\Pi} (n_1 a'_1 + n_2 a'_2 + n_3 a'_3),$$

де  $\Pi$  - пористість матеріалу.

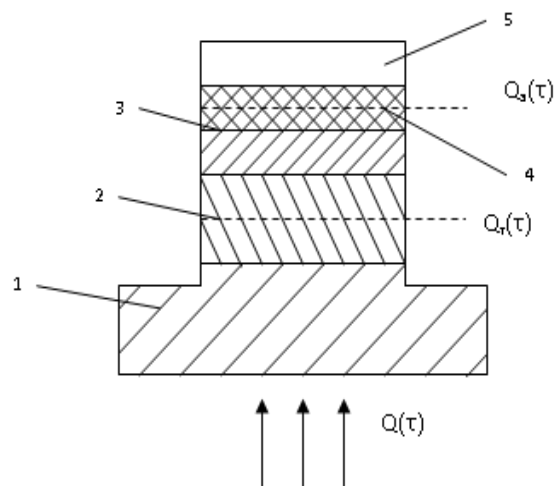
Дане рівняння показує взаємозв'язок між пористістю та структурою. Також можна сказати, що з допомогою решітки Браве можна описувати загальні пористі структури, але це буде припустимо тільки для теплоізоляційних виробів та конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання. Для теплоізоляційного матеріалу рекомендується використовувати ступінь гомогенізації.

### **5.7 Визначення впливу температури на коефіцієнт теплопровідності пористого теплоізоляційного матеріалу**

Для знаходження регресійного рівняння узагальненого ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів необхідно визначити рівні варіювання основних факторів впливу. Для методу планування експерименту вхідні фактори не повинні бути взаємопов'язані. Так як, одним з факторів є градієнт температури, то було вирішено температуру (температурний рівень) внести до коефіцієнта теплопровідності матеріалу без пустот. Це також зменшить кількість необхідних дослідів для побудови плану експерименту. Тому були проведені емпіричні дослідження по визначенню залежностей коефіцієнта теплопровідності різних пористих теплоізоляційних матеріалів та елементів теплового захисту енергетичного обладнання від температури. Досліджувалися зразки з глинозему (зразки № 2, 3, 4), зразок газобетону (зразок № 5) і зразок з пресованого порошку гіпсу (зразок № 1). Зразки з глинозему відрізнялися тільки температурою термообробки. Температура термообробки зразка №2 становила 800 °С, зразка №3 – 650 °С,

зразка №4 – 750 °С. Вимірювання теплопровідності виконувалося на ІТ–λ–400. Даний вимірювач призначено для дослідження температурної залежності теплопровідності твердих, механічно оброблених матеріалів в режимі монотонного нагріву, що дозволяє з одного експерименту отримати відразу температурну залежність досліджуваного параметра і забезпечує високу продуктивність. Теоретичне обґрунтування методу викладено в [158].

На рисунку 5.38 приведена теплова схема методу вимірювання коефіцієнту теплопровідності. Пластина контактна (3), зразок випробуваний 4 і стрижень 5 монотонно розігріваються тепловим потоком, що надходить від підстави 1. Бічні поверхні стрижня (5), зразка (4), пластина (2) і контактна пластина 3 адіабатично ізольовані за допомогою автоматичної підтримки малої різниці температур (близько 0,1 °С) між ними і адіабатичною оболонкою, яка має нагрівальний елемент. Пластина (3) і стрижень (5) виготовлені з міді, що має високу теплопровідність, завдяки чому перепади температур на них незначні. Пластина (2) виготовлена з нержавіючої сталі.



1 – підстава; 2 – пластина; 3 – пластина контактна;  
4 – випробуваний зразок; 5 – стрижень

Рисунок 5.38 – Теплова схема методу визначення коефіцієнту теплопровідності

Робочі розрахункові формули для теплового опору зразка і його теплопровідності наведені нижче [159].

Тепловий опір зразка знаходився за такою формулою

$$P_0 = \frac{v_0 \cdot S \cdot (1 + \sigma_c)}{v_T \cdot K_T} - P_k,$$

де  $K_T$  – коефіцієнт пропорційності, який характеризується ефективною теплопровідністю пластини (величина постійна для приладу, знаходиться при градуванні), Вт / К;

$P_k$  – тепловий опір контактів (величина постійна для приладу);

$\sigma_c$  – поправка, яка враховує теплоємність зразка, внесок якої не перевищує 10 %;

$v_0$  – перепад температур на зразку, К;

$v_T$  – перепад температур на пластині, К.

Поправка, що враховує теплоємність зразка, визначалася за такою формулою [160]

$$\sigma_c = \frac{C_0}{C_0 + 2C_c},$$

де  $C_0$  – повна теплоємність зразка,  $C_0 = c_0(t) \cdot m_0$ ;

$C_c$  – повна теплоємність стрижня,  $C_c = c_m(t) \cdot m_c$ ;

$c_0$  – наближене значення масової питомої теплоємності зразка, Дж/(кг·К);

$c_m$  – значення масової питомої теплоємності міді, Дж/(кг·К);

$m_0$  – маса зразка, кг;

$m_c$  – маса стрижня, кг.

Формула наведена у [160] відрізняється від формули, запропонованої у [159]. Її вибір при обробці експериментальних даних обґрунтовано тим, що градувальні коефіцієнти при наладці пристрою розраховувалися саме обраною формулою.

Результати експериментів і розрахунків занесені до таблиці 5.8 – 5.12. Похибка вимірювання теплопровідності теоретично складається з похибок визначення геометричних розмірів ( $\pm 0,8\%$ ), температури ( $\pm 1,7\%$ ), показів приладів ( $\pm 2\%$ ). З врахуванням теплових втрат, які не піддаються розрахунку внаслідок складності температурних полів у пористому матеріалі, повна похибка становить  $\pm (5-7)\%$ . Практично, внаслідок неоднорідності матеріалу і різних похибок експерименту, похибка цього методу досягає  $(10-15)\%$ .

Графічно результати експерименту з апроксимаційними залежностями відображено на рис. 5.39 – 5.43. Зі збільшенням температури від  $50\text{ }^\circ\text{C}$  до  $275\text{ }^\circ\text{C}$  коефіцієнт теплопровідності усіх дослідницьких зразків збільшується. При цьому, теплопровідність чистого  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з ростом температури (в даному діапазоні) повинна зменшуватися [161]. Це підтверджує можливість регулювання залежності теплопровідність–температура шляхом збільшення вмісту оксиду алюмінію, але ґрунтуючись на попередніх експериментах, можна стверджувати, що збільшення вмісту оксиду алюмінію в глиноземах буде виправдано тільки при вміст оксиду заліза та оксиду кальцію у сировинній суміші менше за  $9\%$ .

Для всіх досліджуваних зразків характерно, що залежності теплопровідності від температури можна описати лінійними або логарифмічними залежностями (коефіцієнт детермінації не відрізняється більш ніж на  $5\%$ ). Для зразків 1, 2 і 5 експериментальні результати з більшою точністю описує логарифмічна функція. Визначення залежності коефіцієнту теплопровідності пористого теплоізоляційного матеріалу від температури надає можливість спростити кількість вхідних факторів шляхом їх поєднання. Так, серед вхідних факторів моделі по знаходженню залежності узагальненого ефективного коефіцієнта теплопровідності пористого теплоізоляційного

матеріалу повинна бути й коефіцієнт теплопровідності мікропористого матеріалу без каналів та каверн, й температура, як показник внутрішньої енергії. Залежність коефіцієнта теплопровідності мікропористого матеріалу на основі глинозему з відомим хімічним складом (який залежить від температури термообробки сировинної суміші) від температури задається як незалежний вхідний фактор на комп'ютерній моделі по визначенню узагальненої залежності коефіцієнта теплопровідності макропористого матеріалу або елемента теплового захисту енергетичного обладнання.

На рис. 5.44 відображені зведені залежності коефіцієнту теплопровідності всіх п'яти мікропористих зразків від температури. З даного графіка можна зробити висновок, що характер зміни теплопровідності у всіх зразків однаковий, але у газобетону залежність має більш пологий характер, тобто мінімально залежить від температури.

Визначено, що залежність коефіцієнта теплопровідності від температури для теплоізоляційних матеріалів з мікропористою структурою носить логарифмічний характер.

Таблиця 5.8

Розрахунок зміни коефіцієнта теплопровідності зразка №1 від температури

$t_c, ^\circ\text{C}$	$n_o, \text{дел}$	$n_b, \text{дел}$	$K_m, \text{Вт/К}$	$P_k$	$P_o$	$C_m, \text{Дж/К}$	$C_o, \text{Дж/К}$	$C_c, \text{Дж/К}$	$\sigma_c$	$A_t$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	289,00	48,00	0,1337	0,000498	0,074	392,00	1,458	0,060	0,923	24,50	53,540	0,0802
75	379,00	62,00	0,1391	0,000500	0,072	396,00	1,458	0,061	0,923	24,50	79,643	0,0822
100	426,00	70,00	0,1404	0,000504	0,071	400,00	1,458	0,062	0,922	24,60	105,240	0,0834
125	456,00	76,00	0,1391	0,000505	0,070	403,00	1,458	0,062	0,921	24,70	130,632	0,0839
150	487,00	82,00	0,1381	0,000506	0,070	405,00	1,458	0,062	0,921	24,80	156,039	0,0841
175	521,00	86,00	0,1417	0,000506	0,070	407,00	1,458	0,063	0,921	24,80	181,460	0,0847
200	545,00	92,00	0,1402	0,000510	0,069	408,00	1,458	0,063	0,921	24,90	206,785	0,0857
225	554,00	94,00	0,1391	0,000512	0,069	410,00	1,458	0,063	0,920	25,00	231,925	0,0855
250	561,00	95,00	0,1404	0,000523	0,069	412,00	1,458	0,063	0,920	25,00	257,013	0,0861
275	569,00	97,00	0,1410	0,000523	0,068	415,00	1,458	0,064	0,919	25,10	282,141	0,0871

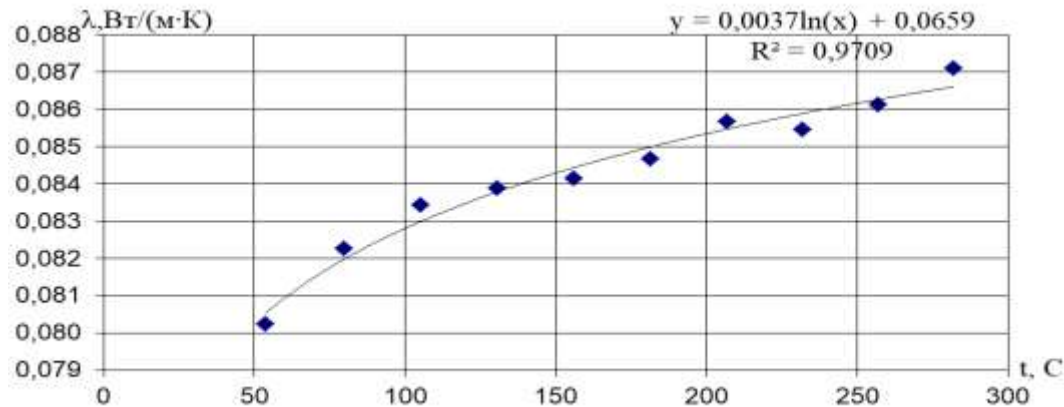


Рисунок 5.39 – Залежність коефіцієнта теплопровідності зразка №1 від температури

Таблиця 5.9

Розрахунок зміни коефіцієнта теплопровідності зразка №2 від температури

$t_c, \text{ } ^\circ\text{C}$	$n_o, \text{ дел}$	$n_b, \text{ дел}$	$K_m, \text{ Вт/К}$	$P_k$	$P_o$	$C_m, \text{ Дж/К}$	$C_o, \text{ Дж/К}$	$C_c, \text{ Дж/К}$	$\sigma_c$	$A_t$	$t, \text{ } ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	347,00	34,00	0,1337	0,000498	0,103	392,00	1,247	0,060	0,912	24,50	54,251	0,0673
75	458,00	45,00	0,1391	0,000500	0,098	396,00	1,247	0,061	0,911	24,50	80,611	0,0702
100	515,00	52,00	0,1404	0,000504	0,095	400,00	1,247	0,062	0,910	24,60	106,335	0,0729
125	564,00	59,00	0,1391	0,000505	0,092	403,00	1,247	0,062	0,909	24,70	131,965	0,0748
150	605,00	65,00	0,1381	0,000506	0,090	405,00	1,247	0,062	0,909	24,80	157,502	0,0763
175	642,00	70,00	0,1417	0,000506	0,087	406,00	1,247	0,063	0,909	24,80	182,961	0,0795
200	671,00	75,00	0,1402	0,000510	0,086	408,00	1,247	0,063	0,908	24,90	208,354	0,0807
225	691,00	77,00	0,1391	0,000512	0,086	410,00	1,247	0,063	0,908	25,00	233,638	0,0798
250	702,00	80,00	0,1404	0,000523	0,084	412,00	1,247	0,063	0,908	25,00	258,775	0,0824
275	715,00	84,00	0,1410	0,000523	0,081	415,00	1,247	0,064	0,907	25,10	283,973	0,0854

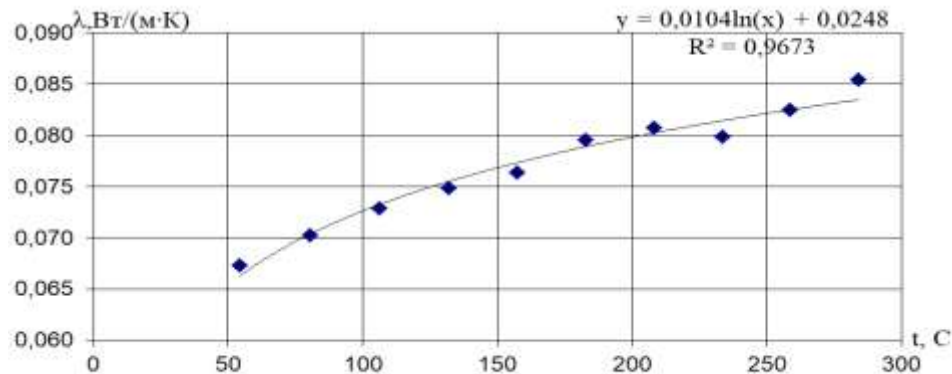
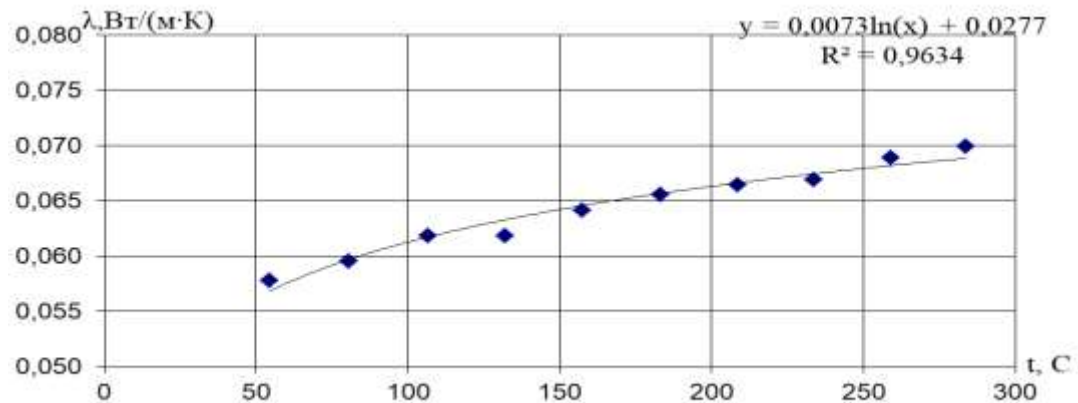


Рисунок 5.40 – Залежність коефіцієнта теплопровідності зразка №2 від температури

Таблиця 5.10

Розрахунок зміни коефіцієнта теплопровідності зразка №3 від температури

$t_c, ^\circ\text{C}$	$n_o, \text{дел}$	$n_b, \text{дел}$	$K_m, \text{Вт/К}$	$P_k$	$P_o$	$C_m, \text{Дж/К}$	$C_o, \text{Дж/К}$	$C_c, \text{Дж/К}$	$\sigma_c$	$A_t$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	356,00	36,00	0,1337	0,000498	0,104	392,00	1,629	0,060	0,931	24,50	54,361	0,0578
75	460,00	46,00	0,1391	0,000500	0,101	396,00	1,629	0,061	0,930	24,50	80,635	0,0595
100	525,00	54,00	0,1404	0,000504	0,097	400,00	1,629	0,062	0,930	24,60	106,458	0,0618
125	568,00	59,00	0,1391	0,000505	0,097	403,00	1,629	0,062	0,929	24,70	132,015	0,0619
150	609,00	66,00	0,1381	0,000506	0,094	405,00	1,629	0,062	0,929	24,80	157,552	0,0641
175	648,00	70,00	0,1417	0,000506	0,092	406,00	1,629	0,063	0,929	24,80	183,035	0,0656
200	678,00	75,00	0,1402	0,000510	0,090	408,00	1,629	0,063	0,928	24,90	208,441	0,0665
225	695,00	78,00	0,1391	0,000512	0,090	410,00	1,629	0,063	0,928	25,00	233,688	0,0669
250	708,00	81,00	0,1404	0,000523	0,087	412,00	1,629	0,063	0,928	25,00	258,850	0,0689
275	709,00	82,00	0,1410	0,000523	0,086	415,00	1,629	0,064	0,927	25,10	283,898	0,0699



Рисунк 5.41 – Залежність коефіцієнта теплопровідності зразка №3 від температури



Таблиця 5.11

Розрахунок зміни коефіцієнта теплопровідності зразка №4 від температури

$t_c, ^\circ\text{C}$	$n_o, \text{дел}$	$n_b, \text{дел}$	$K_m, \text{Вт/К}$	$P_k$	$P_o$	$C_m, \text{Дж/К}$	$C_o, \text{Дж/К}$	$C_c, \text{Дж/К}$	$\sigma_c$	$A_t$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	311,00	24,00	0,1337	0,000498	0,130	392,00	1,188	0,060	0,908	24,50	53,810	0,0470
75	428,00	34,00	0,1391	0,000500	0,121	396,00	1,188	0,061	0,907	24,50	80,243	0,0503
100	487,00	40,00	0,1404	0,000504	0,116	400,00	1,188	0,062	0,906	24,60	105,990	0,0526
125	545,00	47,00	0,1391	0,000505	0,112	403,00	1,188	0,062	0,905	24,70	131,731	0,0547
150	609,00	55,00	0,1381	0,000506	0,107	405,00	1,188	0,062	0,905	24,80	157,552	0,0569
175	640,00	60,00	0,1417	0,000506	0,101	406,00	1,188	0,063	0,905	24,80	182,936	0,0606
200	710,00	68,00	0,1402	0,000510	0,100	408,00	1,188	0,063	0,904	24,90	208,840	0,0613
225	744,00	74,00	0,1391	0,000512	0,097	410,00	1,188	0,063	0,904	25,00	234,300	0,0632
250	760,00	77,00	0,1404	0,000523	0,094	412,00	1,188	0,063	0,903	25,00	259,500	0,0650
275	820,00	84,00	0,1410	0,000523	0,093	415,00	1,188	0,064	0,903	25,10	285,291	0,0660

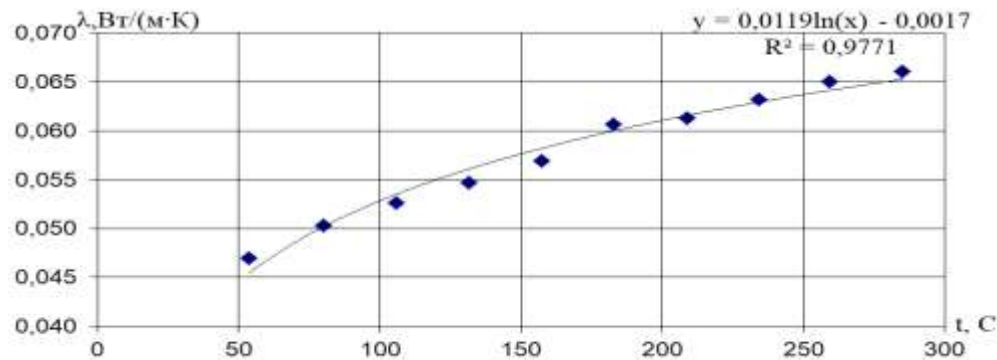


Рисунок 5.42 – Залежність коефіцієнта теплопровідності зразка №4 від температури

Таблиця 5.12

Розрахунок зміни коефіцієнта теплопровідності зразка №5 від температури

$t_c, ^\circ\text{C}$	$n_o, \text{дел}$	$n_p, \text{дел}$	$K_m, \text{Вт/К}$	$P_k$	$P_o$	$C_m, \text{Дж/К}$	$C_o, \text{Дж/К}$	$C_c, \text{Дж/К}$	$\sigma_c$	$A_t$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	327,00	42,00	0,1337	0,000498	0,073	392,00	1,197	0,060	0,908	24,50	54,006	0,0686
75	429,00	54,00	0,1391	0,000500	0,071	396,00	1,197	0,061	0,907	24,50	80,255	0,0700
100	490,00	62,00	0,1404	0,000504	0,070	400,00	1,197	0,062	0,907	24,60	106,027	0,0711
125	513,00	66,00	0,1391	0,000505	0,070	403,00	1,197	0,062	0,906	24,70	131,336	0,0716
150	558,00	73,00	0,1381	0,000506	0,069	405,00	1,197	0,062	0,906	24,80	156,919	0,0723
175	598,00	77,00	0,1417	0,000506	0,068	406,00	1,197	0,063	0,905	24,80	182,415	0,0731
200	620,00	82,00	0,1402	0,000510	0,067	408,00	1,197	0,063	0,905	24,90	207,719	0,0743
225	635,00	84,00	0,1391	0,000512	0,068	410,00	1,197	0,063	0,905	25,00	232,938	0,0737
250	640,00	85,00	0,1404	0,000523	0,067	412,00	1,197	0,063	0,904	25,00	258,000	0,0747
275	642,00	85,00	0,1410	0,000523	0,067	415,00	1,197	0,064	0,903	25,10	283,057	0,0749

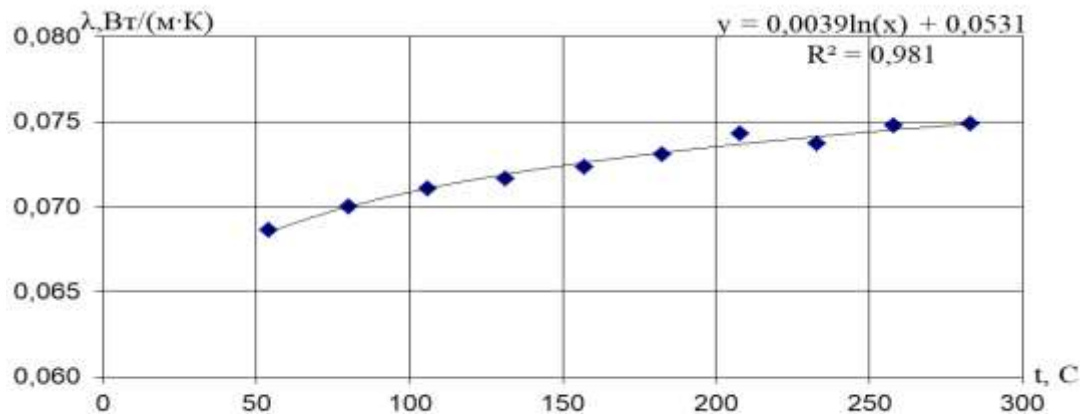


Рисунок 5.43 – Залежність коефіцієнта теплопровідності зразка №5 від температури

Залежність температури термообробки сировинної суміші глиноземистого теплоізоляційного матеріалу на коефіцієнт теплопровідності носить неоднозначний характер. Мінімальний коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему було досягнуто за температури термообробки 750 °С. При цьому під час термообробки 650 °С коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему більше ніж при 750 °С на 23 %, а при 800 °С – вища практично в два рази. Це пояснюється рівномірністю розподілу пір і їх однаковими розмірами при термообробці 750 °С, а також раціональною хімічною структурою.

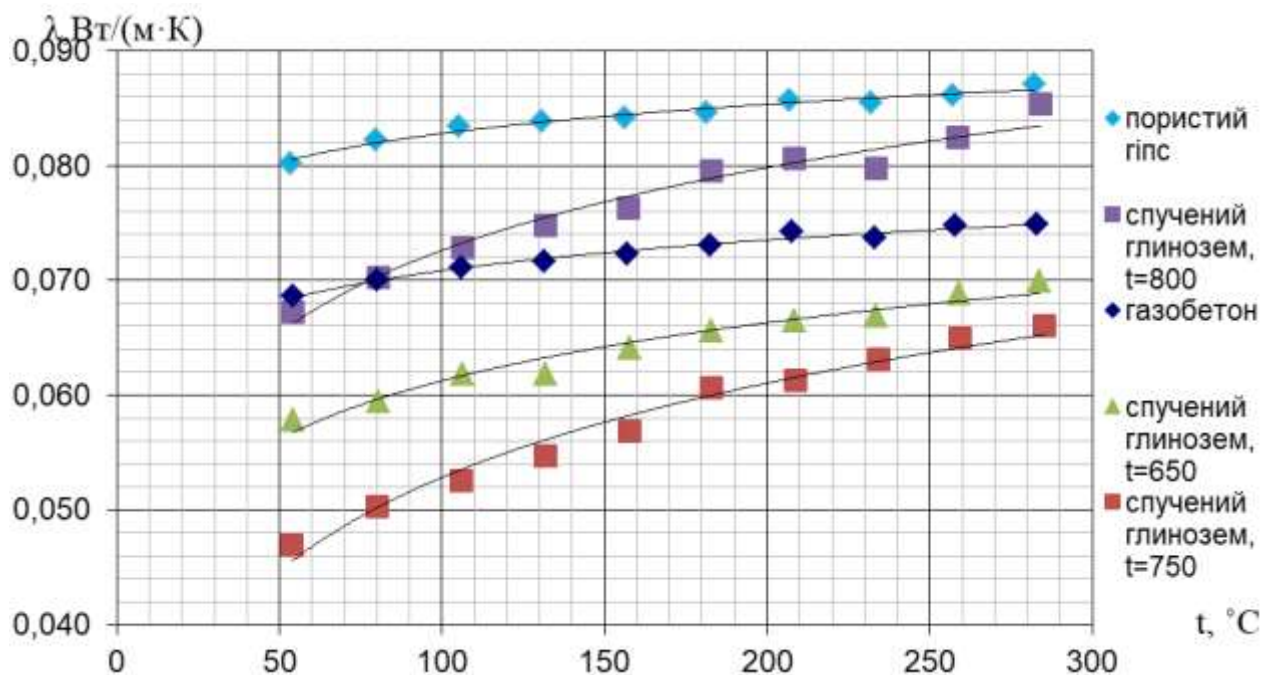


Рисунок 5.44 – Залежність коефіцієнту теплопровідності пористих матеріалів від температури

Так, при термообробці сировинної суміші глинозему за температури 650 °С – більшість пір у теплоізоляційному матеріалі розташовано рівномірно, але їх розмір менший за розмір пір теплоізоляційного матеріалу спученого за температури 750 °С. При 800 °С – спостерігається значне збільшення деяких пір, але при цьому зникають найменші пори і не дивлячись на те, що загальна пористість матеріалу більше ніж при термообробці 750 °С, пористість є

нерівномірною. Також при 750 °C і 800 °C відбуватиметься протікання різних хімічних реакцій, що також впливає на результати. Можна зробити висновок, що пориста структура значно впливає на теплопровідність пористих теплоізоляційних матеріалів на основі глинозему (29,9 %). Для більш досконалого вивчення впливу температури термообробки більше за 575 °C на формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему необхідно проводити додаткові дослідження.

Визначення залежності коефіцієнту теплопровідності пористого теплоізоляційного матеріалу від температури є необхідною умовою незалежності факторів для методу планування експерименту при знаходженні регресійного рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності.

#### **5.8. Знаходження узагальненого рівняння коефіцієнту теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок**

Кожного року появляються нові пористі матеріали [162], які використовуються в якості теплового захисту елементів промислових енергетичних установок, теплоізоляції трубопроводів, печей, сушарок та іншого промислового обладнання. Але створені матеріали не є оптимальними по теплофізичним характеристикам [163]. Щоб спрогнозувати та отримати оптимальне значення ефективного коефіцієнта теплопровідності пористого матеріалу або конструкції з нього, необхідне узагальнене рівняння теплопровідності, якого досі не існує. До теперішнього часу ефективний коефіцієнт теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів можна було розрахувати складними системами рівнянь, які враховують як випромінювання, так і конвекцію у середині пір, або розглядають пористу структуру як фрактальну [164-169]. Данні рівняння мають багато спрощень та полуміричних коефіцієнтів та не враховують умови експлуатації. Узагальнене рівняння теплопровідності пористого матеріалу дозволить

управляти теплопровідністю пористого матеріалу на стадії формування пористої структури без проведення безлічі експериментів. Тому знаходження узагальненого рівняння коефіцієнту теплопровідності матеріалів та конструкцій з пористою структурою є актуальною науковою проблемою, корисною для промисловості держави.

Для створення узагальненого рівняння теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкції теплового захисту енергетичного обладнання необхідно визначитись з основними вхідними параметрами моделі, які впливають на коефіцієнт теплопровідності матеріалів. Для знаходження регресійного рівняння методом планування експерименту вхідні параметри моделі повинні бути незалежними один від одного. Проведені у даному розділі дослідження дозволяють визначити такі основні параметри: градієнт температури по порі  $gradT$ ; коефіцієнт теплопровідності матеріалу без пір  $\lambda_{\text{мат}}$ , що залежить від середньоінтегральної температури по матеріалу; діаметр пори, або її габаритний розмір вздовж теплового потоку  $d_1$ ; діаметр пори, або її габаритний розмір перпендикулярний тепловому потоку  $d_2$ ; кількість пір заданого розміру на одиницю об'єму  $n$ . Розмір пори вздовж та перпендикулярно тепловому потоку вибрані тому, що саме вони оказують найбільший вплив на зміну ефективного коефіцієнта теплопровідності. Інші геометричні розміри пори (форми, наближені до сфери) вказують на не суттєвий їх вплив на ефективний коефіцієнт теплопровідності пористих матеріалів. Оскільки залежність коефіцієнту теплопровідності пористого матеріалу від діаметру пір є логарифмічною, то для спрощення кількості дослідів використаємо логарифми габаритних розмірів пір при формуванні умов проведення експерименту. Значення та кодування факторів наведено у табл. 5.13.

Таблиця 5.13

## Умови проведення експериментів

Фактор	Код	Рівні факторів			
		-1	0	1	$\Delta$
Логарифм розміру пори вздовж теплового потоку $\ln(d_1)$ , мм	$X_1$	1,386 ( $\ln 4$ )	1,733 ( $\ln 5,63$ )	2,079 ( $\ln 8$ )	0,347
Логарифм розміру пори, перпендикулярний тепловому потоку $\ln(d_2)$ , мм	$X_2$	1,386 ( $\ln 4$ )	1,733 ( $\ln 5,63$ )	2,079 ( $\ln 8$ )	0,347
Градiєнт температури пори $gradT$ , °К/м	$X_3$	10	50	90	40
Теплопровiднiсть матерiалу без пiр $\lambda_{mat}$ , Вт/(м·К)	$X_4$	0,05	0,5	0,95	0,45
Кiлькiсть пiр на одиницю об'єму $n$ , шт./ $6,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$	$X_5$	1	5	9	4

У основу теорії планування експерименту покладено ймовірностно-статистичні методи, що дозволяють теоретично обґрунтовано встановити мінімально необхідне число і склад експериментів, а також порядок їх проведення для отримання кількісних залежностей між параметрами, що вивчаються, і чинниками, що впливають на них. Оскільки залежність функції від факторів  $X_1$  та  $X_2$  буде лінійною, то для цих факторів достатньо плану другого порядку, для інших факторів приймаємо третій порядок плану.

Змішаний композиційний план другого та третього порядку для знаходження узагальненого рівняння коефіцієнту теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок наведено у додатку А. Кількість пiр змiнювалась у площині, перпендикулярній тепловому потоку. Приклад комп'ютерної моделі теплоізоляційного матеріалу з 9 порами розміром 4x8 мм наведено на рис.5.45, а саме конвективні лінії потоку у порах

та розподіл температури. З рис. 5.45 видно, що максимальна різниця температур повітря у порах теплоізоляційного матеріалу для заданих умов не перевищує  $3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а середня швидкість потоку складає  $2,1 \cdot 10^{-6}\text{ м/с}$ .

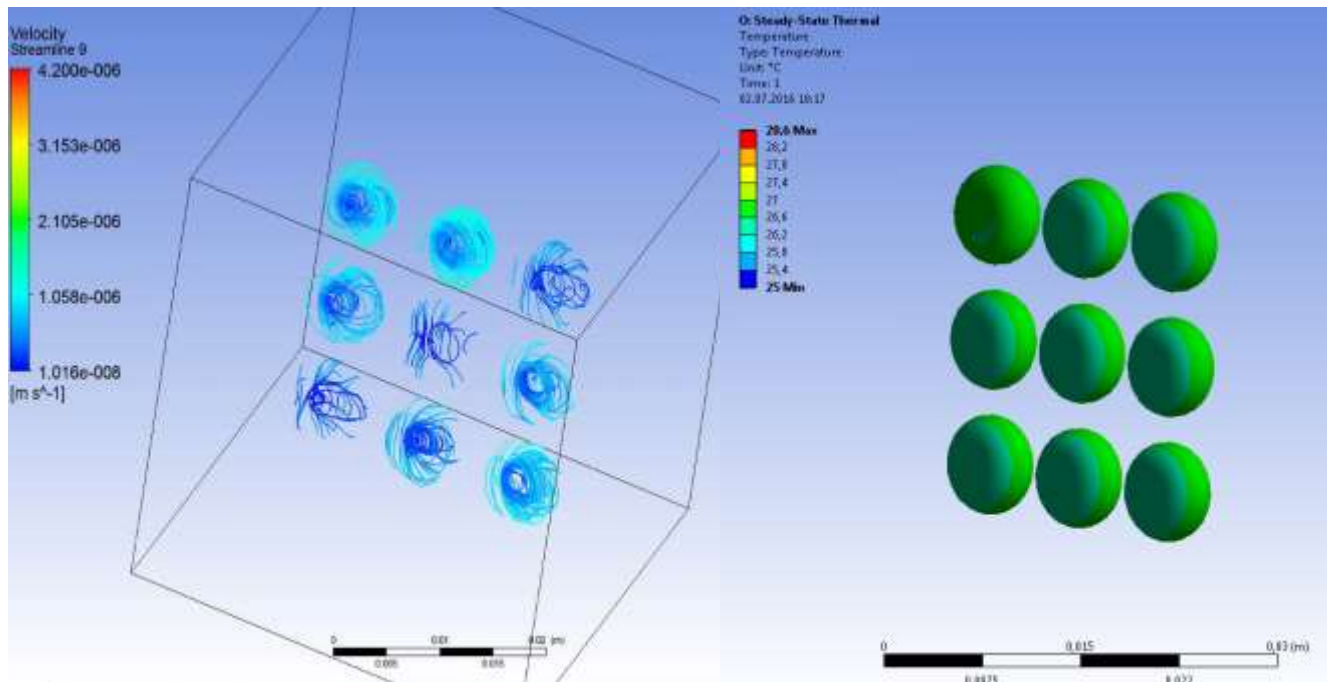


Рисунок 5.45 – Лінії току конвекції у порах теплоізоляційного матеріалу та розподіл температури по порах

Для побудови регресійного рівняння було розглянуто метод Рехт-Шахнера та метод планування експерименту з побудовою ортогонального плану. Аналіз результатів 54 експериментів виконаних на комп'ютерних моделях за допомогою спеціального програмного забезпечення проведено у trial версії програми Statistica. Після регресійного аналізу trial версії програми Statistica було отримано коефіцієнти регресійного рівняння узагальненого коефіцієнта теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок (табл. 5.14). Регресійне рівняння обрано з лінійними, квадратичними та парними коефіцієнтами. В першому стовбці вказані фактори. Фактор L позначає лінійні коефіцієнти, Q – квадратичні. Також, у табл. 5.14 вказано  $t$  - критерій Стьюдента. Курсивом виділено значимі коефіцієнти.

Таблиця 5.14

Коефіцієнти регресійного рівняння по програмі Statistica у закодованому вигляді

Factor	Effect Estimates; Var.lambda R-sqr=,81775; Adj:,51703 54 Runs MS Residual=,0008348					
	Effect	Std.Err.	t(20)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,04593	0,00417	11,0137	0,0000001	0,03723	0,05462
3L by 5L	0,03395	0,01179	2,8784	0,00929	0,00934	0,05855
(3)grad(t)(L)	-0,02551	0,00963	-2,6493	0,01538	-0,0456	-0,00542
2L by 5L	0,02286	0,01021	2,2388	0,03669	0,00156	0,04417
2L by 3L	0,02032	0,01021	1,9896	0,06048	-0,00098	0,04163
(1)ln(d1)(L)	0,01955	0,00834	2,3445	0,02948	0,00215	0,03695
1L by 5L	-0,01907	0,01021	-1,8672	0,07659	-0,04038	0,00223
1L by 3L	-0,01861	0,01021	-1,8218	0,08347	-0,03991	0,00269
grad(t)(Q)	-0,01777	0,00834	-2,1306	0,04571	-0,03516	-0,00037
4L by 5L	-0,01714	0,01179	-1,4534	0,1616	-0,04174	0,00746
4L by 5Q	-0,01635	0,01021	-1,6012	0,125	-0,03766	0,00495
(2)ln(d2)(L)	-0,01566	0,00834	-1,8776	0,07509	-0,03305	0,00173
3Q by 5L	0,01559	0,01021	1,5267	0,14249	-0,00571	0,0369
1L by 2L	-0,01464	0,00834	-1,7556	0,09445	-0,03204	0,00275
1L by 3Q	-0,01361	0,00884	-1,5387	0,13953	-0,03206	0,00484
lambda_m(Q)	0,01301	0,00834	1,5604	0,13434	-0,00438	0,03041
2L by 3Q	0,01273	0,00884	1,4391	0,16558	-0,00572	0,03118
1L by 5Q	0,01047	0,00884	1,84	0,25028	-0,00797	0,02892
2L by 4Q	-0,01033	0,00884	-1,1686	0,25628	-0,02879	0,00811
3Q by 4Q	-0,01	0,00884	-1,1312	0,27133	-0,02846	0,00844
3L by 5Q	0,00995	0,01021	0,9744	0,34146	-0,01135	0,03126
2L by 5Q	-0,00981	0,00884	-1,1097	0,28027	-0,02827	0,00863
1L by 4Q	0,00947	0,00884	1,0711	0,29684	-0,00897	0,02793
3L by 4L	-0,0094	0,01179	-0,7976	0,43441	-0,03401	0,01519
4Q by 5L	-0,00841	0,01021	-0,8235	0,41992	-0,02972	0,01289
4Q by 5Q	0,00707	0,00884	0,79973	0,43326	-0,01137	0,02552
(4)lambda_m(L)	0,00667	0,00963	0,69253	0,49656	-0,01342	0,02675
1L by 4L	0,00513	0,01021	0,5031	0,62037	-0,01616	0,02644
(5)n(L)	-0,00493	0,00963	-0,5119	0,61427	-0,02502	0,01515
2L by 4L	-0,00487	0,01021	-0,4775	0,63818	-0,02618	0,01643
n(Q)	0,00386	0,00834	0,4639	0,6477	-0,01352	0,02126
3Q by 5Q	-0,00233	0,00884	-0,2641	0,79437	-0,02079	0,01611
3L by 4Q	0,00126	0,01021	0,1239	0,90258	-0,02004	0,02257
3Q by 4L	0,00008	0,01021	0,0083	0,99345	-0,02122	0,02139



Розподіл Парето впливу обраних факторів відображено на рис. 5.46, та показує, що найбільший вплив на ефективний коефіцієнт теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок будуть чинити розмір пори вздовж теплового потоку та сумарний вплив розміру пори, перпендикулярний тепловому потоку з градієнтом температури.

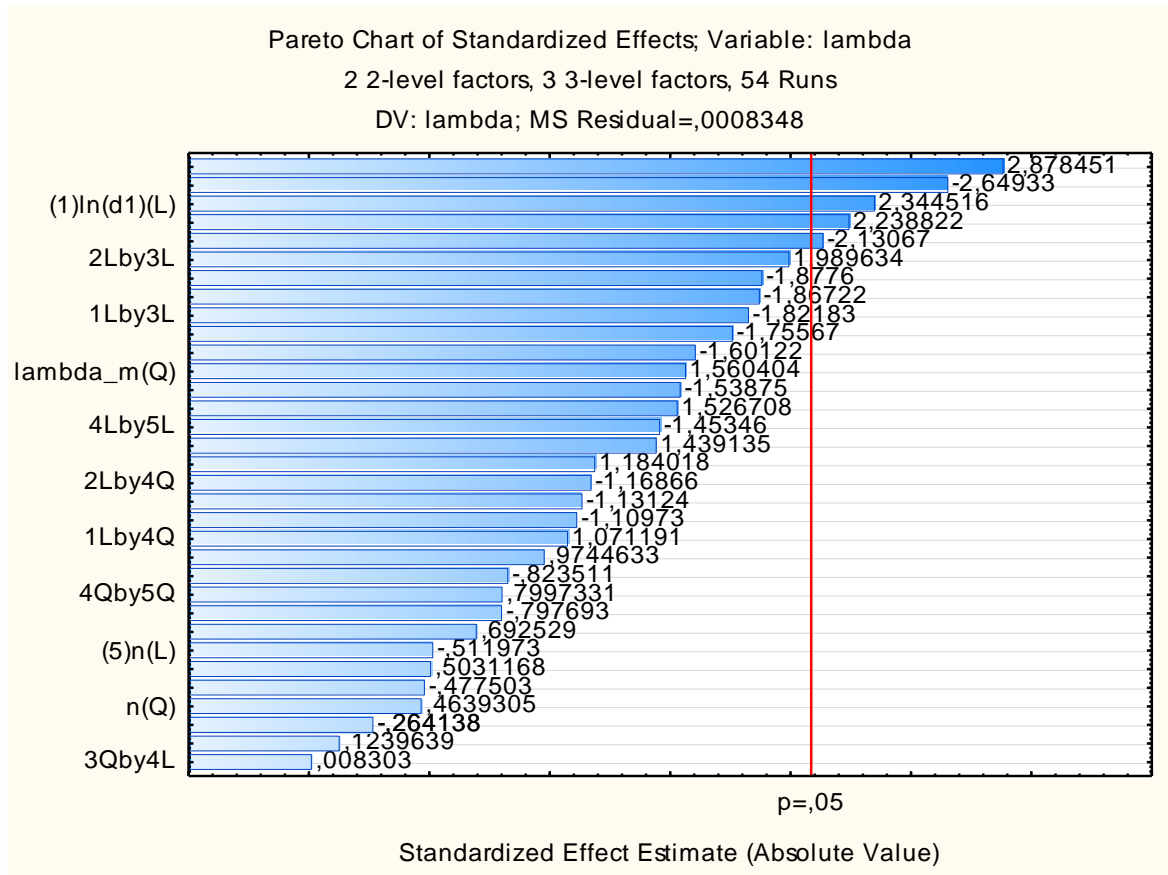


Рисунок 5.46 – Розподіл Парето впливу факторів на ефективну теплопровідність матеріалу.

Узагальнене рівняння коефіцієнту теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок після виключення незначимих факторів та перевірки на адекватність буде мати наступний вигляд

$$\lambda_{ef} = 0,046 + 0,02X_1 - 0,0255X_3 - 0,0178X_3^2 + 0,00667X_4 + 0,00513X_1 \cdot X_4 + 0,0023 \cdot X_2 \cdot X_5 + 0,034 \cdot X_3 \cdot X_5.$$

Аналіз узагальненого рівняння коефіцієнту теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок показує, що теплопровідність початкового матеріалу без пір  $\lambda_{\text{мат}}$  у дослідженому діапазоні від 0,05 до 0,95 Вт/(м·К) найменше впливає на ефективний коефіцієнт теплопровідності кінцевого матеріалу. Збільшення розміру пори вздовж теплового потоку значно збільшує узагальнений коефіцієнт теплопровідності матеріалу. Градієнт температури не лінійно та не прямопропорційно впливає на ефективний коефіцієнт теплопровідності кінцевого матеріалу. Кількість пір через коефіцієнти парних взаємодій прямопропорційно впливають на ефективний коефіцієнт теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок.

У розкодованому вигляді спрощене рівняння узагальненого коефіцієнту теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок матиме наступний вигляд (з табл. 5.15)

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

Варто зазначити, що габаритний розмір пори, перпендикулярний тепловому потоку, для пористих елементів теплового захисту промислових енергетичних установок варто обирати 8 мм, але екстраполяцією виявлено, що зменшення ефективного коефіцієнту теплопровідності пористого елемента теплового захисту буде відбуватися і при збільшенні цього параметру до 15 мм (екстраполяція на 95%) [169].

Таблиця 5.15

Коефіцієнти регресійного рівняння у розкодованому значенні

Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(20)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,04065	0,01719	2,3644	0,02828	0,00478	0,07652
(1)ln(d1)(L)	0,014003	0,01103	1,2691	0,21897	-0,00901	0,03701
(2)ln(d2)(L)	-0,01278	0,01103	-1,1582	0,26039	-0,03579	0,01023
(3)grad(t)(L)	-0,00527	0,01076	-0,4901	0,62938	-0,02773	0,01718
grad(t)(Q)	0,03423	0,01865	1,8353	0,08136	-0,00467	0,07313
(4)lambda_m(L)	0,00751	0,01076	-0,6977	0,49337	-0,02997	0,01494
lambda_m(Q)	-0,0091	0,01865	-0,4881	0,63073	-0,048	0,02979
(5)n(L)	0,00232	0,01076	0,2157	0,83134	-0,02013	0,02478
n(Q)	-0,01018	0,01865	-0,5462	0,59095	-0,04909	0,02871
1L by 2L	-0,00732	0,00417	-1,7556	0,09445	-0,01602	0,00137
1L by 3L	-0,0093	0,0051	-1,82183	0,08347	-0,01995	0,00134
1L by 3Q	0,01361	0,00884	1,53875	0,13953	-0,00484	0,03206
1L by 4L	0,00257	0,0051	0,5031	0,62037	-0,00808	0,01322
1L by 4Q	-0,00947	0,00884	-1,0711	0,29684	-0,02793	0,00897
1L by 5L	-0,00953	0,0051	-1,8672	0,07659	-0,02019	0,00111
1L by 5Q	-0,01047	0,00884	-1,18402	0,25028	-0,02892	0,00797
2L by 3L	0,01016	0,0051	1,9896	0,06048	-0,00049	0,02081
2L by 3Q	-0,01273	0,00884	-1,4391	0,16558	-0,03118	0,00572
2L by 4L	-0,00243	0,0051	-0,4775	0,63818	-0,01309	0,00821
2L by 4Q	0,01033	0,00884	1,1686	0,25628	-0,00811	0,02879
2L by 5L	0,01143	0,0051	2,23882	0,03669	0,00078	0,02208
2L by 5Q	0,00981	0,00884	1,1097	0,28027	-0,00863	0,02827
3L by 4L	-0,0047	0,00589	-0,79769	0,43441	-0,017	0,00759
3L by 4Q	-0,00126	0,01021	-0,1239	0,90258	-0,02257	0,02004
3Q by 4L	-0,00008	0,01021	-0,0083	0,99345	-0,02139	0,02122
3Q by 4Q	-0,02001	0,01769	-1,1312	0,27133	-0,05692	0,01689
3L by 5L	0,01697	0,00589	2,8784	0,00929	0,00467	0,02927
3L by 5Q	-0,00995	0,01021	-0,9744	0,34146	-0,03126	0,01135
3Q by 5L	-0,01559	0,01021	-1,5267	0,14249	-0,0369	0,00571
3Q by 5Q	-0,00467	0,01769	-0,2641	0,79437	-0,04158	0,03223
4L by 5L	-0,00857	0,00589	-1,4534	0,1616	-0,02087	0,00373

SWOT-аналіз результатів дослідження.

Strengths. Серед сильних сторін даного дослідження необхідно відзначити отримані результати при аналізі узагальненого рівняння коефіцієнту теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою для теплового

захисту елементів промислових енергетичних установок. Данні результати дозволяють отримати необхідний коефіцієнт теплопровідності пористого теплоізоляційного матеріалу та конструкції теплового захисту енергетичних установок, задаючи його структурні характеристики. Використання результатів дослідження дозволяє значно зменшити коефіцієнт теплопровідності сучасних пористих теплоізоляційних матеріалів та елементів теплового захисту промислових енергетичних установок, що підвищить енергоефективність промисловості держави.

*Weaknesses.* Серед слабих сторін даного дослідження є невизначеність впливу факторів, що розглядаються та комплексних показників пористої структури на міцність кінцевого матеріалу. Так, коефіцієнт теплопровідності матеріалу є головною характеристикою для теплоізоляції, але можлива низька міцність кінцевого пористого матеріалу значно звужує область його застосування. Також, до слабких сторін можна віднести трудомісткість виготовлення матеріалу з заданими розмірами та розташуванням закритих пір.

*Opportunities.* До перспектив подальших досліджень варто віднести вдосконалення знайденого регресійного рівняння коефіцієнта теплопровідності шляхом розширення діапазонів вхідних параметрів моделі.

*Threats.* До труднощів застосування отриманих результатів відносяться значні капітальні затрати на створення нового теплоізоляційного пористого матеріалу з заданим ефективним коефіцієнтом теплопровідності як елементу теплового захисту енергетичного обладнання. При виробництві вогнетривкої цегли напівсухим способом необхідні зміна прес-форм та зміна режимів термообробки. При шлікерному виробництві вогнетривів – це затрати, пов'язані з виробництвом складної форми розливу, та збільшення часу для розливу шлікеру. При виробництві піноскла великі затрати пов'язані з розробкою нового методу створення необхідної пористої структури.

## 5.9 Висновки до розділу

1. Залежність електронної складової коефіцієнтів теплопровідності елементів теплового захисту енергетичного обладнання від пористості є лінійною, як для шахового розташування пір, так і для коридорного. На теплопровідність електропровідних виробів довжина шляху проходження електронів впливає набагато менше за загальну пористість матеріалу.

2. Підтверджена та уточнена висунута гіпотеза: магнітні поля в електропровідному матеріалі з порами меншими за 6 мм, що виникають при проходженні струму 100 А крізь нього, збільшують коефіцієнт теплопровідності до 2 % завдяки створенню додаткового градієнту фазових напруг на поверхні пори. Для зменшення теплопровідності пористих електропровідних виробів з невеликим розміром пір (до 6 мм) необхідна діелектрична ізоляція по внутрішній поверхні пір.

3. На коефіцієнт теплопровідності електропровідних елементів теплового захисту енергетичного обладнання суттєво впливає форма пір. Так, при формі пір у вигляді еліпса, який розташовано перпендикулярно тепловому потоку більшим діаметром й при розташуванні вздовж теплового потоку, різниця в коефіцієнті електронної теплопровідності склала 59%. При заміні форми пір з кола на еліпс, перпендикулярний тепловому потоку теплопровідність електропровідних виробів знизиться на 27%. Різниця в значеннях коефіцієнту теплопровідності між шаховим та коридорним розташуванням пір у формі кола склала усього 0,66%. Найефективнішою формою пір є форма витягнутого еліпса, розміщеного перпендикулярно тепловому потоку.

4. Різниця значення конвективної складової ефективного коефіцієнту теплопровідності елементів теплового захисту енергетичного обладнання між коридорним та шаховим розташуванням пір з ростом діаметру пір зникає.

5. При збільшенні розміру каналів у тепловому захисті енергетичного обладнання з 3,2 мм до 15 мм конвективна складова ефективного коефіцієнту теплопровідності збільшується у 2,5 рази.

6. Максимальний градієнт температури направлено по найкоротшій відстані між каналами конструкції теплового захисту, а по аналогії й між порами електропровідних пористих виробів та матеріалів, що сприяє збільшенню конвекції у даному напрямі.

7. За температури більших 31 °С повітря по порі в каналах 8 мм конструкції теплового захисту енергетичного обладнання сприяє передачі теплоти конвекцією, а при нижчих температурах – збільшує тепловий опір, оскільки конвекція дуже незначна або відсутня.

8. При габаритному розмірі пори менше за 7 мм зміни теплового опору теплоізоляційного матеріалу в залежності від форми пори не суттєві та не перевищують 1,38%. Це пов'язано з низьким коефіцієнтом теплопровідності матеріалу та з низькою конвекцією у порах.

9. При зменшенні діаметра сферичної пори у теплоізоляційному матеріалі до 10 мм змінюється рух ліній току повітря у порі. Вони стають спіральними. При цьому швидкість руху повітря у порі діаметром 10 мм менша за швидкість руху повітря у порі діаметром 20 мм. Спіральність руху ліній току пояснюється самоорганізацією конвективної комірки подібно до комірки Бенара. Для збільшення теплового опору теплоізоляційних матеріалів спіральний рух ліній току конвекції у сферичній замкнутій порі ефективніший за поперечний рух з частковим потоком вздовж нижнього та верхнього полюсів сфери.

10. Максимального значення тепловий потік набуває на фронтальній поверхні сферичної пори й стає більшим за тепловий потік у матеріалі. Збільшення теплового потоку пояснюється впливом конвекції, а саме тим, що тепловий потік під впливом конвекції розгортається від полюсів і частково прямує в зворотню сторону, де складається з тепловим потоком, що направлений на фронтальну частину пори.

11. 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  $10 \text{ Вт/м}^2$  термічний опір теплопровідності менший за термічний опір теплопровідності при тепловому потоку  $100 \text{ Вт/м}^2$ . Це пояснюється різницею температур на поверхні пори. Для діаметру пори у 10 мм й більше конвекція стає суттєвою та зменшує термічний опір настільки, що він стає менший за термічний опір теплопровідності матеріалу без пір. Для створення пористого теплоізоляційного матеріалу рекомендується використовувати пори менше за 8 мм при невеликій різниці температур вздовж пори (до  $10^\circ\text{C}$ ).

12. Залежність теплового опору від діаметра пори є логарифмічною.

13. Залежність теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів від температури можна описати лінійними або логарифмічними залежностями (коефіцієнт детермінації не відрізняється більш ніж на 5%). Визначення залежності коефіцієнту теплопровідності пористого теплоізоляційного матеріалу від температури надає можливість спростити кількість вхідних факторів шляхом їх поєднання.

14. Визначено, що рівномірність розміщення пір у пористому теплоізоляційному матеріалі значно впливає на його ефективний коефіцієнт теплопровідності (для глиноземистих теплоізоляційних матеріалів різниця досягає 29,9 %).

15. Найбільший вплив (80%) на ефективний коефіцієнт теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок будуть чинити розмір пори вздовж теплового потоку та сумарний вплив розміру пори, перпендикулярний тепловому потоку з градієнтом температури.

16. У розкодованому вигляді спрощене рівняння узагальненого коефіцієнту теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою

для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок матиме наступний вигляд

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

17. Теплопровідність початкового матеріалу без пір  $\lambda_{\text{мат}}$  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 теплопровідність матеріалу. Градієнт температури впливає на теплопровідність кінцевого матеріалу не лінійно та не прямопропорційно. Кількість пір через коефіцієнти парних взаємодій прямопропорційно впливають на ефективний коефіцієнт теплопровідності конструкцій матеріалів з пористою структурою для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок.

18. При створенні нових пористих теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкції теплового захисту енергетичного обладнання необхідно дотримуватися наступних параметрів: габаритний розмір пори вздовж теплового потоку – 2 – 4 мм; габаритний розмір пори, перпендикулярний тепловому потоку – 8–15 мм ; кількість пір у матеріалі – 9 шт. на  $6,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ .



## **6 СТВОРЕННЯ НОВИХ ВИСОКОПОРИСТИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ГІДРОСИЛКАТІВ**

У теплоенергетиці, чорній і кольоровій металургії, будівельній промисловості з'явилася необхідність заміни стандартних футеровок, вогнетривів, тепло- і вогнезахисних матеріалів та інших теплоізоляційних матеріалів які використовуються в даний час, на аналоги з більш високими експлуатаційними характеристиками [170-174]. Такими аналогами є високопористі теплоізоляційні матеріали [175-180].

Поширеними теплоізоляційними матеріалами на основі глинозему є вогнетриви. В Україні виробництво вогнетривів зосереджено на 18 основних спеціалізованих підприємствах: Ватутінський, Великоанадольський і Часівоярський вогнетривкий комбінат, ПАТ «Запоріжвогнетрив», «Білокаменські вогнетриви», Овруцький гірничо -збагачувальний комбінат, Дружківське і Кіровоградське рудоуправління, Кондратівський, Пантелеймонівський, Костянтинівський, Красногоровський, Микитівський, Красноармійський дінасовий заводи, АТ «Огнеупорметаллсервіс» і компанія «Керамос Мінерал», Христофорівський завод вогнетривких блоків і бетонів, Михайлівське виробництво вогнетривів. Наукову базу і передові технології забезпечують такі організації, як НметАУ, Національний хіміко -технологічний університет (м. Дніпропетровськ) та УкрНДІ вогнетривів ім. А.С. Бережного (м. Харків). Нажаль, з наростаючою кризою, виробництво на цих підприємствах знизилося більше ніж у два рази тільки завдяки витиснення вітчизняної продукції імпортною [181]. Тому розробка нових вогнетривів з покращеними теплофізичними характеристиками є актуальною задачею енергетики.

Розглянемо дві можливості вдосконалення теплоізоляційного високопористого матеріалу на основі глинозему під час формування пористої структури: методом пресування та спученням сировинної суміші (водяними парами та газами що виділяються при хімічних реакціях). Окремо розглянемо створення композиційного матеріалу в якості елемента теплового захисту

енергетичного обладнання, де глинозем може бути і як основа, і як зв'язуюче [182].

Виходячи з результатів, отриманих у попередніх розділах, при створенні сировинної суміші, з якої буде виготовлятися пористий теплоізоляційний матеріал, необхідно мінімізувати розміри вихідних компонентів [183]. Час термічної обробки сировинної суміші необхідно визначити таким, щоб він припадав на кінець другого етапу пороутворення. Цей час можна визначити з формули

$$\left\{ \begin{array}{ll} n_{pore} = \tau_s \cdot N_1 \cdot B \cdot e^{-\frac{16 \cdot \pi \cdot \sigma^3}{3 \cdot k_B \cdot T \cdot (p_{kr}^{(1)} - p)^2}} & \text{if } \tau_s < \tau_1 \\ n_{pore} = \tau_s \cdot \xi_1 \cdot (1 - P) & \text{if } \tau_1 < \tau_s < \tau_2, \\ n_{pore} = \tau_s \cdot \xi_2 \cdot P & \text{if } \tau_s > \tau_2 \end{array} \right.$$

де  $\tau_s$  - час спостереження.

При  $\tau_s < \tau_2$  повинна виконуватися залежність  $\tau_s = \frac{n_{pore}}{\xi_1 \cdot (1 - P)}$ , але найпростіше це визначити, побудувавши експериментальні криві пороутворення для обраного матеріалу.

Найбільший тепловий опір теплоізоляційного матеріалу буде при наступних структурних характеристиках: габаритний розмір пори вздовж теплового потоку 2 – 4 мм; габаритний розмір пори, перпендикулярний тепловому потоку, більше за 8 мм (розмір пори більше 15 мм не досліджувався); кількість пір 9 шт. на  $6,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ .

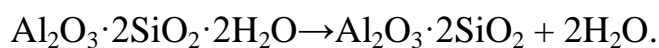
При створенні високопористого теплоізоляційного матеріалу спученням сировинної суміші водяними парами та газами, що виділяються при хімічних реакціях, необхідно звести до мінімуму вміст вуглецевих газоутворювачів, а також вилучити залізо з вихідної суміші. Необхідно мінімізувати в'язкість

суміши та дотримуватися мінімально можливого градієнта температури [184]. Також необхідно вилучити домішки з температурою плавлення вище за температуру розм'ягчення основного матеріалу. Але для створення витягнутих пір чисту глину використовувати неможна, глина повинна містити домішки (наприклад невеликі домішки алюмінію). Для створення пір в результаті хімічної реакції, перевагу необхідно надавати реакціям, які проходять при незначній температурі. Різниця між хімічними потенціалами матеріалу та газу, що утворює пору, повинна бути максимальною [185]. Серед пороутворювачів найпоширенішими є газу  $\text{CO}_2$  та  $\text{SO}_2$ .

Зазвичай вогнетриви виробляються в Україні методом пресування. Природна вогнетривка сировина в більшості випадків не готова до безпосереднього використання [186], тому над нею здійснюють цілий ряд дій, що включають дроблення, збагачення, сушіння, подрібнення, класифікацію та ін. Детальна схема збагачення глини наведена у [187]. На заводі ПАТ «Запоріжвогнетрив», виробництво вогнетриву здійснюється по схемі, яка відображена на рис. 6.1.

Створення високопористого теплоізоляційного матеріалу методом пресування має декілька переваг. По-перше, це простота методу, по-друге, це можливість пресування матеріалу будь-якої форми. Так, для створення закритих пір у вогнетривах, можна пресувати пластини з отворами необхідного розміру. Данні пластини можна спікати або склеювати та отримувати задану раціональну пористу структуру.

При будь-якому методі створення вогнетривів важливо приділяти особливу увагу обпалу. Основним процесом під час обпалу глини це дегідратація глинистого матеріалу



Створення муліту проходить по наступній реакції



Інтенсивність утворення муліту з каолініту обумовлена наступними факторами: мінералізуючі добавки, температура випалу, тривалість витримки і дисперсність початкового матеріалу.

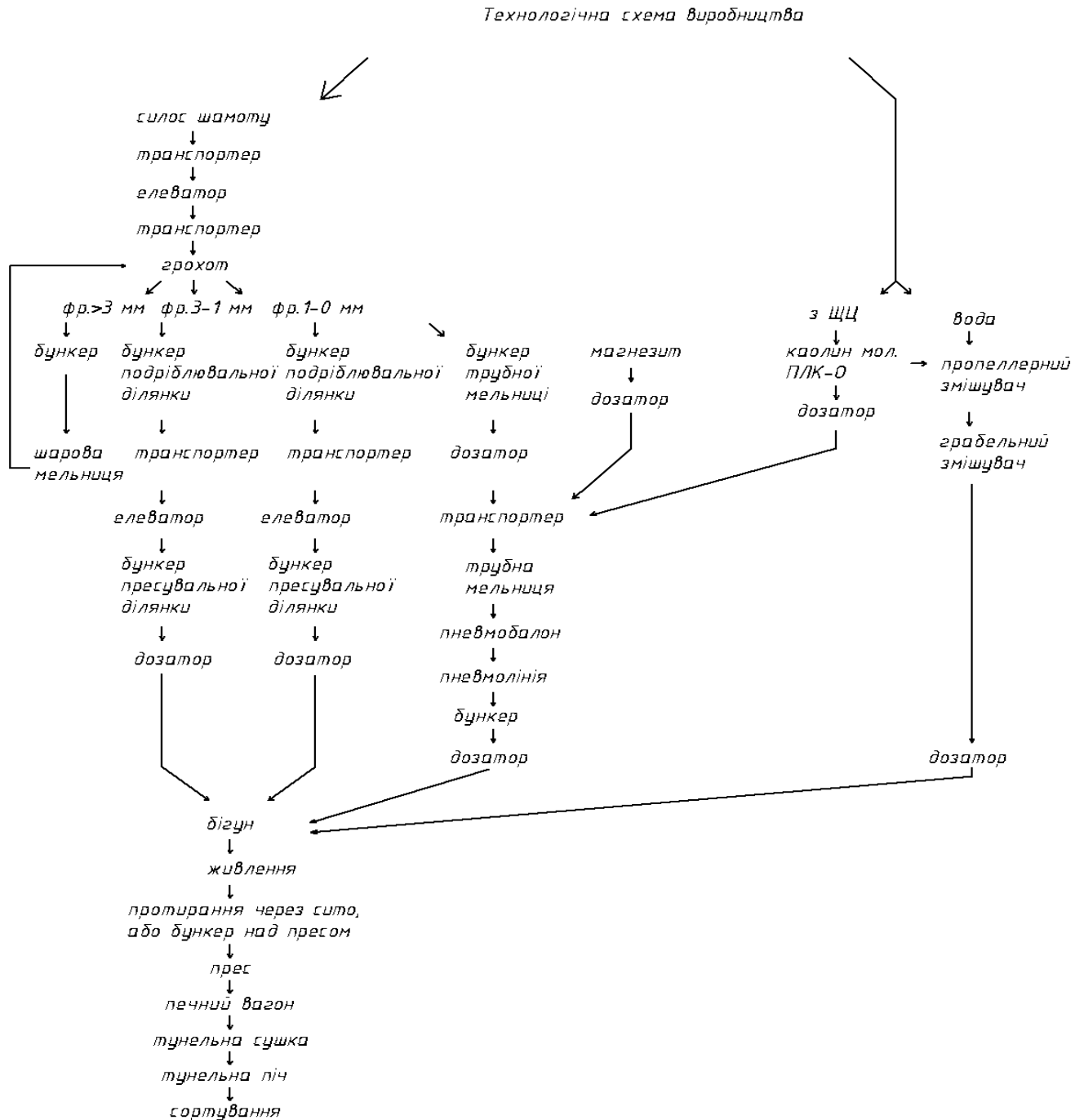


Рисунок 6.1 – Технологічна схема виробництва

Під час обпалу матеріалу значно змінюються його теплофізичні властивості. Процеси спікання в присутності рідкої фази супроводжуються пороутворенням завдяки спучуванню в місцях виділення газоподібних продуктів реакцій, що протікають при спалаху і горінні органічних речовин, видалення хімічно зв'язаної води глинистих фракцій і спікання частинок з перетворенням зернових порожнеч у внутрішні пори [188]. При цьому в основному утворюються пори закритого і напівзакритого типу, стінки яких зміцнюються при змочуванні склофазою.

Маючи необхідну структуру матеріалу та рекомендації по формуванню цієї структури, створимо новий високопористий вогнетривкий теплоізоляційний матеріал.

### **6.1 Створення високопористого теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему шляхом пресування пластин з наступним їх спіканням**

За початкову суміш було обрано сіоліт. Сировинна основа сіоліта - крем'янисті гірські породи з високим вмістом кремнезему [189]. Отримують сіоліт також через взаємодію природної сировини (трепелу, опоки та інших матеріалів, які містять аморфний кремнезем) з каустичною содою (NaOH). Сіоліт змішувався з водою до вологості 60%. Перед виробництвом сировина підвергалася помелу у млинах. Ступінь подрібнення дорівнювала більше сотні (тонкий помел). Розсівання проводилося у грохотах. З отриманого порошку виготовлялася вогнетривка цегла.

Спочатку гідравлічним пресом формувалися пластини товщиною  $10 \pm 0,5$  мм. Поверхня пресу була розроблена таким чином, щоб під час пресування плит у них обраховувалися отвори  $4 \times 15$  мм. Це здійснювалося шляхом варки металевих пластин по поверхні пресу. Схема розташування отворів у пластині зображена на рисунку 6.2. Відстань між отворами обиралася таким чином, щоб найкоротша відстань між порами була направлена вздовж найменшого розміру пори, тобто щоб не утворювати конвективні токи у порі

(більш детально розглянуто у третьому розділі). Макропористість такої пластини складає 15,4 %. Після формування, пластини піддавалися чистки стисненим повітрям.

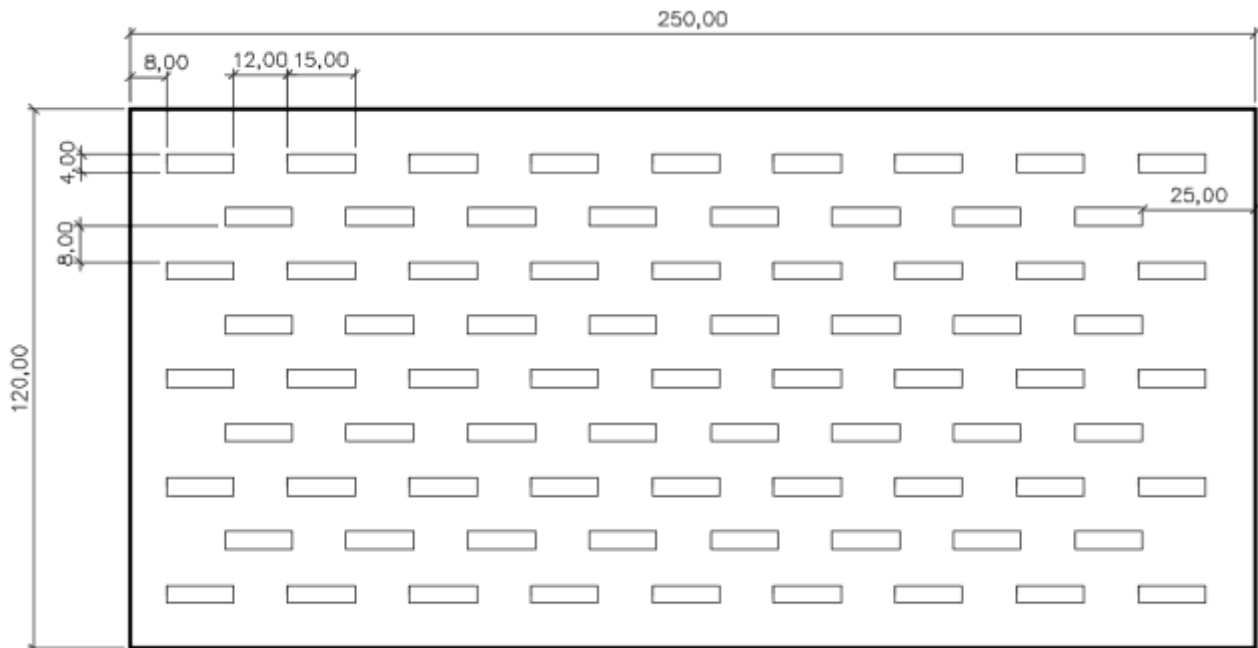


Рисунок 6.2 – Схема розташування отворів у пластині

Також виготовлялися пластини без отворів. Поверхні пластин змочувалися невеликою кількістю води за допомогою пульверизатора, після чого на них наносився мікропрошарок глинозему. Пластини (9 шт.) по черзі складувалися у єдину цеглу таким чином, щоб перша та остання пластини були без отворів. Набір пластин товщиною  $91 \pm 0,5$  мм піддавався пресуванню до товщини  $88 \pm 0,5$  мм. Пресування здійснювалось на вулканізаційному пресі ВП-400-100-3Э. Розмір нагрівальних плит у ньому складає  $400 \times 400$  мм, що є достатнім для поставленої мети. Робочий тиск  $200 \text{ кг/см}^2$ . Температура під час пресування складала  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Час витримки при даній температурі склав 10 хвилин. Так було отримано цеглу з замкнутими порами заданого розміру. Після пресування цегла містилася у піч, де обпалювалася за температури  $1250 \text{ }^\circ\text{C}$  на протязі 2 годин. Серед недоліків варто зазначити слабу міцність прошарку. При падінні з метрової висоти цегла розбивалася на декілька пластин.

Було вирішено обрати температуру обпалу 1250 °С, оскільки при даній температурі збільшується кількість муліту та відбувається вдосконалення його кристалічної решітки [188].

У статті [190] автори стверджують про можливість спікання шарів за допомогою високотемпературного синтезу, але конкретні параметри реакцій що проходили у реакторі не вказуються.

Теплопровідність цегли вимірювалася у лабораторії енергозбереження та енергоефективних технологій Запорізькій державній інженерній академії. Теплопровідність цегли із Сіоліту без пір при обраних параметрах обпалу дорівнювала 0,77 Вт/(м·К), міцність на стиск 11,55 МПа. Теплопровідність цегли із Сіоліту з порами дорівнювала 0,53 Вт/(м·К), міцність на стиск 10,3 МПа. Міцність на стиск для стандартних виробів дорівнює 20-50МПа [191]. Можна сказати, що обрана структура цегли є задовільною. Але кількість пір при даному методі дорівнює 9 шт. на  $8,76 \cdot 10^{-6}$ . Згідно попередньо розроблених рекомендацій необхідно збільшити кількість пір. Для того щоб збільшити кількість пір необхідно розробити нові пластини з отворами замість суцільних пластин. Розроблена нова пластина відображена на рисунку 6.3. Після формування, пластини піддавалися чистки стисненим повітрям.

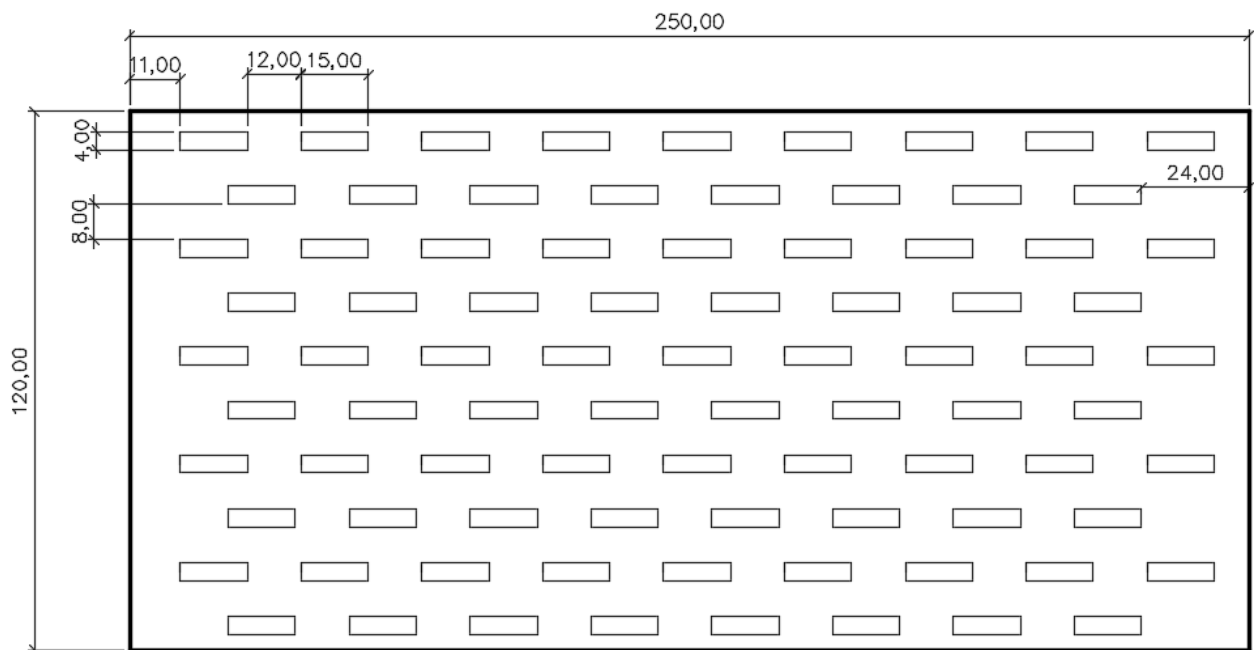


Рисунок 6.3 – Схема розташування отворів у другій пластини

Поверхні пластин змочувалися невеликою кількістю води за допомогою пульверизатору, після чого на них наносився мікропрошарок глинозему. Пластини (9 шт.) по черзі (рис.6.3 та рис.6.2) складувалися у єдину цеглу. Після пресування цегла містилася у піч де обпалювалася за температури 1250 °С на протязі 2 годин. Коефіцієнт теплопровідності виробленої цегли із Сіоліту з порами дорівнювала 0,45 Вт/(м·К), теплоємність 0,93 кДж/(кг·К), міцність на стиск 7,1 МПа.

## 6.2 Створення високопористого теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему шляхом спучення

За сировинну основу обрано матеріал, який являє собою монолітну аморфну масу, виготовлену шляхом низькотемпературної обробки вихідної суміші гірських порід, із значним вмістом аморфного кремнезему (трепел, опока і ін.), бікарбонату натрію, глини в суміші з водним розчином каустичної соди [64,192]. Даний матеріал дуже схожий на Сіоліт. Показники якості сировини наведені у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

### Показники якості сировини

Показник	Величина показника
Відносна вологість, %, не більше	46
Середня густина, кг/м <sup>3</sup> , не менше	1450
Вміст діоксиду кремнію, %	52
Вміст оксиду алюмінію, %	8
Вміст оксиду заліза, %, не більше	5
Вміст оксиду кальція, %, не більше	10

Як видно з таблиці 6.1 вміст оксиду заліза не перевищує 5 %. Цього вдалося досягнути підбираючи гірські породи різних родовищ.



### 6.2.1 Створення керамзиту з мінімальним коефіцієнтом теплопровідності

Керамзит є поширеним матеріалом який використовують і як окрему теплоізоляційну засипку і як наповнювач для бетонної суміші. Виготовляється керамзит або з глинозему, або з суміші глинозему та різних добавок (як правило відходів виробництва) [193,194]. Гранули керамзиту можна виготовляти пластичним методом (попередня сушка, формування циліндрів на дірчастих вальцях та випал у барабанній печі) або шлікерним методом (спучення у барабанній печі або вихровому апараті). При створенні керамзиту вибір параметрів технологічної обробки початкової суміші буде значно впливати на коефіцієнт теплопровідності й міцність кінцевого продукту. Як правило, керамзит оцінюють по коефіцієнту спучення, не надаючи уваги теплофізичним характеристикам. Тому дослідження методу визначення таких параметрів, при яких будуть досягнуті оптимальні теплофізичні параметри, є важливою задачею для промисловості, а розробка і впровадження нових ефективних матеріалів, що мають більші фізико-механічні і теплофізичні характеристики, є актуальною задачею енергетичної галузі.

Найбільш відомим проблемним місцем є відсутність методів визначення оптимальних технологічних параметрів термічної обробки сировини для отримання керамзиту з малим коефіцієнтом теплопровідності. Причиною цього є те, що існуючі методи направлені на створення муліту під час обпалу глиноземистої сировини, як речовини достатньої міцності. Хоча, коли керамзит використовується як теплоізолююча засипка або як добавка до бетонної суміші, то зменшення коефіцієнта теплопровідності при утворенні структури керамзиту має більшу вагу за значення міцності.

Для визначення оптимальних технологічних параметрів виробництва керамзиту з заданої глиноземистої суміші використовувався метод планування експерименту та оптимізація отриманого рівняння методом Лагранжу з умовами Куна-Такеру. До недоліків запропонованого методу можна віднести необхідність проведення лабораторних експериментів.

Виробництво та використання легкого бетону з керамзиту для елементів конструкцій описано в [195]. Досліджено міцність такого бетону в хімічно агресивних рідких та газоподібних середовищах. Окремо досліджено вплив високої концентрації діоксиду вуглецю, діоксиду сірки, хлору та нафти. Однак відсутній аналіз теплофізичних параметрів матеріалу та їх зміни під час експериментів.

Можливість виготовлення керамзиту на основі відходів виробництва розглянуто в [117]. Проведено дослідження зі зразками різного хімічного складу. Проаналізовано фізичні параметри як сировини так і керамзиту. Також продемонстровано пористу електропровідну конструкцію, отриману завдяки додаванню керамзиту. Відсутній аналіз параметрів пористості та теплопровідності. Однак, використавши продемонстровану технологію виробництва пористого металевих матеріалу завдяки керамзиту та інтерметалідів, розглянутих в роботі [196], можна отримати високопористу композиційну конструкцію теплового захисту з низькою щільністю, високою температурою плавлення та високою міцністю.

Детальне дослідження мікроструктури керамзиту представлено в [197]. Для дослідження було використано оптичний мікроскоп, сканувальний електронний мікроскоп та мікротомографія. Показані форми, розміри, розташування пір та їх контакт один з іншим. Проаналізовано параметри пористості керамзиту. Однак дослідження були проведені лише для одного виду керамзиту. Також відсутній аналіз впливу мікроструктури на фізичні параметри матеріалу.

Метод виробництва керамзиту на основі глини в плавильному конверторі наведено у [80]. Така технологія дозволяє отримувати керамзит з заданими параметрами: питома вага в діапазоні 160-850 кг/м<sup>3</sup>; міцність на стиск в діапазоні 0,78-14,4 МПа. Отриманий керамзит запропоновано використовувати для виготовлення легких бетонів. Однак в роботі не розглянуто теплофізичні параметри керамзиту. В [198] проведено аналіз вологості та теплопровідності стін з легких блоків. В якості матеріалу блоків

було взято газобетон, керамзитобетон та бетон зі сланцевою золою. В якості теплоізоляційного матеріалу використано мати з поліестеру та скловати. Проведені дослідження демонструють зміну вологості та теплопровідності матеріалів протягом часу. Відсутня інформація щодо хімічного складу та загальної пористості використаних матеріалів.

Керамзит можливо використовувати й в якості засипного матеріалу для зменшення навантажень на опорні стіни або відкоси біля доріг [199]. Також його можливо використовувати як засипку з керамзиту для «зелених» будівель та дахів.

В [200] досліджено керамзит, виготовлений з сировини, яка була добута в двох провінціях Іраку. Представлено хімічний аналіз використаної сировини. Об'ємна щільність керамзиту склала  $448 \text{ кг/м}^3$  для першого зразка та  $280 \text{ кг/м}^3$  для другого. Надано інформацію щодо пористості, насипної щільності та водопоглинаючих властивостей кінцевого матеріалу. Продемонстровано зміну форми гранул керамзиту в залежності від температури їх обробки (від  $1000\text{--}1150 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Однак відсутній аналіз теплофізичних властивостей кінцевого матеріалу.

Вплив летючої золи, зольного залишку та керамзиту на властивості бетону досліджено в [201]. Проведено детальні дослідження міцнісних характеристик зразків. Дослідження проводились як при постійному так і при змінному навантаженні. Максимальна кількість часу під навантаженням складала 56 днів. Незважаючи на детальний опис проведених експериментів відсутні будь-які дані про хімічний склад матеріалу.

В [202] запропоновано виготовляти гранули керамзиту з використанням наступних складових: глина, озерна сапропель, тирса та гліцерин. В роботі детально описано процес підготовки сировини та термічну обробку матеріалу. Показано зміну форми гранул при різних температурах випалу для некарбонатної глини без домішок та для глини з 3% сапропелі. В роботі продемонстровано, що при певній концентрації домішок досягається збільшення пористості. Також зазначено, що під час випалу гранул при

використанні органічних домішок, має місце викид газів. Виходячи з експериментальних даних, було виявлено, що кількість сапропелі в суміші не повинна перевищувати 5% або тирси не більше 3%. В роботі не приділено належної уваги теплофізичним властивостям розроблених матеріалів.

Розглянемо створення гранул керамзиту з сировини з показниками якості по таблиці 6.1.

Гранули керамзиту з низьким коефіцієнтом теплопровідності можуть використовуватися як теплоізоляційна засипка для теплового захисту елементів промислових енергетичних установок або як теплоізоляційна добавка до бетону. При використанні керамзиту з покращеними властивостями у якості добавки до бетону теплопровідність останнього зменшується, що веде до зниження енерговитрат приміщень та споруд. Знайдений експериментально коефіцієнт теплопровідності такого бетону може бути використаний для моделювання теплових режимів приміщень по моделі розробленої Дешко В.І. [203].

Як було показано у першому розділі, при шлікерному методі на кінцеву теплопровідність гранул будуть впливати температура, початкова вологість суміші та час термообробки. Мінімальний коефіцієнт теплопровідності для даного складу суміші буде при початковій вологості 38 % та температурі 272 °С [204]. Енергетичні затрати, що витрачені на виробництво, можна оцінити по методиці, запропонованій Ю.Ф. Снежкіним [205].

Час термічної обробки матеріалу (як гранул так і цегли) визначимо, побудувавши криву пороутворення (рис.6.4). Експеримент даної сировинної суміші та обробка даних проводилися аналогічно експериментам, розписаним у другому розділі.

З побудованої кривої пороутворення визначено оптимальний час термообробки для даного матеріалу - 15 хвилин (900 с.). Після термообробки матеріал повинен охолонути, після чого піддатися обпалу за температури 1200-1250 °С протягом 1,5-2 години.

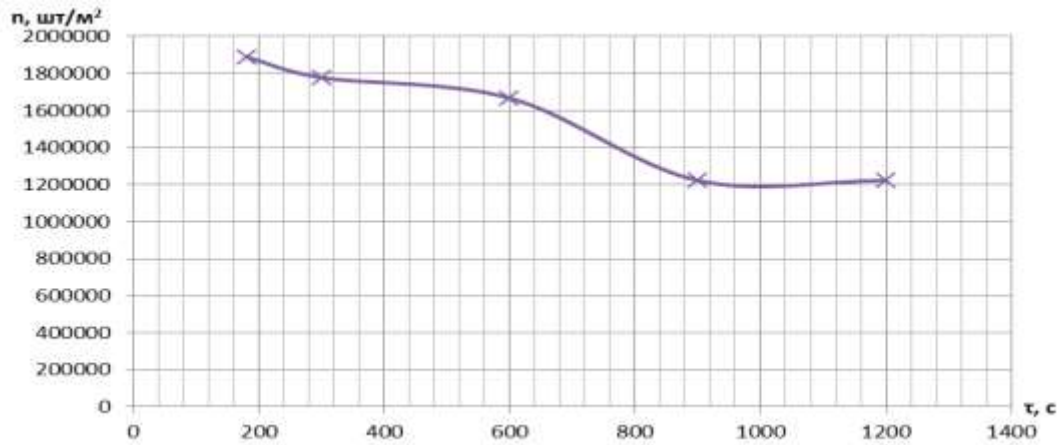


Рисунок 6.4 – Крива пороутворення для матеріалу з показниками якості по таблиці 6.1

Гранули керамзиту виготовлялися наступним чином. Глиняна суміш підсушувалася до вологості 38 % та вивалювалася на металевий піддон. Гранули формувалися шляхом пресуванням сітки з коміркою 6x20 мм. Після цього піддон з гранулами розміщувався у нагрівальній печі на 15 хвилин при 270 °С. Після нагрівальної печі гранули засипалися до барабанної печі де обпалювалися за температури 1250 °С протягом 1,5 години. Властивості отриманого керамзиту наведено у таблиці 6.2 в порівнянні з керамзитом П100. Фотографія готової продукції наведено на рисунку 6.5.

Таблиця 6.2

#### Властивості отриманого керамзиту

Показник	Значення показника отриманого керамзиту	Значення показника керамзиту П400 за ГОСТ 9757-90
Вогнетривкість	1750 °С	-
Пористість (уявна)	43,3 %	-
Пористість (істинна)	44,2 %	-
Термостійкість (кількість циклів до появи тріщин)	11-15	-
Міцність на стискання	10,6-14,1 МПа	10-11 МПа
Коефіцієнт теплопровідності	0,038-0,045 Вт/(м·К)	0,09-0,18 Вт/(м·К)
Питома теплоємність (насипна) при 25 °С	0,81 кДж/(кг·К)	-

Вогнетривкість визначалася шляхом порівняння поведінки випробуваного і стандартного зразків під час нагрівання (піроскопом). Вони мають форму усіченої піраміди з підставами у вигляді рівносторонніх трикутників зі сторонами 2 і 8 мм висотою 30 мм. Одна з граней піраміди розташовувалась перпендикулярно підставам. Під час нагрівання піроскопи втрачають форму, нахилиються. Момент торкання верхівки піраміди підкладки визначає вогнетривкість виробу.



Рисунок 6.5 – Фотографія готової продукції керамзиту з властивостями по таблиці 6.2

Також для особливих умов на АО «Мотор Січ» було виготовлено гідросилікати з сировини, що є в них в наявності. Показники якості сировини наведені у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3

Показники якості сировини на підприємстві АО «Мотор Січ»

Показник	Величина показника
Відносна вологість, %, не більше	55
Середня густина, кг/м <sup>3</sup> , не менше	1650
Вміст оксиду кремнію, %	46
Вміст оксиду алюмінію, %	12
Вміст оксиду заліза, %, не більше	6
Вміст оксиду кальція, %, не більше	12

Температурна обробка приймалася згідно аналогічним дослідженням. Фотографія гідросилікату, що було виготовлено на підприємстві з заданої сировини, зображено на рис. 6.6.



Рисунок 6.6 – Фотографія готової продукції гідросилікату з властивостями по таблиці 6.3

Гідросилікат виготовлений в промислових умовах закладався у форму та заливався розчином цементу, а отриманий виріб (рис.6.7) використовувався на в якості теплової ізоляції будівель, споруд та енергетичного обладнання з урахуванням особливих умов на АО «Мотор Січ», про що є відповідний акт впровадження.



Рисунок 6.7 – Фотографія фрагменту теплоізоляції з запропонованого керамзиту, що використовувався на підприємстві

Отримана теплоізоляція мала наступні теплофізичні характеристики: коефіцієнт теплопровідності 0,114-0,119 Вт/(м·К), питома теплоємність при 22 °С дорівнювала 1,33-1,41 кДж/(кг·К).

Також було створено керамзит на основі білої глини. Для отримання оптимальних параметрів термообробки використовувався метод планування експерименту. Досліджувався вплив температури термообробки  $X_1$ , часу термічного впливу  $X_2$ , вологості початкової суміші  $X_3$  на насипну теплопровідність  $Y_1$  та міцності на стиск  $Y_2$  керамзиту.

У таблиці 6.4 відображені умови проведення експериментів. Для побудови квадратичної моделі залежності вихідних параметрів від досліджуваних факторів був використаний ортогональний план з ядром  $2^3$ . Результати експериментів зведено у таблицю 6.5.

Таблиця 6.4

## Умови проведення експерименту по формуванню керамзиту

№ п/п	Фактор	Код	Рівні факторів			
			-1	0	1	$\Delta$
1	Температура, °С	$X_1$	200	500	800	300
2	Час термообробки, хв	$X_2$	5	10	15	5
3	Вологість, %	$X_3$	10	30	50	20

Насипний коефіцієнт теплопровідності вимірювався вимірювачем теплопровідності «ИТП-МГ4» фірми «СКБ Стройприбор». Міцність матеріалу визначена методом Роквелла. При визначенні міцності по Роквеллу в випробне тіло вдавлюється алмазний конус з кутом при вершині 120 град. Конус вдавлюється при додатку двох послідовних навантажень: попереднього ( $P = 10$  кгс) і основного. За глибиною проникнення конуса визначалася міцність досліджуваного матеріалу [206].



Таблиця 6.5

## Результати експерименту

№ п/п	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1$	$Y_2$
1	+1	+1	+1	0,061	0,09
2	-1	+1	+1	0,035	0,2
3	+1	-1	+1	0,073	0,19
4	-1	-1	+1	0,041	0,25
5	+1	+1	-1	0,067	0,07
6	-1	+1	-1	0,078	0,21
7	+1	-1	-1	0,091	0,11
8	-1	-1	-1	0,095	0,12

Після обробки даних отримані наступні рівняння регресії:

$$Y_1 = 0,0676 + 0,005375X_1 - 0,007375X_2 - 0,015125X_3 - 0,001625X_1X_2 + 0,009125X_1X_3 + 0,002875X_2X_3 \rightarrow \min;$$

$$Y_2 = 0,155 - 0,04X_1 - 0,0125X_2 + 0,0275X_3 - 0,0225X_1X_2 - 0,0025X_1X_3 - 0,025X_2X_3.$$

Проаналізувавши отримані регресійні рівняння, можна зробити висновок, що зменшення температури термообробки зменшує коефіцієнт теплопровідності та збільшує міцність матеріалу. Збільшення часу термічної обробки зменшує теплопровідність й міцність, а збільшення початкової вологи

у суміші зменшує коефіцієнт теплопровідності та збільшує міцність гранул. При цьому найбільший вплив на міцність матеріалу надає температура термообробки, а на теплопровідність початкова волога.

Оскільки міцність гранул з білої глини замала, та гранули розпадаються під час тривалого впливу вологи, то даний матеріал можна використовувати лише як добавку у бетонну суміш. При цьому способі їх використання міцність гранул не має значення. Тому оптимізуємо тільки рівняння теплопровідності.

Задача оптимізації матиме наступний вигляд:

$$Y_1 = 0,0676 + 0,005375X_1 - 0,007375X_2 - 0,015125X_3 - 0,001625X_1X_2 + 0,009125X_1X_3 + 0,002875X_2X_3 \rightarrow \min;$$

$$X_1 \geq -1; \quad X_2 \leq 1; \quad X_3 \leq 1.$$

Для визначення оптимального режиму термічної обробки складалася функція Лагранжа

$$L = Y_1 + \sum \lambda_i \phi_i + \sum \mu_i \psi_i,$$

де  $\phi_i$  - обмеження в неявному вигляді.

Перепишемо обмеження задачі в неявному вигляді:

$$\begin{aligned} \phi_1(X) &= -1 - (x_1) = 0; \\ \phi_2(X) &= 1 - (x_2) = 0; \\ \phi_3(X) &= 1 - (x_3) = 0. \end{aligned}$$

Складемо допоміжну функцію Лагранжа

$$L(X, \lambda, \mu) = 0,0676 + 0,005375X_1 - 0,007375X_2 - 0,015125X_3 - 0,001625X_1X_2 + 0,009125X_1X_3 + 0,002875X_2X_3 + \mu_1(-1 - (x_1)) - \mu_2(1 - (x_2)) - \mu_3(1 - (x_3)).$$

Необхідною умовою екстремуму функції Лагранжа є рівність нулю її приватних похідних за змінними  $X_i$  та невизначеними множниками. Складемо систему

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial L / \partial X_1 = -0,001625X_2 + 0,009125X_3 - \mu_1 + 0,005375 = 0; \\ \partial L / \partial X_2 = -0,001625X_1 + 0,002875X_3 + \mu_2 - 0,007375 = 0; \\ \partial L / \partial X_3 = 0,009125X_1 + 0,002875X_2 + \mu_3 - 0,015125 = 0; \\ \mu_1(-1 - (X_1)) = 0, \mu_1 \geq 0; \\ \mu_2(1 - (X_2)) = 0, \mu_2 \geq 0; \\ \mu_3(1 - (X_3)) = 0, \mu_3 \geq 0. \end{array} \right.$$

Виконав рішення системи з перевіркою умов Куна-Таккера отримаємо наступні рішення:  $X_1 = -1; X_2 = 1; X_3 = 1$  при цьому  $Y_1 = 0,0351$  та  $X_1 = 0,012875, X_2 = 0,002875, X_3 = 0,021375$  при цьому  $Y_1 = 0,0673$ .

Отже, обираємо крайові параметри термообробки для білої глини: температура термообробки 200 °С, час термообробки 15 хвилин, вологість 50%.

Як показали експерименти, утворені гранули раціонально використовувати як наповнювач для вогнетривких бетонів. Можливо також використовувати розроблені гранули як наповнювач для звичайних бетонних сумішей для відновлення теплоізоляції теплотрас. Враховуючи, що на більшості ділянок теплотрас житлових масивів необхідна заміна теплоізоляції [207], то розроблений теплоізоляційний наповнювач має практичне значення для теплоенергетики України.

SWOT-аналіз результатів дослідження наведено нижче.

Strengths. Серед сильних сторін даного дослідження необхідно відзначити отримані рівняння регресії, адже їх аналіз дозволяє визначити найсуттєвіші фактори впливу на коефіцієнт теплопровідності керамзиту. Також не менш

важливими є результати, отримані за допомогою функції Лагранжа та умов Куна-Такера, які дають можливість створити керамзит з покращеними теплофізичними властивостями. У зв'язку з незадовільним станом огорожувальних конструкцій більшості вищих навчальних закладів України [208] бетонна суміш з розробленим матеріалом знизить питомі витрати на опалення державних закладів. Отримані результати та використаний метод можуть бути застосовані в подальших дослідженнях та служити базисом при створенні більш досконалого керамзиту.

Для промисловості виробництво більш високоякісного матеріалу дасть змогу конкурувати на ринку, тим паче, що переобладнання вже існуючих цехів підприємств виробництва керамзиту не потрібно.

*Weaknesses.* Серед слабких сторін даного дослідження є відсутність експериментальних зразків з покращеними теплофізичними властивостями, виготовлених у промислових умовах. Що в свою чергу вимагає проведення додаткового дослідження з готовими фізичними зразками. Також до слабких сторін можна віднести обмеженість дослідження двома типами сировини.

*Opportunities.* До перспектив подальших досліджень варто віднести вдосконалення знайдених рівнянь регресії за допомогою включення до керуючих факторів хімічного складу початкової суміші. Також перспективним є проведення аналогічних досліджень з використанням різноманітних домішок, які дозволять досягти меншої витрати сировини.

*Threats.* До труднощів застосування отриманих результатів слід віднести невеликі витрати коштів на впровадження запропонованої технології виробництва керамзиту на промислових підприємствах. Такі витрати будуть пов'язані з необхідністю закупки або видобутку необхідної сировини з потрібним хімічним складом.

### 6.2.2 Створення вогнетривкої пористої цегли шлікерним методом з мінімальним коефіцієнтом теплопровідності

В Україні вкрай необхідні нові технології енергозощадження. Це або розробка нових когенераційних технологій [209] або використання альтернативних та низькопотенціальних джерел енергії [210], або створення нових та покращення старих теплоізоляційних матеріалів [211]. Важливість та широкий спектр областей, що використовують вогнетриви надано в статті [212]. Зменшення коефіцієнта теплопровідності завдяки збільшенню пористості, методом GS (гелеутворення суспензії), застосовано для отримання глинозему вогнетривкої цегли в статті [213]. Недоліком даного методу є неможливість регулювання пористої структури вогнетриву. А розміри пор, структура пір і розміри зерна мають вплив на коефіцієнт теплопровідності [214]. Тому за аналізом [155] було розроблено схему розташування отворів (пустот) розмірами 4x15 мм у вогнетриву.

Використання вторинної сировини (мармуру, цеглин та ін.) у якості добавки розглядається авторами [215]. Авторами досягається раціональна структура вогнетриву та складу для максимальної міцності, але нажалі коефіцієнт теплопровідності отриманих вогнетривів не розглядається.

Мікроструктура вогнетриву не сильно впливає на теплопровідність цеглини [216], тому розглянемо покращення теплофізичних властивостей вогнетривів завдяки структуруванню крупних пір (пустот).

Сутність способу створення вогнетривів шлікерним методом полягає в тому, що компоненти керамічної маси попередньо тонко подрібнюють мокрим помелом у кульових млинах, а потім зневоднюють, отриманий шлікер на фільтр-пресах, в сушильних барабанах і розпилювальних сушарках до необхідної вологості. Цей спосіб застосовується, коли вироби виготовляються з багатокомпонентної маси, що складається з неоднорідних і трудноспекаючихся глин і додаткових матеріалів, коли потрібно підготувати масу для виготовлення керамічних виробів складної форми способом лиття, коли видобуток глини здійснюється за допомогою гідромоніторів і в ряді інших випадків.

Глина, віддозована скриньковим подавлювачем, надходить на дезінтеграторні вальці або стругач, на яких вона подрібнюється до шматків розміром 30-40 мм. При необхідності вона додатково подрібнюється на валковій дробарці. Сировинні матеріали очищаються від залістистих включень підвісними магнітами типу ММ-3 та ЕМІ-442, що розташовуються над конвеєрами. Глина та каоліни надходять в проміжні бункера і зберігаються окремо, дозуються з них за допомогою автоматизованих ваг типу ДСТ-70, 10-ДА, автоматизованої установки БВ-198 і ін. [217]. Таке автоматичне дозування забезпечує постійний склад маси і високу якість отриманих виробів. Компоненти керамічної маси окремо або спільно тонко подрібнюються в кульових млинах мокрого помелу періодичної дії.

Наступна операція - випал. Максимальна температура випалу і час витримки при цій температурі визначаються досягненням необхідного рівня спікання і завершеністю протікання фізико-хімічних процесів між компонентами вихідних матеріалів [218, 219]. Температура обпалу обиралася 1250 °С, оскільки при даній температурі збільшується кількість муліту та відбувається вдосконалення його кристалічної решітки [220].

Шлікер створювався з сировини з показниками якості по таблиці 6.1. Для мінімізації усадки додавався шамот у кількості 30 %. Для виготовлення зразка вогнетривкої цеглини, шлікер заливається у гіпсову форму. Фотографія гіпсової форми наведена на рис. 6.8. Глибина форми 90 мм. Форма мала стержні 4×15 мм, що розташовані по її об'єму. Схема розташування стержнів форми відповідала рисунку 6.2. Після розлиття шлікеру форма поміщалася до печі на 15 хвилин за температури 272 °С. Після печі цеглу діставали з форми та давали охолонути до кімнатної температури. Після чого її знову поміщали у піч та витримували 1,5 години за температури 1200 °С.

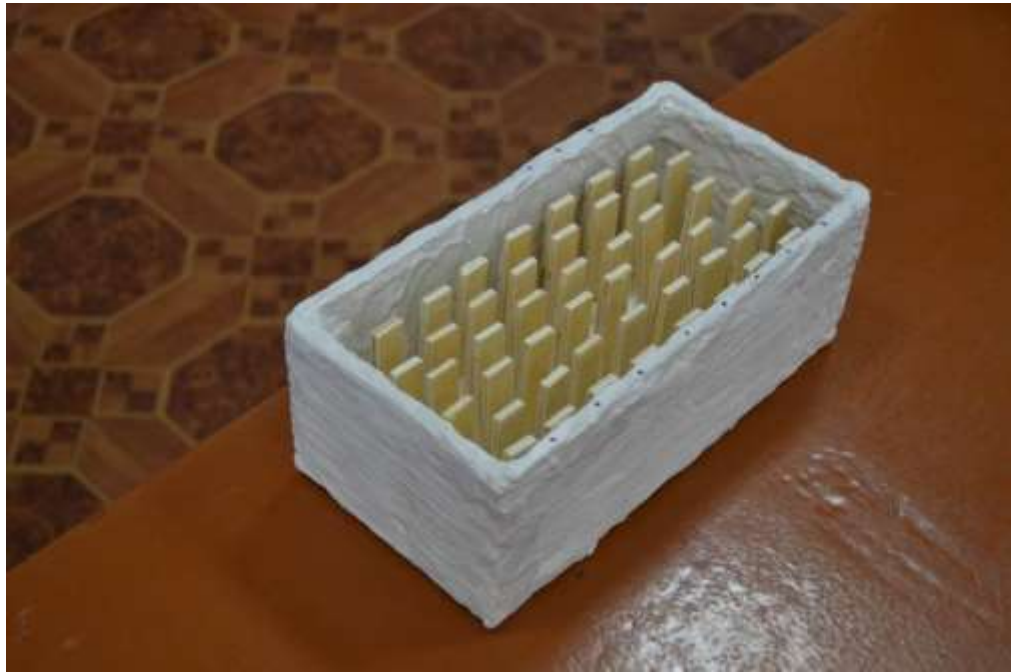


Рисунок 6.8 – Фотографія запропонованої форми для розливки шлікеру

Охолодження експериментального зразка пористої цегли проходило без протікання фізико-хімічних процесів. Зниження температури супроводжувалось затвердінням рідкої фази й термічним стисненням виробу.

Недоліком цього способу створення є неможливість створення оптимальної структури цегли (закритої пористості з розмірами пір 4x15x15). Властивості отриманої цегли наведено у таблиці 6.6.

Таблиця 6.6

Властивості отриманої пористої цегли з глинозему

Показник	Значення показника отриманої цегли	Значення показника цегли М200 ГОСТ 530-2012
Вогнетривкість	1750 °С	1150 °С
Пористість (уявна)	44,7%	-
Пористість (загальна)	51,6%	-
Термостійкість (кількість циклів до появи тріщин)	7-9	8-10
Міцність на стискання	5,8 МПа	17,5-20 МПа
Коефіцієнт теплопровідності	0,44 Вт/(м·К)	0,7-1 Вт/(м·К)

Теплопровідність отриманої цегли нижче за теплопровідність такої ж цеглини без отворів. Вогнетривкість не змінилася та залишилася високою. Міцність на стискання на 15 % нижче за міцність на стискання такої цеглини без отворів.

Фотографію отриманої вогнетривкої пористої цегли отриманої шлікерним литтям наведено на рис. 6.9.

Також було створено цеглу з закритими порами розмірами 4x15x15. Як було експериментально доведено у другому розділі, неможливо створити пори шляхом локального насичення вологою матеріалу. Тому, для створення порот, було обрано генезис деструкції. Так, у статті [221] розглядається створення вогнетривів з суміші глин та вторинної сировини відходів переробки паперу і тирси. Дані дослідження підтверджують можливість створення якісного пористого вогнетриву генезисом деструкції.



Рисунок 6.9 – Фотографія цегли, отриманої шлікерним литтям



Шлікер показниками якості сировини по таблиці 6.1 заливався у гіпсову форму шарами по 15 мм. У кожний шар поміщалися картонні заготовки радіусом 15 мм та товщиною 4 мм. Заготовки розміщувалися по схемі рисунку 6.2 та рисунку 6.3 по черзі. Після розлиття шлікеру на глибину 89 мм форма поміщалася до печі на 15 хвилин за температури 272 °С. Після печі, цеглу діставали з форми та давали охолонути до кімнатної температури. Після чого її знову поміщали у піч та витримували її 1,5 години за температури 1200 °С. Властивості цегли з закритими порами відображено в таблиці 6.7.

Таблиця 6.7

Властивості отриманої цегли з закритими порами

Показник	Значення показника
Вогнетривкість	1750 °С
Пористість (уявна)	44,7%
Пористість (загальна)	51,6%
Термостійкість (кількість циклів до появи тріщин)	7-9
Міцність на стискання	5,8 МПа
Коефіцієнт теплопровідності	0,44 Вт/(м·К)

Отримана цегла задовольняє своїми показниками по вогнетривкості та теплопровідності, але має низьку міцність на стискання. Вона може застосовуватися для футеровок промислових печей та іншого енергетичного обладнання.

### 6.3 Створення вогнетривких бетонів

Призначення вогнетривких сумішей це футерування робочих поверхонь теплових конструкцій, створених з алюмосилікатних виробів, бетонів та інших композиційних матеріалів. Найпоширеніші вогнетривкі суміші це алюмосилікатні і карбідкремнієві суміші. Монтаж цих сумішей здійснюється

наступними способами: заливка, торкретування, набивка, з армуванням та без армування. Вогнетривкість таких бетонів варіюється від 870 °С до 1870 °С.

Жаростійкі теплоізоляційні бетони підвищеної вогнестійкості використовуються для захисту відкритих ділянок газопроводів в місцях переходу через яри, балки, річкові перешкодження, де потрібні жаростійкі теплоізоляційні матеріали з температурою застосування до 1100 °С [222]. Таку температуру може розвивати струмінь палаючого газу при прориві газопроводу. Для захисту сусідніх трубопроводів необхідно їх покривати теплоізоляційними бетонними шкарлупами. Традиційні неорганічні теплоізоляційні матеріали (азбест, мінеральна вата та ін.) мають порівняно невисоку температуру застосування.

Залежно від об'ємної ваги жаростійкі бетони ділять на звичайній і легкій (останні з об'ємною вагою у висушеному стані менше 1500 кг / м<sup>3</sup>) [223].

Найбільшу увагу при створенні вогнетривких сумішей треба приділяти в'язучому компоненту. Звичайні вогнетривкі бетони мають стандартне значення в'язучого та містять близько 30 % глиноземистого цементу. Вони стійкі до температур від 1200 °С до 1800 °С. Підходять для загального застосування в печах, блоках пальників і промислових котлів. Мають високі якісні теплофізичні властивості, такі як зносостійкість, стійкість до теплових ударів і агресивного впливу шлаку.

Вибір в'язучого компонента по схожості хімічного складу з базовим може приводити до таких негативних наслідків як порушення цілісності футеровки при невеликому часі її експлуатації. У [224] рекомендується в якості в'язучого компонента використовувати рідке скло. Це підтверджують й дослідження [225]. Автор стверджує, що серед силікатних в'язучих, що застосовуються в жаростійких бетонах, найчастіше використовується рідке скло, яке представляє собою розчинені лужні силікати, що характеризуються статичною неупорядкованістю і властивостями кристалічних силікатів.

Існують також сухі суміші на основі портландцементу з добавкою шамоту, золи-винесення та глиноземистого цементу [226]. В якості в'язучого

можливо також використання глиноземистого і високоглиноземного цементу. Жаростійкість таких бетонів досягає температури 1200 °С (на портландцементі) і 1300-1800 °С у бетонів на основі сухих сумішей, де в якості в'язучого використовується глиноземний і високоглиноземний цемент.

Також в розробці вогнетривких бетонів з алюмінату кальцію широко використовуються нанотехнології. Застосування нанотехнологій направлено на отримання унікальних властивостей в'язучого матеріалу з високою міцністю на стиск [227]. Суттю технології є гальмування формування і розвитку кристалічного гідрату і стимулювання дрібнозернистої гідратної структури, як в'язучого компоненту для вогнетривких бетонів. Для цього розчин силікату натрію у сухому стані змішують з двокальцієвим силікатом. Вода для часткової гідратації цементу виділяється під час взаємодії між розчином силікату натрію і двокальцієвим силікатом. Обмежена кількість води в структурі твердіння забезпечує умови для формування вихідних нанокластерів і наношарів аморфних гідратів.

Пропонується використовувати в якості в'язучого для вогнетривів полімерні смоли, які отримані шляхом лужної активації алюмосилікатних джерел. В якості алюмосилікатів використовувати сирі кальциновані глини. Їх хімічний склад робить суттєвий вплив на кінцеві властивості полімерного в'язучого [228]. Для створення основи вогнетривкої суміші, виходячи з аналізу експериментів, проведених у другому розділі, було обрано світлу пластичну глину. Хімічний склад цієї глини відображено у таблиці 6.8. Втрати під час обпалу такої глини складають 8-14 %.

Таблиця 6.8

## Хімічний склад глини для вироблення вогнетривкої суміші

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
46,32 -	26,18 -	1,29 -	1,08 -	0,40 -	0,26 -	0,07 -	0,02 -	0,23 -
56,37	35,20	2,98	1,84	0,91	0,57	0,61	0,66	1,01

Обрана глина ретельно подрібнюється в валкових млинах до дрібнодисперсної фракції. Потім додавався порошок монокальцію алюмінату  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ . Отримана суміш після додавання до неї води використовувалася як вогнетривкий бетон. Жаростійкість такого бетону склала  $1550\text{ }^\circ\text{C}$ .

Отриманий бетон може бути використано наступними шляхами: шляхом шлікерного розливу та шляхом розпилу по поверхні. Найбільш перспективним є розпил суміші по поверхні, так як при шлікерному розливі збільшуються капітальні вкладення, пов'язані з виготовленням форм. Також деякі об'єкти металургії мають складну форму й виготовлення спеціальних форм під них значно ускладнює виробництво вогнетривів.

Пропонується використовувати метод розпилу такої суміші по патенту [229]. Заявлений метод складається з пневматичної подачі сухої вогнетривкої суміші в потік стисненого повітря через шланг до сопла, додаючи воду через трубопровід в соплі. Змочена суміш розпилюється на поверхні, яка підлягає облицюванню. При необхідності, для збільшення пористості та зменшення відносної ваги та коефіцієнта теплопровідності, можна додавати піно-активні добавки.

В якості наповнювача для жароміцних бетонів рекомендується використовувати розроблені гранули з білої глини. Також ефективно зарекомендували себе порожні скляні кульки [230]. В [231] автори стверджують що можна покращити сипкість суміші та збільшити об'ємну вагу шляхом додавання сферичних тугоплавких часток діаметром 30 мкм.

#### **6.4 Висновки до розділу**

1. Створена вогнетривка цегла набором пластин з заданими структурними характеристиками. Технологічні параметри: температура під час пресування складала  $200\text{ }^\circ\text{C}$ ; час витримки за даної температури 10 хв.; після пресування цегла поміщалася у піч, де обпалювалася за температури  $1250\text{ }^\circ\text{C}$  протягом 2 годин. Серед недоліків варто зазначити слабку міцність прошарку.

Теплопровідність виробленої цегли склала  $0,45 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , питома теплоємність  $0,93 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , а міцність на стискання  $7,1 \text{ МПа}$ .

2. 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  $6\times 20 \text{ мм}$ ); після цього піддон з гранулами розміщується у нагрівальній печі на 15 хвилин за  $270 \text{ }^\circ\text{C}$ ; після нагрівальної печі гранули засипаються до барабанної печі, де обпалюються за температури  $1250 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом 1,5 години. Коефіцієнт теплопровідності отриманого керамзиту склав  $0,0415 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , питома теплоємність (насіпна) при  $25 \text{ }^\circ\text{C}$   $0,81 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

3. Створено наповнювач для бетонів та вогнетривких бетонів на основі білої глини. Знайдено оптимальні параметри термообробки: температура термообробки  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , час термообробки 15 хв., початкова вологість суміші 50 %.

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

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

6. Також було виготовлено гідросилікати. Гідросилікат, виготовлений в промислових умовах закладався у форму та заливався розчином цементу, а отриманий виріб використовувався тепловою ізоляцією будівель, споруд та енергетичного обладнання з урахуванням особливих умов підприємств Запоріжжя. Отримана теплоізоляція мала такі теплофізичні характеристики: коефіцієнт теплопровідності ( $0,114\dots 0,119$ )  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , питома теплоємність за  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  становила ( $1,33\dots 1,41$ )  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

## 7. СТВОРЕННЯ ВИСОКОПОРИСТИХ МЕТАЛЕВИХ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ З ПРОГНОЗОВАНИМИ ТЕПЛОФІЗИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Пористі металеві елементи теплового захисту енергетичного обладнання виготовляються наступними шляхами:

- литтям;
- фізичним або хімічним осадженням;
- газоевтектичним перетворенням;
- порошковою металургією.

Поширеним пористим металом, що використовується у промисловості є пористий алюміній. Він широко використовується й в автомобільному будівництві, й в аерокосмічному. Можливо також створення конструктивних елементів теплового захисту з основою з алюмінієвої піни. Однак, недоліком використання алюмінію є те, що алюмінієвий брухт важко використовувати повторно, так як в ньому багато різних легуючих добавок. З цієї причини на автозаводах використовується лише 35 відсотків алюмінію [232]. Якщо ще врахувати, що виробництво алюмінію один з найнебезпечніших забруднювачів природи, то перспективність використання піни з алюмінію дуже низька, а висока вартість титану та цирконію не дозволяє широко впроваджувати металеві елементи теплового захисту. Створення пористого сплаву Al-Mg газоевтектичним перетворенням у водневому середовищі при невеликій кількості Mg (масовою долею нижче 35 %) дає пластичний метал з межею міцності під час стиснення більше ніж щільні зразки через існування пір [233]. Це дає можливість використовувати їх в промисловості при тих самих умовах, як і щільні сплави, але перевагою пористого сплаву буде менший коефіцієнт теплопровідності, менша вага та економія матеріалу.

Спосіб отримання пористого алюмінію литтям з пористістю близько 20% наведено у [129]. При даному методі виготовлення пористого алюмінію пори мають форму витягнутого еліпсу, яка, як було доведено у третьому

розділі, є оптимальною формою пори для пористих металів. Але розмір пір є замалим для суттєвого підвищення опору конструкції.

В [234] розглядається спосіб отримання пористого металу на основі Ti-Al спіканням за температури 1100 °С. При даному способі отримання інтерметалідів пористість металу досягається 80%. Одна з властивостей отриманого металу – низький коефіцієнт теплопровідності, але нажаль авторами не приводяться кількісні показники властивостей отриманого високопористого металу, що не дає можливості практично використовувати дану науково-технічну розробку. Тому, на основі раніше виведених закономірностей розробимо метод отримання пористих електропровідних та композиційних елементів конструкції теплового захисту енергетичного обладнання з низьким коефіцієнтом теплопровідності та високою міцністю.

## **7.1 Створення ефективних металевих конструкцій теплового захисту**

Пористі металеві конструкції та вироби мають унікальну комбінацію властивостей, які неодноразово розглядалися вченими різних країн [235, 236]. Така комбінація властивостей сприяє зростанню розповсюдженості даних матеріалів в експоненціальній залежності. Вони вже знайшли своє застосування в різноманітних галузях світової промисловості, серед яких: аерокосмічна галузь (титанові і алюмінієві сендвіч панелі); енергетична галузь (реактори по вирощуванню кристалів); суднобудування (корпуса пасажирських суден); автомобільна галузь (конструктивні елементи); залізнична галузь (демпфери); медицина (імплантати в організм людини). Для створення захисного покриття у пористих металевих виробах використовують електролітичне плазмове окиснення [237].

Пористі металеві вироби можливо широко застосовувати в енергетичній сфері [238]. У якості теплоізоляційних матеріалів вони мають значну перевагу – високу міцність. Регулюванням структури високопористих металевих виробів

можна досягнути значного термічного опору при заданій міцності. У [239] пористий метал рекомендується в якості тепломасообмінного середовища в непрямих системах випарного охолодження.

Пористі металеві конструкції так само можуть бути використані в активній зоні ядерного реактора для зниження теплових втрат. Як правило, їх виготовляють з двоокису цирконію. Така теплова ізоляція служить для зменшення втрат енергії та одночасно для відбивання нейтронів, оскільки ядра цирконію мають великий поперечний переріз розсіювання і малий перетин захвату, а так само високу атомну щільність. Виходячи з технологічних умов, така теплова ізоляція не може бути замінена на неметалеву.

Незважаючи на впровадження пористих металевих матеріалів та виробів у все більшу кількість галузей, їх розвиток поступово згасає. Причиною цього є одnobічний характер розвитку, а саме, орієнтація досліджень тільки на хімічний склад таких матеріалів, мікропористість самого металу та нехтуванням пористості конструкції з металу. Також розташування, розмір і форма пір розглядаються вкрай рідко й тільки статистично-ймовірними моделями. Це пов'язано з початковим вектором розвитку, який в своїй основі є вірним, однак з часом себе вичерпує. Так само не варто забувати про складнощі, які пов'язані з отриманням пористого ізоляційного матеріалу або конструкції (із закритою пористістю) з ідентичними формами всіх пір, розташованими в потрібному порядку.

Для зниження енергоємності виробництва та покращення умов експлуатації енергетичного обладнання у період економічного спаду країни необхідно розробити нову пористу металеву конструкцію, просту у виготовленні, що дозволяє досягати ідентичність всіх пір, розташовувати пори в раціональному порядку і використовувати комбінацію різних сплавів без використання коштовного обладнання.

Для вибору матеріалу конструкції теплового захисту використано аналіз пористих металевих матеріалів залежно від технології їх отримання. Авторами [240] продемонстровано експериментальні зразки, що отримані



газоевтектичним методом, спінюванням і литтям. Найбільший інтерес представляють зразки, що отримано литтям, тому що даний метод дозволяє досягати однакої форми всіх пір і упорядкованого їх розташування. Проте, створення форми для лиття пов'язано із низкою складнощів, особливо, якщо необхідно досягати круглої або еліпсоїдальної форми поперечного перерізу пори. Так само даний метод є обмеженим каналною пористістю.

В роботі [241] виконано аналіз газоармованих матеріалів. Розглянуто способи їх отримання, параметри пористості й галузі їх застосування. Окрім газоармованих виробів, як окремих конструктивних елементів теплового захисту, наведено спосіб отримання пористого покриття на монолітних виробах методом сканування плазмового пучка або лазера. Продемонстровані методи дозволяють отримувати як відкриту, так і закриту пористість. Проте, у роботі не представлено аналіз теплофізичних властивостей таких матеріалів. Пінометали розглянуто в роботі [242]. Головний акцент зроблено на їх використанні як заповнювача різних порожнистих, як металевих, так і неметалевих деталей. Безумовною перевагою пінометалів є їх висока пористість, мала вага та низька теплопровідність. Проте, зі збільшенням пористості міцність матеріалу зменшуються, тобто такий матеріал за наявності надмірних навантажень потребує міцного каркасу. Недоліком таких матеріалів є також відсутність можливості регулювання форми пір і способу їх розташування у широкому діапазоні. Пористі метали та пінометали, що виготовлено з порошків, розглянуто у роботі [243]. Наведено мікроструктуру виробів, отриманих спіканням без прикладеного з боку надлишкового тиску, селективним лазерним спіканням і різними способами спінювання. Показано вплив вмісту кисню на спінювання алюмінієвого порошку за температури 500 і 550 °С, проте відсутнім є аналіз властивостей таких матеріалів. Залежність електронної складової коефіцієнта теплопровідності від діаметра отворів за коридорним і шаховим розташуванням має логарифмічний характер [244]. Проте, розглянутий метод не дозволяє отримувати коефіцієнт ефективної теплопровідності, також не було розглянуто закриту пористість

електропровідного матеріалу. В роботі [245] акцент ставиться на метали з лотос-пористістю та надано різні способи виробництва даного металу. Розглянуто: механізм зародження та зростання пір у металах з лотос-пористістю; механічні, хімічні та фізичні властивості зазначених металів; спосіб контролю розміру їх пір і загальної пористості. Проте форма пір у запропонованому матеріалі є обмеженою витягнутим циліндром з різною геометрією основи.

На основі аналізу сучасного виробництва пористих виробів, пропонується створити елемент теплового захисту з набору листів металів. Перший варіант теплового захисту це скріплення окремих металевих листів розпірками, як показано на рис. 7.1. Регулюванням розміру між розпірками можна добитися мінімізації конвективного руху газу між пластинами. Як було встановлено у третьому розділі, форма суттєво впливає на теплопровідність. Необхідно, щоб найбільший габаритний розмір пори у 4 мм був перпендикулярний тепловому потоку.

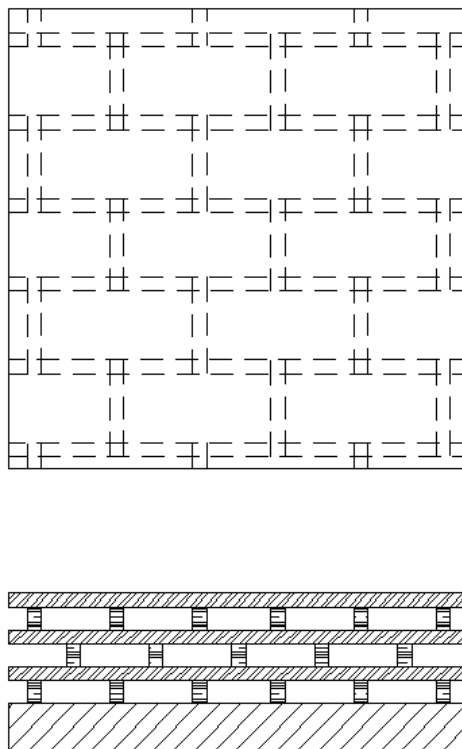


Рисунок 7.1 – Схема збору металевих листів на розпірках

Виходячи з результатів попередніх дослідів, запропоновано наступні геометричні розміри для зборки листів на розпірки в якості елемента теплового захисту для високих температур (більше 1300 °K): відстань між листами 2 мм; розмір комірки, яка утворена розпірками, дорівнює 4x8 мм. Можливо, як коридорне розташування комірок, так і шахове (рис.7.1), без суттєвого зниження теплового опору конструкції. Перший та другий лист повинен бути виготовлений з діоксиду кремнію, та покритий електроізолюючою плівкою. Третій лист може бути виконано з пористого жаростійкого металу. В якості основи та зовнішньої ізоляції можуть бути використані кремнеземисті пористі матеріали.

Для температур 900-1300 °K в якості металевих елементів теплового захисту можна використовувати жароміцні сталі, вкриті діелектричною плівкою для першого та другого листа, для третього листа можна використовувати пористий алюміній. Так як, конвертині потоки у порах конструкції при даних температурах являються замалими при розмірах комірки 4 мм, то розмір між листами можна збільшити до 4 мм, що зменшить ефективний коефіцієнт теплопровідності такої конструкції та її питому вагу.

Другий варіант створення металевої конструкції теплового захисту з пористих металів - це з'єднання між собою перфорованих пластин [246]. Перфорацію пластин можна зробити різними отворами таким чином, щоб при з'єднанні пластин утворювалися пори необхідної форми. З'єднання між собою пластин можна здійснити спіканням під тиском, склеюванням або болтами. При холодному способі з'єднання в якості діелектрика у порах може застосовуватися діелектричний папір. Оскільки контактний тепловий опір між пластинами буде значно зменшувати тепловий потік конструкції, то пластини необхідно збирати таким чином, щоб лінії їх з'єднання були перпендикулярні тепловому потоку. Оскільки більший габаритний розмір пори повинен бути теж перпендикулярним тепловому потоку, то пластини повинні збиратися за схемою, яка запропонована на рис. 7.2 та рис. 7.3

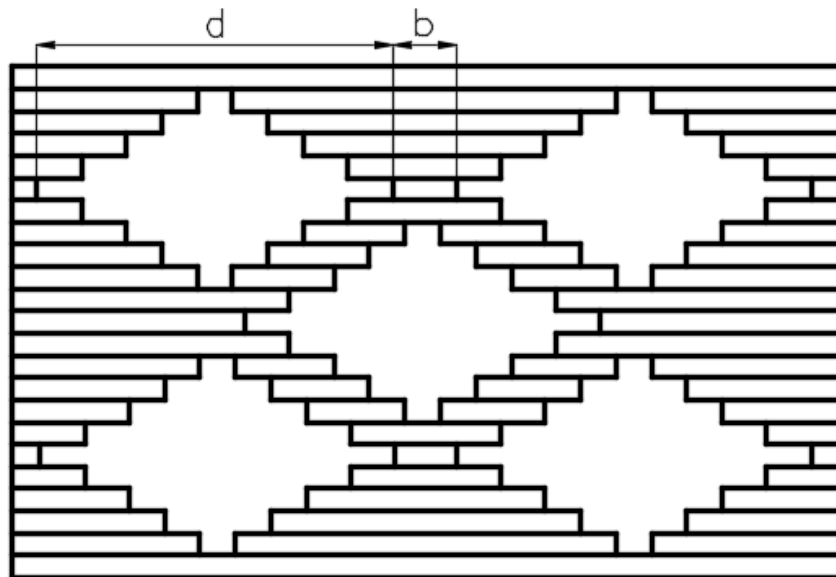


Рисунок 7.2 – Розріз збоку конструкції теплового захисту виконаний з металевих перфорованих пластин

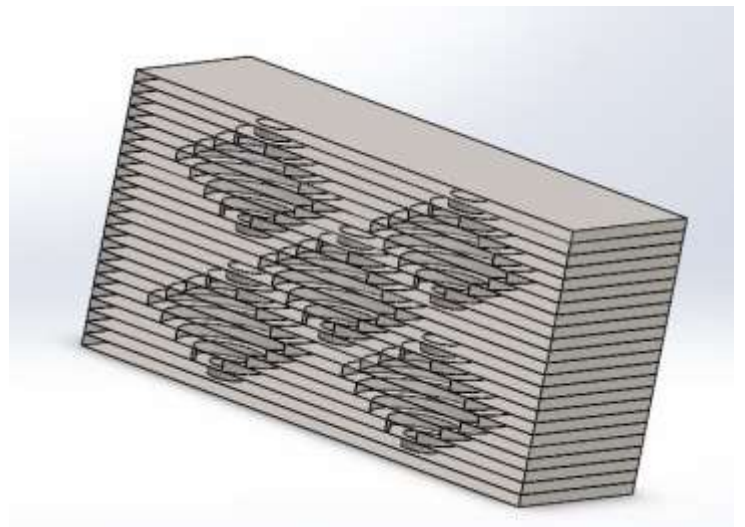
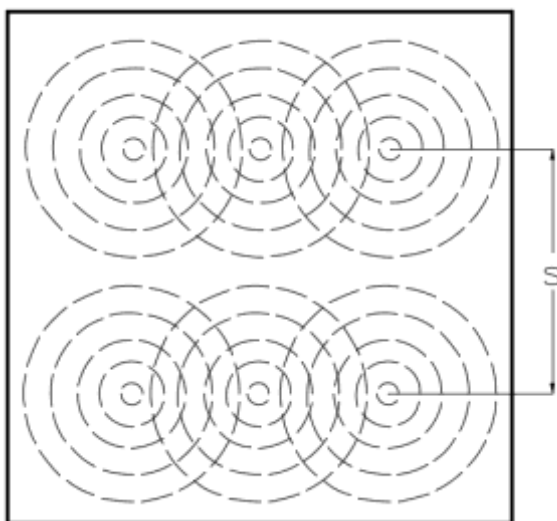


Рисунок 7.3 – Вид зверху та 3D модель конструкції теплового захисту виконаний з металевих перфорованих пластин

Групи отворів у конструкції теплового захисту виконаний з металевих перфорованих пластин розташовують рядами на відстані  $s$  від центру пір, чим досягають великої загальної пористості. Зменшення діаметрів отворів необхідно робити за наступною послідовністю:  $0,75d$ ;  $0,5d$ ;  $0,3d$ ;  $0,1d$ . Для

знаходження залежності міцності та ефективного коефіцієнту теплопровідності від визначальних розмірів  $d$  і  $b$  було використано метод планування експерименту. Вхідні параметри моделі:  $d$  – максимальний діаметр отворів у пластин ( $X_1$ );  $b$  – відстань між краями пір у одному ряді ( $X_2$ );  $s$  – відстань між центрами рядів перфорації ( $X_3$ ). Вихідними параметрами моделі були  $Y_1$  – коефіцієнт теплопровідності зібраних пластин, Вт/(м·К) та  $Y_2$  – межа міцності на стискання, МПа. Рівні варіювання вхідних параметрів моделі наведено у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1

Рівні варіювання вхідних параметрів моделі

X	-1,215	-1	0	+1	+1,215	$\Delta$
$X_1$ , мм	8,925	10	15	20	19,86	4
$X_2$ , мм	2,57	3	5	7	7,43	2
$X_3$ , мм	23,925	25	30	35	36,075	5

В експерименті використовували вуглецеву конструкційну сталь звичайної якості СТЗсп з межею міцності на стискання 137 МПа та коефіцієнтом теплопровідності 55 Вт/(м·К). Товщина одного листа складала 0,8 мм, його розміри - 0,3 x 0,3 м. Через кожні шість пластин у пори вкладали діелектричний папір у формі пелюстка. Перфоровані пластини скріпляли точковим нанесенням епоксидного клею «Холодна зварка» та зварюванням торців зразка електродами. Для отримання квадратичних коефіцієнтів рівняння регресії, було обрано ортогональний план другого порядку, з ядром  $2^3$ , з двома «зоряними» точками (табл.7.2).

Таблиця 7.2

Матриця планування експерименту та отримані результати для пластин

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>
1	+1	+1	+1	37,8	95,67	9	-1,215	0	0	34	110,73
2	-1	+1	+1	27,9	109,65	10	+1,215	0	0	31	90,38
3	+1	-1	+1	44,4	90,99	11	0	-1,215	0	21,1	99,39
4	-1	-1	+1	30	110,51	12	0	+1,215	0	30,3	101,71
5	+1	+1	-1	42,2	95,67	13	0	0	-1,215	24	101,25
6	-1	+1	-1	43,1	109,65	14	0	0	+1,215	28,3	102,25
7	+1	-1	-1	39,2	90,99	15	0	0	0	22,7	100,55
8	-1	-1	-1	41,6	110,51	16	0	0	0	22,8	100,1

Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії здійснено за наступною формулою [247]

$$a_i = \begin{cases} c_1 \cdot \sum_{j=1}^N x_i^j \cdot y^j, & i = 1, \dots, n, \\ c_2 \cdot \sum_{j=1}^N [(x_{i-n}^j)^2 - \beta] \cdot y^j, & i = n + 1, \dots, 2n, \\ c_3 \cdot \sum_{j=1}^N x_\mu^j \cdot x_\lambda^j \cdot y^j, & \mu, \lambda = 1, 2, \dots, n, \quad \mu \neq \lambda \quad i = 2n + 1, \dots, k. \end{cases}$$

Вільний коефіцієнт регресії розраховується

$$a_0 = b_0 - \beta \sum_{j=1}^n a_{n+i},$$

де  $b_0$  розраховується як середньоарифметичне значення отриманих експериментальних даних

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y^j.$$

По [248], для плану з ядром  $2^3$ , обираємо наступні коефіцієнти  $\alpha = 1,215$ ;  $\beta = 0,73$ ;  $c_0 = 0,0667$ ;  $c_1 = 0,0913$ ;  $c_2 = 0,2298$ ;  $c_3 = 0,1250$ .

Після розрахунків усіх коефіцієнтів рівняння регресії та знаходження не значимих коефіцієнтів по t- критерію Стьюдента отримані наступні рівняння:

$$Y_1 = 20,979 - 1,9X_3 + 8,592X_1^2 + 3,985X_2^2 + 4,29X_3^2 + 3,45X_1X_2;$$

$$Y_2 = 100,284 - 8,375X_1 + 0,955X_2 + 1,01X_3^2 + 1,385X_1X_2.$$

Задаючись, що теплопровідність перфорованих пластин повинна бути мінімальною, але при цьому межа міцності на стиск повинна бути не нижче за 100 МПа отримаємо цільову функцію для оптимізації з обмеженням

$$\begin{cases} Y_1 = 20,979 - 1,9X_3 + 8,592X_1^2 + 3,985X_2^2 + 4,29X_3^2 + 3,45X_1X_2 \rightarrow \min; \\ Y_2 = 100,284 - 8,375X_1 + 0,955X_2 + 1,01X_3^2 + 1,385X_1X_2 \geq 100. \end{cases}$$

Для визначення оптимального режиму термічної обробки складалася функція Лагранжа. В якості цільової функції, що підлягає оптимізації, в цьому завданні виступає функція

$$F(X) = 20,979 - 1,9x_3 + 8,592x_1^2 + 3,985x_2^2 + 4,29x_3^2 + 3,45x_1x_2.$$

Перепишемо обмеження по межі міцності у неявному вигляді

$$\varphi_1(X) = 100 - (100,284 - 8,375x_1 + 0,955x_2 + 1,01x_3^2 + 1,385x_1x_2) = 0.$$

Складемо допоміжну функцію Лагранжа

$$L(X, \lambda, \mu) = 20,979 - 1,9x_3 + 8,592x_1^2 + 3,985x_2^2 + 4,29x_3^2 + 3,45x_1x_2 + \mu(100 - (100,284 - 8,375x_1 + 0,955x_2 + 1,01x_3^2 + 1,385x_1x_2)).$$

Необхідною умовою екстремуму функції Лагранжа є рівність нулю її частинних похідних за змінними  $X_i$  та невизначеними множниками. Складемо систему

$$\begin{cases} \partial L / \partial x_1 = 17,184x_1 + 3,45x_2 + \mu(-1,385x_2 + 8,375) = 0; \\ \partial L / \partial x_2 = 3,45x_1 + 7,97x_2 + \mu(-1,385x_1 - 0,955) = 0; \\ \partial L / \partial x_3 = -2,02x_3\mu + 8,58x_3 - 1,9 = 0; \\ \mu(100 - (100,284 - 8,375x_1 + 0,955x_2 + 1,01x_3^2 + 1,385x_1x_2)) = 0, \mu \geq 0. \end{cases}$$

Вирішимо наступну систему рівнянь

$$\begin{cases} 17,184x_1 + 3,45x_2 + \mu(-1,385x_2 + 8,375) = 0; \\ 3,45x_1 + 7,97x_2 + \mu(-1,385x_1 - 0,955) = 0; \\ -2,02x_3\mu + 8,58x_3 - 1,9 = 0. \end{cases}$$

Розглянемо два варіанти:



a)  $\mu \neq 0$ ,

$$X_1 = (0, 03675, -0,02414, 0,2181), \mu = -0,0652;$$

b)  $\mu = 0$ ,

$$X_1 = (0, 0, 0, 2214).$$

Далі необхідно перевірити умови Куна-Таккера [248]. Теорема Куна-Таккера: щоб знайдений план  $X^0$  був рішенням задачі необхідно і достатньо, щоб існував вектор  $\mu^0$  такий, що пара  $(X^0, \mu^0)$  для всіх  $X \geq 0$  і  $\mu \geq 0$

$$L(X, \mu^0) \leq L(X^0, \mu^0) \leq L(X^0, \mu).$$

Щоб функція двох векторних змінних мала сідлову точку, необхідно і достатньо виконання наступних умов:

$$\frac{dL(X^0, \mu^0)}{dx_j} \geq 0;$$

$$x_j^0 \frac{dL(X^0, \mu^0)}{dx_j} = 0, x_j^0 \geq 0;$$

$$\frac{dL(X^0, \mu^0)}{d\mu_j} \leq 0;$$

$$x_j^0 \frac{dL(X^0, \mu^0)}{d\mu_j} = 0, \mu_j^0 \geq 0.$$

$X_1 = (0, 03675, -0,02414, 0,2181), \mu = -0,0652$ . Цю точку виключаємо, оскільки  $\mu$  від'ємне.

Точка  $X_1 = (0, 0, 0, 2214)$  задовольняє всім умовам. Значення функції у цій точці  $f(x) = 20,7686$ .

Визначимо вид екстремуму. Для функції  $L(x, \lambda, \mu)$  знайдемо матрицю Гессе  $H_L$ . Якщо матриця  $H_L$  позитивно визначена - знайдена точка  $x$  є точкою мінімуму, якщо матриця  $H_L$  негативно визначена - знайдена точка  $x$  є точкою максимуму.

$$L(x, \lambda, \mu) = 20,979 - 1,9x_3 + 8,592x_1^2 + 3,985x_2^2 + 4,29x_3^2 + 3,45x_1x_2,$$

$$F(X) = 20,979 - 1,9x_3 + 8,592x_1^2 + 3,985x_2^2 + 4,29x_3^2 + 3,45x_1x_2.$$

Знайдемо приватні похідні

$$\frac{\partial F(X)}{\partial x_1} = 17,184x_1 + 3,45x_2;$$

$$\frac{\partial F(X)}{\partial x_2} = 3,45x_1 + 7,97x_2;$$

$$\frac{\partial F(X)}{\partial x_3} = 8,58x_3 - 1,9.$$

Вирішуючи систему, отримаємо стаціонарну точку

$$X_0 = (0, 0, 0,2214).$$

Знайдемо другі приватні похідні

$$\frac{\partial^2 F(X)}{\partial^2 x_1} = 17,184;$$

$$\frac{\partial^2 F(X)}{\partial x_1 \partial x_2} = 3,45;$$

$$\frac{\partial^2 F(X)}{\partial x_1 \partial x_3}(X^0) = 0;$$

$$\frac{\partial^2 F(X)}{\partial^2 x_2} = 7,97;$$

$$\frac{\partial^2 F(X)}{\partial x_2 \partial x_3}(X^0) = 0;$$

$$\frac{\partial^2 F(X)}{\partial^2 x_3} = 8,58.$$

Матриця Гессе

$$G(X) = \begin{pmatrix} 17,184 & 3,45 & 0 \\ 3,45 & 7,97 & 0 \\ 0 & 0 & 8,58 \end{pmatrix}$$

Обчислюємо значення для точки  $X_0(0, 0, 0,221)$

$$\frac{\partial^2 F(X)}{\partial^2 x_1}(X^0) = 17,184;$$

$$\frac{\partial^2 F(X)}{\partial x_1 \partial x_2}(X^0) = 3,45;$$

$$\frac{\partial^2 F(X)}{\partial x_1 \partial x_3}(X^0) = 0;$$

$$\frac{\partial^2 F(X)}{\partial^2 x_2}(X^0) = 7,97;$$

$$\frac{\partial^2 F(X)}{\partial x_2 \partial x_3} (X^0) = 0;$$

$$\frac{\partial^2 F(X)}{\partial^2 x_3} (X^0) = 8,58.$$

$$G(0;0;0,221) = \begin{pmatrix} 17,184 & 3,45 & 0 \\ 3,45 & 7,97 & 0 \\ 0 & 0 & 8,58 \end{pmatrix}$$

Визначаємо діагональні мінори:

$$D_1 = a_{11} = 17,184;$$

$$D_2 = a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12} = 125,05398;$$

$$D_3 = 1072,9631484.$$

Оскільки діагональні мінори позитивні, отже,  $G_f$  - позитивно визначена матриця. Звідси слідує, що функція опукла. Більш того, функція строго опукла і має єдину точку мінімуму  $X(0, 0, 0,2214)$ .

Отже оптимальні розміри пористої структури конструкції теплового захисту виконаній з металевих перфорованих пластин:  $d=15$  мм;  $b = 5$  мм;  $s = 31,1$  мм. Коефіцієнт теплопровідності конструкції при даних оптимальних параметрах складає  $20,7686$  Вт/(м·К), а межа міцності на стискання  $100,235$  МПа.

Розроблена металева конструкція теплового захисту може бути використана в якості елемента конструкції теплового захисту енергетичного обладнання, конструкції теплового захисту зовнішньої оболонки будівель дослідницьких установ північного полюсу, для системи охолодження пальника

при високофорсованих режимах детонаційного горіння [249], в якості теплового захисту електронних компонентів [250, 251].

## **7.2 Створення композиційних теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкції теплового захисту з раціональною пористою структурою**

Створення пористих композиційних теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкції теплового захисту є актуальною задачею енергозбереження та вирішує важливі економічні, технологічні та наукові проблеми металургійної та енергетичної промисловості. Композиційні матеріали на основі вогнетривкої вати та металевих листів вже давно зайняли свою нішу на світовому ринку теплоізоляційних матеріалів та дедалі більше світових компаній займається виготовленням нових композиційних пористих матеріалів для теплового захисту печей з особливими умовами експлуатації, для сандвіч панелей на основі вати та в якості теплоізоляційного матеріалу для будівництва. Всесвітньо відома компанія Rockwool займається виготовленням композиційних сандвіч панелей з різноманітними конфігураціями. Такі панелі складаються з алюмінієвих або сталевих листів, які за допомогою спеціального клею приєднуються до вогнетривкої вати. Дана продукція позиціонується компанією як матеріал для використання в комерційному та промисловому будівництві, а саме для зовнішніх стін, дахів та стельових панелей [252]. Такий матеріал володіє низьким коефіцієнтом теплопровідності, достатньою міцністю, звукопоглинаючою властивістю та вогнетривкістю. Прикладом широкого діапазону використання даних панелей у світі є міський стадіон у місті Кардіфф. Тому розглянемо можливість створення пористих елементів конструкції теплового захисту з найвідоміших композиційних матеріалів.

Експериментально доведено, що міцність зразку композитних панелей, в основі яких лежить бетон з гумовою крихтою, більше за чистий бетон [253]. Авторами детально розглянуто технологію виробництва такого матеріалу, але

відсутні теплофізичні характеристики отриманого композиту для можливого подальшого аналізу.

Детально розглянуто полімерні матричні композити у [254]. Надано аналіз технологій їх виробництва, різновидів, способів використання та шляхи їх розвитку. Представлено теплофізичні характеристики таких матеріалів. Проте, не надано інформації щодо впливу параметрів пористості на коефіцієнт теплопровідності. В [255] розглянуто такі композитні теплоізоляційні матеріали як алюмосикатне волокно з вкрапленнями волокон  $K_2Ti_6O_{13}$  та аерогель  $SiO_2$  з вкрапленнями титанових волокон. Представлені результати демонструють низький коефіцієнт теплопровідності при високих температурах. Проте технологія виробництва та сировина для таких матеріалів є вкрай затратними. Також, не надано інформації щодо міцності таких матеріалів. В [256] досліджено багат шарову композитну теплову ізоляцію для безвакуумної криогенної техніки. Розглянута ізоляція позиціонується як матеріал для використання на складних трубопроводах і резервуарах, де використання звичайних матеріалів неможливо. Складається з декількох функціональних шарів, система «ковдра» на основі аерогелю. Кожен шар складається з безпосередньо самої ізоляції на шарі радіаційного бар'єру. Однак така ізоляція підходить для використання в діапазоні температур 4-400 К.

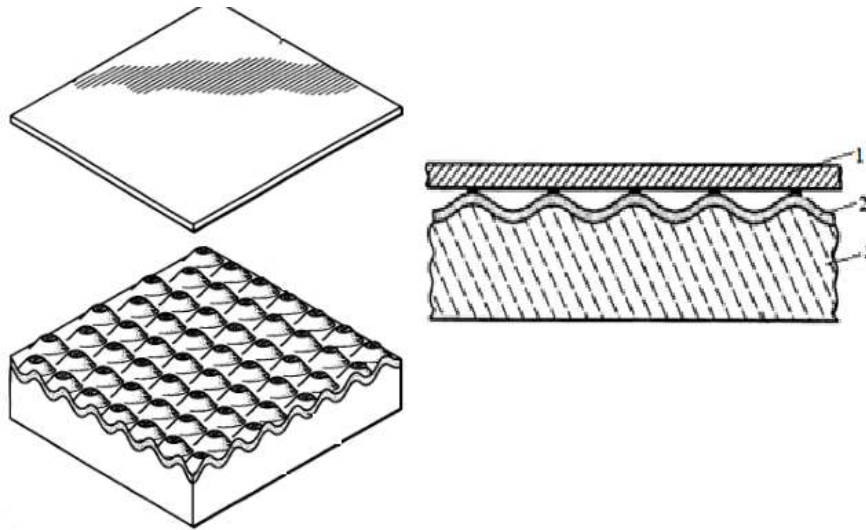
Дослідження екологічних сандвіч панелей з пробки, волокон льону та натуральної епоксидної смоли проведено в [257]. В якості експериментальних зразків взято чотири системи з різноманітними комбінаціями шарів. Розглянуто теплофізичні властивості таких матеріалів. Проте не проаналізовано можливість використання шарів з комірками, що дозволило б ще більше зменшити вагу та поліпшити коефіцієнт теплопровідності.

Класифікація пористих теплоізоляційних матеріалів наведена в [258]. Розглянуто різноманітні способи дослідження цих матеріалів та вплив пористості на теплопровідність. Проте не було приділено належної уваги впливу параметрів пористості, а саме форми, розміру та способу розташування пор.

В [259] проаналізовано ефективність декількох типів композитної ізоляції для зовнішніх стін. Запропоновано використовувати цеглу у поєднанні з матеріалами, які мають високу відбивну здатність. Наведено позитивні та негативні риси для обох випадків. В роботі були використані вже існуючі матеріали зі стандартними конфігураціями та не була проаналізована можливість покращення запропонованої ізоляції шляхом варіювання параметрами пористості.

Поєднання гнучкої керамічної тканини і тонкого металевого листа за схемою зображеною на рис. 7.8, пропонується у патенті [260]. Металевий лист 1 товщиною 0,127 мм припаюється до металевій поверхні кераміки 2. Поєднання високої жароміцності сталі і здатності ізоляційних властивостей кераміки забезпечують міцну і водовідштовхувальну систему теплового захисту, яку можна використовувати в суворих погодних і експлуатаційних умовах. Припій виконується з мідного або срібного сплаву, який має титан у якості агента, що змочує. С. Н. Лі в патенті [261] надав спосіб приєднання жорсткої кераміки і металів один до одного шляхом утворення металізованих покриттів на кераміці при високих температурах який можна використовувати для створення елементів конструкції теплового захисту з раціональною пористою структурою.

Як було доведено у попередніх розділах дисертаційної роботи, геометричні розміри поверхні керамічного матеріалу будуть значно впливати на ефективний коефіцієнт теплопровідності. Питанням геометричних розмірів композиційного теплоізоляційного матеріалу з гнучкої керамічної тканини і тонкого металевого листа займалися дуже мало авторів, а стандартні розміри комірки складають від 0,125 до 0,25 мм. Основуючись на аналізі попередніх розробок знайдемо оптимальні розміри комірки при яких буде досягатися мінімальний коефіцієнт теплопровідності низькотемпературного елемента теплового захисту.



1 – металевий лист; 2 – металеве покриття ; 3 – керамічна теплоізоляція;

Рисунок 7.8 – Композиційний теплоізоляційний матеріал з гнучкої керамічної тканини і тонкого металевого листа

Для знаходження оптимальних параметрів розмірів комірки запропонованого низькотемпературного елемента теплового захисту було використано метод планування експерименту. Для розробки тестових зразків було обрано алюмінієву фольгу товщиною 0,2 мм, яка клеїлася на вогнетривку вату, вкритою тонким шаром алюмінію. Загальна ширина отриманих зразків композиційного матеріалу складала 5 мм. Комірки робилися пресуванням (стисканням) вогнетривкої вати до вкривання її шаром алюмінію. Форма комірки мала вигляд параболоїду.

Розміри комірки робилися згідно умов проведення експерименту по таблиці 7.3. Шириною комірки вважається розмір комірки перпендикулярний площини гравітаційних сил, а довжиною комірки вважається розмір комірки, який знаходиться в одній площині з гравітаційними силами. Глибина комірки робилася 4 мм на основі висновків розділу 3 цієї роботи.



Таблиця 7.3

Умови проведення експерименту по вдосконаленню матеріалу з гнучкої керамічної тканини і тонкого металевого листа

Фактор	Код	Рівні факторів					
		-1,414	-1	0	1	1,414	Δ
Довжина комірки, мм	X <sub>1</sub>	1,172	2	4	6	6,828	2
Ширина комірки, мм	X <sub>2</sub>	10,172	10	12	14	14,828	2

Методом планування експерименту знайдено регресійне рівняння залежності коефіцієнта теплопровідності елементу теплового захисту від геометричних розмірів комірки. Теплопровідність конструкції вимірювалася за допомогою вимірювача теплопровідності IT-λ-400.

Після обробки отриманих експериментальних даних та перевірки коефіцієнтів на значимість по t-критерію Стьюдента було отримано наступне рівняння регресії

$$Y = 0,269 - 0,011X_1^2 - 0,018X_2 + 0,015X_2^2 - 0,00725X_1X_2.$$

Аналіз даного рівняння регресії показує, що ширина комірки сильніше впливає на зміну коефіцієнта теплопровідності композиційного матеріалу з гнучкої керамічної тканини і тонкого металевого листа. Обрані чинники не лінійно та неоднозначно впливають на вихідний параметр.

Таблиця 7.4

Результати проведення експерименту по визначенню залежності коефіцієнта теплопровідності композиційного матеріалу від розмірів комірок

№ п/п	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	1	1	0,252
2	-1	1	0,276
3	1	-1	0,296
4	-1	-1	0,291
5	-1,414	0	0,249
6	1,414	0	0,235
7	0	-1,414	0,324
8	0	1,414	0,264
9	0	0	0,270
10	0	0	0,268

Для отримання оптимальних розмірів складемо цільову функцію

$$Y(X_1, X_2) = 0,269 - 0,011X_1^2 - 0,018X_2 + 0,015X_2^2 - 0,00725X_1X_2 \rightarrow \min.$$

Знайдемо для даної цільової функції приватні похідні

$$\begin{cases} \frac{\partial Y(X_1, X_2)}{\partial X_1} = -0,022X_1 - 0,00725X_2; \\ \frac{\partial Y(X_1, X_2)}{\partial X_2} = -0,018 + 0,03X_2 - 0,00725X_1. \end{cases}$$

Прирівнявши дану систему до нуля отримаємо наступну систему рівнянь

$$\begin{cases} -0,022X_1 - 0,00725X_2 = 0; \\ 0,03X_2 - 0,00725X_1 - 0,018 = 0. \end{cases}$$

Рішення даної системи дає наступний результат

$$\begin{cases} X_1 = -0,183; \\ X_2 = 0,556. \end{cases}$$

Таким чином, екстремумом цільової функції є крапка з координатами  $x^* = [-0,183; 0,556]^T$ . Значення цільової функції у цих координатах 0,264.

Для визначення характеру стаціонарної точки складемо визначник матриці Гессе. Під визначником Гессе розуміється визначник, складений із других похідних вихідної цільової функції.

$$\nabla^2 f(X) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial X_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial X_1 X_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial X_1 X_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial X_2 X_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial X_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial X_2 X_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial X_n X_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial X_n X_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial X_n^2} \end{bmatrix}$$

Другі приватні похідні цільової функції

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial X_1^2} = -0,022; \frac{\partial^2 Y}{\partial X_1 X_2} = -0,00725; \frac{\partial^2 Y}{\partial X_2 X_1} = -0,00725; \frac{\partial^2 Y}{\partial X_2^2} = 0,03.$$

Матриця Гессе

$$\nabla^2 Y(X) = \begin{bmatrix} -0,022 & -0,00725 \\ -0,00725 & 0,03 \end{bmatrix} = -0,00791.$$

Так як гессіан має значення менше за нуль, але не виконуються умови Сильвестра (усі діагональні елементи матриці Гесса - позитивні величини, всі провідні головні визначники позитивні величини) то знайдена точка є стаціонарною й не являється точкою ні мінімуму, ні максимуму.

Для отримання мінімальних значень цільової функції використаємо метод регуляторного симплексу. Оскільки цільова функція лежить у двомірному просторі, то у якості регуляторного симплексу буде трикутник.

Оберемо за початкову точку  $x_0 = [-1; +1]$  та масштабний множник  $\alpha = 1$ ;

Ребра регуляторного симплексу складуть:

$$\delta_1 = \left[ \frac{\sqrt{N+1} + N - 1}{N \cdot \sqrt{2}} \right] \cdot \alpha = \left[ \frac{\sqrt{3} + 1}{2\sqrt{2}} \right] \cdot 1 = 0,9659;$$

$$\delta_2 = \left[ \frac{\sqrt{N+1} - 1}{N \cdot \sqrt{2}} \right] \cdot \alpha = \left[ \frac{\sqrt{3} - 1}{2\sqrt{2}} \right] \cdot 1 = 0,2588.$$

Координати інших двох вершин:

$$x^{(1)} = [-1 + 0,9659; 1 + 0,2588] = [-0,0341; 1,2588];$$

$$x^{(2)} = [-1 + 0,2588; 1 + 0,9659] = [-0,7412; 1,9659].$$

Значення функції у вершинах симплексу

$$\begin{aligned} f(x^{(0)}) &= 0,269 - 0,011 \cdot (-1)^2 - 0,018 \cdot 1 + 0,015 \cdot 1^2 - 0,00725 \cdot (-1) \cdot 1 = \\ &= 0,2623 \end{aligned}$$

$$f(x^{(1)}) = 0,269 - 0,011 \cdot (-0,0341)^2 - 0,018 \cdot 1,2588 + 0,015 \cdot 1,2588^2 - \\ - 0,00725 \cdot (-0,0341) \cdot 1,2588 = 0,2715$$

$$f(x^{(2)}) = 0,269 - 0,011 \cdot (-0,7412)^2 - 0,018 \cdot 1,9659 + 0,015 \cdot 1,9659^2 - \\ - 0,00725 \cdot (-0,7412) \cdot 1,9659 = 0,2961.$$

Значення  $f(x^{(2)})$  є максимальним, отже для знаходження нової вершини необхідно відобразити другу вершину через центр тяжіння симплексу

$$x^{(3)} = x^{(0)} + x^{(1)} - x^{(2)} = [-1 - 0,0341 + 0,7412; 1 + 1,2588 - 1,9659] = \\ = [-0,2929; 0,2929].$$

Значення вершин нового симплексу (друга ітерація):

$$x^{(0)} = [-1; +1]; \\ x^{(1)} = [-0,0341; 1,2588]; \\ x^{(3)} = [-0,2929; 0,2929].$$

Значення функції у вершинах симплексу:

$$f(x^{(0)}) = 0,2623; \\ f(x^{(1)}) = 0,2715; \\ f(x^{(3)}) = 0,2645.$$

Значення першої вершини є максимальним, отже необхідно відобразити вершину  $x^{(1)}$  через центр тяжіння симплексу

$$x^{(4)} = x^{(3)} + x^{(0)} - x^{(1)} = [-0,3895; 0,267].$$

Значення вершин нового симплексу (третя ітерація):

$$\begin{aligned}x^{(0)} &= [-1; +1]; \\x^{(3)} &= [-0,2929; 0,2929]; \\x^{(4)} &= [-0,3895; 0,267].\end{aligned}$$

Значення функції у вершинах симплексу:

$$\begin{aligned}f(x^{(0)}) &= 0,2623; \\f(x^{(3)}) &= 0,2645 - \text{максимальне}; \\f(x^{(4)}) &= 0,2643.\end{aligned}$$

Необхідно відобразити вершину  $x^{(3)}$  через центр тяжіння симплексу

$$x^{(5)} = x^{(4)} + x^{(0)} - x^{(3)} = [-1,0966; 0,9741].$$

Значення вершин нового симплексу (четверта ітерація):

$$\begin{aligned}x^{(0)} &= [-1; +1]; \\x^{(4)} &= [-0,3895; 0,267]; \\x^{(5)} &= [-1,0966; 0,9741].\end{aligned}$$

Значення функції у вершинах симплексу:

$$\begin{aligned}f(x^{(0)}) &= 0,2623; \\f(x^{(4)}) &= 0,2643 - \text{максимальне}; \\f(x^{(5)}) &= 0,2602.\end{aligned}$$

Необхідно відобразити вершину  $x^{(4)}$  через центр тяжіння симплексу

$$x^{(6)} = x^{(5)} + x^{(0)} - x^{(4)} = [-1,7071; 1,7071].$$

Значення вершин нового симплексу (п'ята ітерація):

$$\begin{aligned} x^{(0)} &= [-1; +1]; \\ x^{(5)} &= [-1,0966; 0,9741]; \\ x^{(6)} &= [-1,7071; 1,7071]. \end{aligned}$$

Значення функції у вершинах симплексу:

$$\begin{aligned} f(x^{(0)}) &= 0,2623; \\ f(x^{(5)}) &= 0,2602; \\ f(x^{(6)}) &= 0,2711 - \text{максимальне.} \end{aligned}$$

Необхідно відобразити вершину  $x^{(6)}$  через центр тяжіння симплексу

$$x^{(7)} = x^{(5)} + x^{(0)} - x^{(6)} = [1,8037; 0,267].$$

Значення вершин нового симплексу (шоста ітерація):

$$\begin{aligned} x^{(0)} &= [-1; +1]; \\ x^{(5)} &= [-1,0966; 0,9741]; \\ x^{(7)} &= [1,8037; 0,267]. \end{aligned}$$

Значення функції у вершинах симплексу:

$$f(x^{(0)}) = 0,2623 - \text{максимальне};$$

$$f(x^{(5)}) = 0,2602;$$

$$f(x^{(7)}) = 0,226.$$

Необхідно відобразити вершину  $x^{(0)}$  через центр тяжіння симплексу

$$x^{(8)} = x^{(5)} + x^{(7)} - x^{(0)} = [1,7071; 0,2411].$$

Значення вершин нового симплексу (сьома ітерація):

$$x^{(5)} = [-1,0966; 0,9741];$$

$$x^{(7)} = [1,8037; 0,267];$$

$$x^{(8)} = [1,7071; 0,2411].$$

Значення функції у вершинах симплексу:

$$f(x^{(5)}) = 0,2602 - \text{максимальне};$$

$$f(x^{(7)}) = 0,226;$$

$$f(x^{(8)}) = 0,2305.$$

Необхідно відобразити вершину  $x^{(5)}$  через центр тяжіння симплексу

$$x^{(9)} = x^{(7)} + x^{(8)} - x^{(5)} = [4,6071; 1,4822].$$

При координатах  $x^{(9)} = [4,6071; 1,4822]$  значення функції  $f(x^{(9)}) = -0,0077$ , що є фізично неможливим. Досягнута точність  $\varepsilon = |f(x^{(8)}) - f(x^{(7)})| = 0,0045$ . Мінімальна функція  $f(x^{(7)}) = 0,226$  досягається у вершині з наступними координатами  $x^{(7)} = [1,8037; 0,267]$ .



Методом регуляторного симплексу отримано оптимальні геометричні значення комірки елемента теплового захисту з композиційного матеріалу, які становлять наступні значення у кодованому вигляді  $X_1=1,8037$  та  $X_2=0,267$ . У розкодованому значенні, оптимальні геометричні розміри комірки елемента теплового захисту з композиційного матеріалу становлять: довжина комірки 7,6074 мм; товщина комірки 12,534 мм.

#### 7.4 Висновки до розділу

1. Була розроблена конструкція теплового захисту, що виконана з металевих перфорованих листів марки СтЗсп. Отримано оптимальні розміри перфорації металевих пластин, при яких коефіцієнт теплопровідності конструкції склав 20,7686 Вт/(м·К), а межа міцності на стискання 100,235 МПа. Технологія виробництва такої конструкції теплового захисту енергетичного обладнання є простою і дозволяє мінімізувати фінансові витрати на покупку технологічного обладнання. Запропонована конструкція теплового захисту в сукупності з використаною методикою аналізу може бути застосована в подальших дослідженнях, а саме під час проведення експериментів з пластинами з різних металів.

2. Проведено емпіричні дослідження композиційної теплової ізоляції з різними параметрами пористості. Складено рівняння регресії та виявлено найсуттєвіші фактори впливу. Знайдено ефективні параметри пористості (довжина комірки 7,6074 мм; товщина комірки 12,534 мм) при яких досягається коефіцієнт теплопровідності 0,226 Вт/(м·К). Таким чином, поставлені задачі виконані в повній мірі. Отримані результати можуть бути впроваджені у вже існуючі технології виробництва композиційних сандвіч панелей або служити базисом для розробки більш сучасних матеріалів.

## 8. СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПЕРЕНЕСЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ КРІЗЬ ТІЛА З МІКРОПОРИСТОЮ СТРУКТУРОЮ

### 8.1 Математичний опис перенесення теплової енергії крізь пористе тіло із закритою пористою структурою

Для пористого теплоізоляційного матеріалу або елемента конструкції теплового захисту енергетичного обладнання перенесення енергії крізь пористу структуру характеризуватиметься ефективним коефіцієнтом теплопровідності або тепловим опором. 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. 8.1.

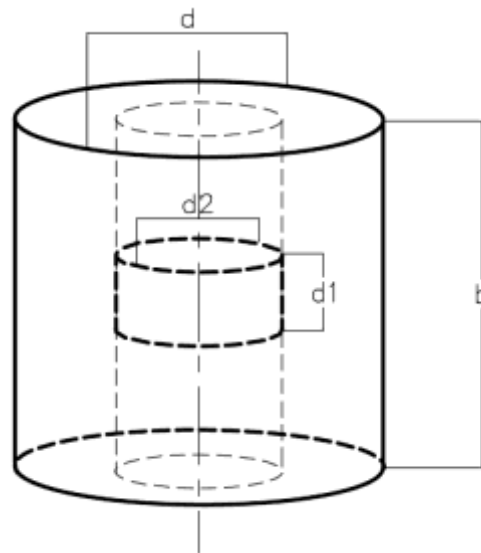


Рисунок 8.1 – Теплова трубка з порою

Для стаціонарного теплового потоку через бічну поверхню пори, а за малого  $b$  та  $d$  й через кожен перетин теплової трубки енергетичного потоку протікає в одиницю часу питомий тепловий потік у кількості

$$q = \frac{Q_i}{\pi \cdot d_2 \cdot d_1}.$$

Для виведення мінімальної температури, що може бути задана на кінці пористої конструкції теплового захисту розглянемо лінії току теплоти крізь упорядковану пористу структуру (рис.8.2). Лінії потоку теплової енергії у пористої конструкції теплового захисту енергетичного обладнання близько ліній 1-1 та 2-2 стають паралельними, та не перетинають їх. Лінії 1-1 та 2-2 умовно приймають за адіабатні площини [5, 262]. Якщо розглядати тепловий потік, що обмежений адіабатами 1-1 та 2-2, які спрямовані вздовж теплового потоку між порами, то отримаємо канал теплового потоку між розглянутими порами та каналом умовною товщиною  $d$  (рис.8.1). У попередніх розділах дисертаційної роботи знайдено ефективний коефіцієнт теплопровідності пористого теплоізоляційного матеріалу так конструкції теплового захисту з врахуванням конвективних потоків в середині пір та доведено, що при достатньо малих розмірах пір конвективною та радіаційною складовою ефективного коефіцієнта теплопровідності можна нехтувати, тому розглянемо передачу теплової енергії по тепловому каналу тільки завдяки теплопровідності матеріалу.

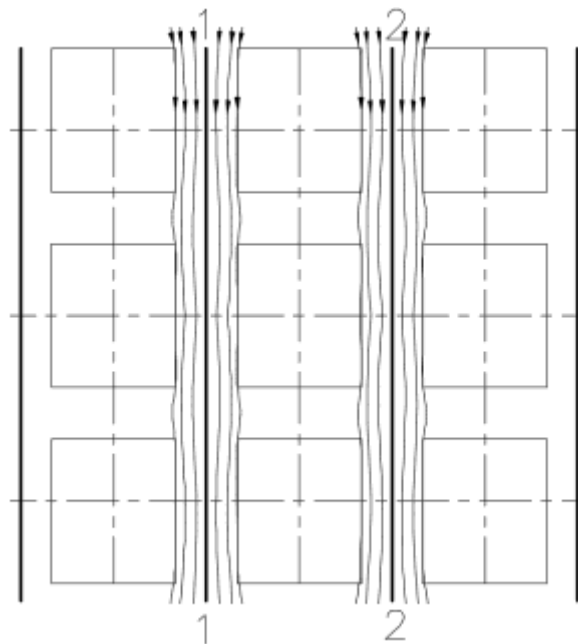


Рисунок 8.2 – Лінії току теплоти у пористій структурі конструкції теплового захисту енергетичного обладнання

Тепловий потік, що пройде через тепловий канал пористої структури конструкції теплового захисту енергетичного обладнання, буде задавати наступну різницю температур на кінцях цього каналу

$$\Delta T = \frac{q \cdot \Delta S \cdot b}{\lambda},$$

де  $\Delta S$  – площа теплового каналу, по якому передається теплота тільки завдяки теплопровідності матеріалу;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

$b$  – довжина каналу.

Нехай у тепловому каналі знаходиться одна тепла трубка, тоді підставивши у різницю температур теплового каналу тепловий потік, що проходить крізь теплову трубку, отримаємо мінімально-можливу температуру на кінці теплового каналу

$$T_2 = T_1 + \frac{Q_i \cdot \Delta S \cdot b}{\lambda \cdot \pi \cdot d_2 \cdot d_1}.$$

За  $d_1 = b$  (тобто розмір пори рівний ширині теплового каналу) та однієї пори, легко довести, що

$$\Delta S = \frac{\pi d^2 (1 - \Pi)}{\Pi},$$

де  $\Pi$  – пористість матеріалу.

Для загального випадку буде справедливим наступне співвідношення

$$\frac{b}{d_1} = \frac{n_b}{\Pi_b},$$

де  $n_b$  – кількість пір у тепловому каналі;

$\Pi_b$  – пористість даного каналу.

Так

$$\Delta S = \frac{\pi(d^2 - d_2^2)}{4}.$$

Тоді тепловий потік, що протікає через теплову трубку з порами можна виразити через мінімальну температуру (мінімальну різницю температур) на кінцях каналу теплового току

$$Q_i = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot d_2 \cdot \Pi_b \cdot \Delta T}{\Delta S \cdot n} \quad (8.1)$$

У даній формулі виділимо

$$\phi_i = \frac{\Pi_b}{n_b}.$$

Величина  $\phi_i$  являє собою теплову проникність теплового каналу та є безрозмірною.

Також у формулі (8.1) відокремимо геометричну характеристику теплового каналу яка дорівнює відношенню довжини лінії поперечного перетину пори до площі поверхні матеріалу у розрізі з порою.

$$\Gamma_i = \frac{\pi \cdot d_2}{\Delta S}.$$

Розмірність цієї величини  $m^{-1}$ . Чим вона більше, тим менша різниця між тепловим каналом та тепловою трубкою. Тобто, чим більша дана геометрична характеристика, тим менша різниця між  $d_2$  та  $d$ .

Тепловий потік, що протікає через теплову трубку з порами буде дорівнювати

$$Q_i = \lambda \cdot \phi_i \cdot \Gamma_i \cdot \Delta T.$$

Мінімальний тепловий потік крізь пористий елемент конструкції теплового захисту буде дорівнювати сумі мінімальних теплових потоків через теплові канали. Приймаючи, що кількість пір та їх розмір по товщині елементу конструкції теплового захисту є величиною сталою, то отримаємо

$$Q = \lambda \cdot \phi \cdot \Gamma \cdot \Delta T, \quad (8.2)$$

де  $\phi$  – теплова проникність пористого елемента конструкції теплового захисту.

Отже

$$\lambda_{ef} = \lambda \cdot \phi \cdot \Gamma. \quad (8.3)$$

Геометрична характеристика теплової трубки пористого теплоізоляційного матеріалу або елемента конструкції теплового захисту

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

де  $S$  – площа матеріалу, до якої направлено теплову енергію.

З рівняння (8.3) слідує, що зменшення коефіцієнту теплопровідності пористого матеріалу за рахунок пір буде залежати від добутку  $\phi \cdot \Gamma$ .

$$\phi \cdot \Gamma = \frac{\Pi_b}{n_b} \cdot \frac{2\pi r_2}{\Delta S}, \quad (8.4)$$

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

Отже

$$\lambda_{ef} = \lambda_m \frac{\Pi_b}{n_b} \cdot \frac{2\pi r_2}{\Delta S}. \quad (8.5)$$

Отримане рівняння (8.5) дає можливість аналітично розрахувати ефективний коефіцієнт теплопровідності для закритих пористих структур елементів теплового захисту та теплоізоляційних матеріалів. Зменшення коефіцієнту теплопровідності пористого матеріалу завдяки порам буде залежати від коефіцієнта теплової проникності та геометричної характеристики пористої структури.

## **8.2 Математичний опис перенесення теплової енергії крізь пористе тіло із відкритою пористою структурою**

Оскільки існує зв'язок між тепловим та гідродинамічним опором [263], то для математичного моделювання процесів переносу тепломасообміну через пористий теплоізоляційний матеріал або елемент конструкції теплового захисту з відкритою пористою структурою використаємо закон Дарсі [264-266]

$$\bar{V} = -\frac{K}{\mu} \bar{\nabla} P,$$

де  $\bar{V}$  – вектор швидкості рідини;

$K$  – проникність пористого матеріалу;

$\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості;

$P$  – тиск.

Для врахування високої пористості матеріалу елементу конструкції теплового захисту або запобіганню проковзування на твердих стінках, модель розширимо за допомогою моделі Брінкмана (Brinkman) [267].

Так процес перенесення маси, імпульсу і енергії описується системою нестационарних рівнянь Брінкмана-Буссінеска в пористому середовищі і нестационарним рівнянням теплопровідності. Диференціальне рівняння теплопередачі в пористому тілі виглядає наступним чином [268]

$$(\rho c_p)_m \frac{\partial T}{\partial \tau} + (\rho c_p)_f \vec{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_m \nabla T) + q_m,$$

де  $m$  – індекс, що відносить до всього пористого матеріалу з флюїдами;

$f$  – індекс, що відносить до флюїдів;

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

Коефіцієнт теплопередачі пористого елементу конструкції теплового захисту можна розписати наступним чином

$$k_m = (1 - \Pi)k + \Pi k_f,$$



де  $k$  – коефіцієнт теплопередачі матеріалу.

Але як було доведено у попередніх розділах дисертаційної роботи така форма запису є невірною, тому рекомендується приймати за коефіцієнт теплопередачі пористого елемента конструкції теплового захисту  $k_m$  ефективний коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційного матеріалу  $k_{ef}$

$$\left(\rho c_p\right)_m \frac{\partial T}{\partial \tau} + \left(\rho c_p\right)_f \vec{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot \left(k_{ef} \nabla T\right) + q_m \quad (8.6)$$

Внутрішнє джерело теплоти можна розписати наступним чином [3, 269]

$$q_m = L \cdot \frac{A}{P} \cdot B \cdot T^n \cdot c_f \cdot \nabla T,$$

де  $L$  – питома теплота пароутворення;

$A, B, n$  – емпіричні коефіцієнти;

$c_f$  – концентрація вологи.

Рівняння Нав'є-Стокса для двовимірного стаціонарного потоку

$$\left\{ \begin{array}{l} v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \Delta \vec{v} \\ v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \Delta \vec{v}, \\ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \end{array} \right.$$

де  $\rho$  - середня густина флюїду, яка розраховується через наближення

Буссінеска

$$\rho = \rho_{\infty} [1 - \beta(T - T_{\infty})].$$

Розглянемо передачу флюїдів по пористому тілу елемента конструкції теплового захисту з відкритою каналною пористою структурою уздовж осі  $y$ . З урахування гравітаційних сил, які направлені протилежно до осі  $y$ , та з урахуванням проникності пористого матеріалу по закону Дарсі, отримаємо

$$\begin{cases} v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(P)}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \\ v_y = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial(P + \rho gh)}{\partial y} \end{cases}.$$

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

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

З даного рівняння розподіл тиску по об'єму пористого тіла залежить лише от властивостей флюїду, сили гравітації та коефіцієнта фільтрації

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

Після деяких перетворень отримаємо

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

Для розв'язання даного рівняння введемо позначення:

$$a = \left(\frac{K}{\mu}\right)^2, \quad b = \rho g \left(\frac{K}{\mu}\right)^2 + \frac{1}{\rho}, \quad c = \rho g \left(\frac{K}{\mu}\right)^2 + \frac{K}{\rho},$$

$$d = -g - \rho g \frac{K}{\rho} - \rho^2 g^2 \left(\frac{K}{\mu}\right)^2.$$

Тоді

$$aP'P'' + bP' + cP'' = d, \quad (8.7)$$

де  $P' = \frac{\partial P}{\partial y}$ ,  $P'' = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}$ .

Рівняння (8.7) - рівняння другого порядку, яке допускає зниження порядку за допомогою наступної заміни змінної

$$Z = P' = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (8.8)$$

Виконуючи заміну (8) в (7) приходимо до наступного рівняння першого порядку

$$aZ \frac{dZ}{dy} + bZ + c \frac{dZ}{dy} = d.$$

Отримане рівняння допускає поділ змінних

$$\frac{aZ + c}{d - cZ} dZ = dy \Rightarrow \int \frac{aZ + c}{d - cZ} dZ = \int dy \Rightarrow$$

$$\frac{(ad + c^2) \ln|cZ - d| + acZ}{c^2} = y + C_1, \quad (8.9)$$

де  $C_1$  - постійна інтегрування.

Повертаючись в рівнянні (8.9) до початкової змінної, приходимо остаточно до наступного нелінійного рівняння, але вже першого порядку:

$$\frac{(ad + c^2) \ln |cP' - d| + acP'}{c^2} = y + C_1. \quad (8.10)$$

Дане рівняння необхідно надалі аналізувати, наприклад використовуючи теорію асимптотичних рядів чи інший математичний апарат. Проте, рівняння можна спростити коли виконується рівність

$$c^2 = -ad \Leftrightarrow$$

$$\left( \rho g \left( \frac{K}{\mu} \right)^2 + \frac{K}{\rho} \right)^2 = \left( \frac{K}{\mu} \right)^2 \left( g + \rho g \frac{K}{\rho} + \rho^2 g^2 \left( \frac{K}{\mu} \right)^2 \right). \quad (8.11)$$

Розкривши скобки маємо

$$\rho^2 g^2 \left( \frac{K}{\mu} \right)^4 + 2\rho g \frac{K}{\rho} \left( \frac{K}{\mu} \right)^2 + \left( \frac{K}{\rho} \right)^2 = g \left( \frac{K}{\mu} \right)^2 + \rho g \frac{K}{\rho} \left( \frac{K}{\mu} \right)^2 + \rho^2 g^2 \left( \frac{K}{\mu} \right)^4.$$

Спростити деякі члени рівняння та розписавши густину флюїду через динамічну та кінематичну в'язкість, отримаємо

$$gK \left( \frac{K}{\mu} \right)^2 + \nu \left( \frac{K}{\mu} \right)^2 = g \left( \frac{K}{\mu} \right)^2.$$

Оскільки  $\left(\frac{K}{\mu}\right)^2 \neq 0$  для пористого тіла, то

$$K = \frac{g - \nu}{g} \rightarrow 1. \quad (8.12)$$

Отже, приймаючи коефіцієнт фільтрації за рівнянням (8.12), рівняння (8.10) має найпростіший вид

$$\frac{a}{c} P' = y + C_1. \quad (8.13)$$

Після інтегрування отримаємо

$$\int dP = \frac{c}{a} \left( \int y dy + \int C_1 dy \right) \Rightarrow P = \frac{c}{2a} y^2 + C_1 y + C_2.$$

Таким чином, вихідне рівняння має наступне рішення

$$P = \frac{\rho g \left(\frac{K}{\mu}\right)^2 + \frac{K}{\rho}}{2 \left(\frac{K}{\mu}\right)^2} y^2 + C_1 y + C_2,$$

де  $C_1, C_2$  - постійні інтегрування.

З рівняння (8.10) також слідує, що

$$P' \neq \frac{d}{c}.$$

Отже

$$P \neq \frac{-g - \rho g \frac{K}{\rho} - \rho^2 g^2 \left(\frac{K}{\mu}\right)^2}{\rho g \left(\frac{K}{\mu}\right)^2 + \frac{K}{\rho}} y.$$

Диференційне рівняння теплопровідності для елемента конструкції теплового захисту з відкритою каналною пористою структурою буде виглядати

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

Розглядаючи передачу теплової енергії крізь пористу структуру як рух флюїду можна сказати, що  $\frac{K}{\mu}$  характеризує теплову проникність тіла за рахунок фононів. Добуток  $\rho g$  відображає передачу енергії конвекцією, яка залежить від квадрату геометричної довжини пори (оскільки для каналної 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 буде дорівнювати масі флюїду. Об'єднав емпіричні коефіцієнти та константи, диференційне рівняння теплопровідності буде виглядати наступним чином

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

де  $C$  – константи.

Прийmemo, що маса елементарного флюїду є величиною сталою. Враховуючі формулу (8.2) та те, що ефективний коефіцієнт теплопередачі у даному випадку не враховує передачу енергії конвекцією та випромінюванням, отримаємо

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

де  $\chi = \frac{\rho g \left( \frac{K}{\mu} \right)^2 + \nu \frac{K}{\mu}}{2 \left( \frac{K}{\mu} \right)^2}$  - коефіцієнт, що виражає теплову проникність

матеріалу для конвективних потоків.

Враховуючі рівняння (8.12) та після деяких перетворень отримаємо

$$\chi = \frac{\frac{g-\nu}{\nu} + \nu}{2 \frac{g-\nu}{g\mu}}.$$

Зведемо отримане рівняння до спільного знаменника, та враховуючі, що густина флюїду дорівнює відношенню динамічної до кінематичної в'язкості, отримаємо

$$\chi = \frac{g\rho(g-\nu+\nu^2)}{2(g-\nu)}. \quad (8.14)$$

З [154, 269] відомо, що функція залежності ефективного коефіцієнта теплопровідності від градієнту температури є поліномом другого ступеню, отже можна припустити що перенесення енергії завдяки конвекції є також поліномом другого порядку. Звідси за граничних умов  $y=b$  (тобто тільки для відкритої наскрізної пористості)

$$Q = \lambda \cdot \phi \cdot \Gamma \Delta T + \frac{C_7 T^2 + C_8 T + C_9}{\chi d_1^2 + C_1 d_1 + C_2}.$$

Також необхідно врахувати, що за температури абсолютного нуля перенесення енергії крізь його пористу структуру неможливе, тобто

$$Q = \lambda \cdot \phi \cdot \Gamma \Delta T + \frac{C_7 T^2 + C_8 T}{\chi d_1^2 + C_1 d_1 + C_2}.$$

Для спрощення отриманого виразу введемо додаткове умовне позначення – геометричну характеристику відкритої пористої структури теплоізоляційного елементу конструкції теплового захисту

$$\Gamma_o = \frac{1}{\chi \bar{d}_1^2 + C_1 \bar{d}_1 + C_2}. \quad (8.15)$$

Дана функція є постійною для конкретного пористого теплоізоляційного матеріалу з відомою структурою пір. Тоді

$$Q = \lambda \cdot \phi \cdot \Gamma \Delta T + \Gamma_o (C_7 T^2 + C_8 T). \quad (8.16)$$



Отримане рівняння передачі кількості теплової енергії крізь відкриту каналну пористу структуру описує передачу теплової енергії флюїдами у пористих структурах теплоізоляційних елементів конструкції теплового захисту. Особливістю рівняння є те, що воно описує не тільки передачу енергії у каналних порах, а й також враховує існуючі закриті пори у теплоізоляційному матеріалі. Для знаходження констант отриманого рівняння проведемо емпіричні дослідження.

### **8.3 Знаходження констант рівняння перенесення теплової енергії флюїдами у відкритих пористих структурах теплоізоляційних елементів конструкції теплового захисту**

Для знаходження констант рівняння передачі кількості теплової енергії крізь пористі структури теплоізоляційних елементів конструкції теплового захисту по-перше необхідно знайти добуток теплової проникності теплоізоляційного матеріалу на геометричну характеристику закритої пористої структури  $\phi \cdot \Gamma$  для матеріалу. По-друге для волокнистих елементів конструкції теплового захисту знаходимо  $C_7$  та  $C_8$ , змінюючи температуру за сталої структури матеріалу, після чого можна знайти  $\Gamma_0$ , змінюючи товщину матеріалу та довжину пір за сталої температури.

Було вирішено використати в якості матеріалу нержавіючу феритну сталь 12Х17 з щільністю  $7720 \text{ кг/м}^3$ , коефіцієнтом теплопровідності  $24 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  та питомим електроопором  $560 \text{ НОм}\cdot\text{м}$ . Волокнисто-пористі вироби з даної сталі використовуються як елементи конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання, у харчовій промисловості як фільтруючий елемент, а іноді як нержавіюча металева губка.

На розробленій у попередніх розділах дисертаційної роботи установці по визначенню коефіцієнту теплопровідності електропровідних пористих виробів знайдемо добуток теплової проникності теплоізоляційного матеріалу

на геометричну характеристику закритої пористої структури  $\phi \cdot \Gamma$  дослідницького зразка. Визначення коефіцієнту теплопровідності та електропровідності матеріалу проводилося за розподілом температур та потенціалів на матеріалі, що досліджується. Суть методу полягає у тому, що якщо по електропровідному матеріалу сталої площини перетину з ідеальною бічною тепловою ізоляцією пропустити електричний струм, то бічні поверхні будуть являтися ізотермічними (під час підтримки температури).

Оскільки на даній установці не враховується теплопередача конвективними потоками у пористій структурі, то

$$\frac{\lambda_{nop}}{\delta \cdot \lambda_{Cm}} = \phi \cdot \Gamma,$$

де  $\lambda_{nop}$  – коефіцієнт теплопровідності дослідницького електропровідного зразка, знайдений за формулою (4.1);

$\delta$  – товщина експериментального зразка (відстань між затискачами);

$\lambda_{Cm}$  – коефіцієнт теплопровідності нержавіючої феритної сталі за довідковими даними.

Знаходимо експериментально добуток теплової проникності теплоізоляційного матеріалу на геометричну характеристику закритої пористої структури та коефіцієнта теплопровідності нержавіючої феритної сталі

$$\phi \cdot \Gamma \cdot \lambda_{Cm} = \frac{\lambda_{nop}}{\delta} = 126,94$$

Фотографії переносної експериментальної установки та зразка сталі 12Х17 з пористістю 70% представлено на рис. 8.3. На даній фотографії зразок знаходиться в затискачах розробленої установки.

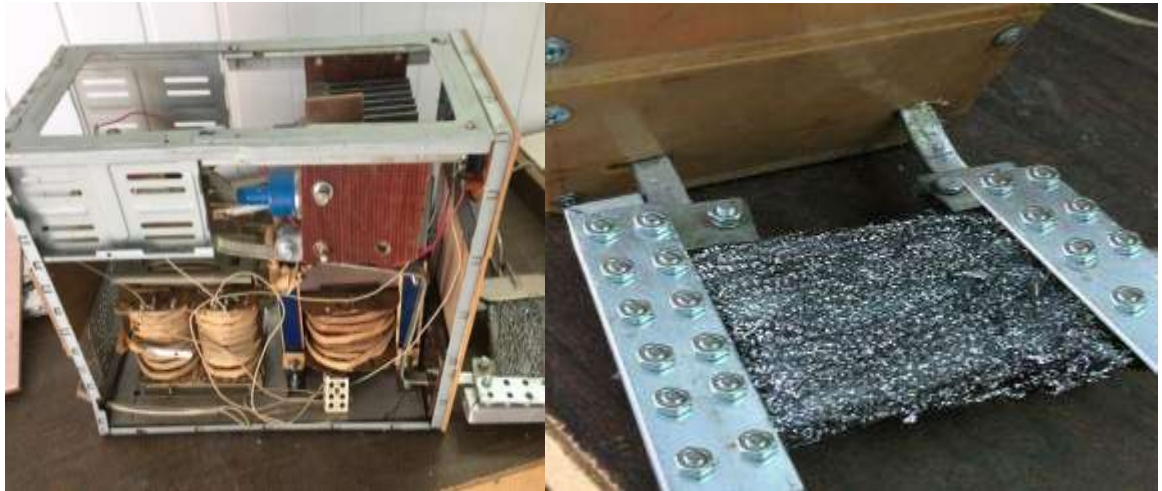


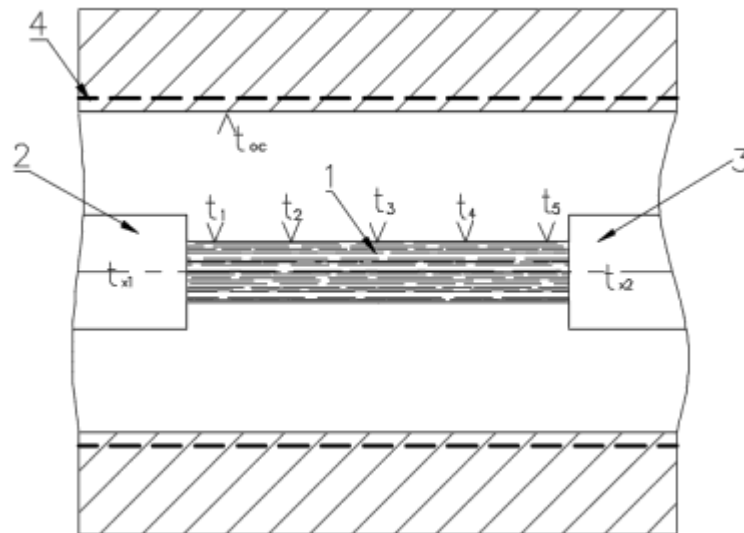
Рисунок 8.3 – Фотографія пористо-волоконного зразка сталі 12X17 у затискачах запатентованої установки

В [270, 271] наводиться метод Кольрауша для дослідження стаціонарного теплового потоку. Даний метод оснований на електротепловій аналогії та використовується сучасними науковцями для дослідження капілярно-пористих тіл [272, 273]. Модифікуємо даний метод, щоб знайти розподіл температур по пористому елементу конструкції теплового захисту.

Для стаціонарного теплового режиму

$$\lambda_{cm} \cdot \phi \cdot \Gamma \frac{d^2 T}{dy^2} = -\Gamma_o (C_7 \bar{T}^2 + C_8 \bar{T}).$$

Отже, маючи функціональну залежність зміни температури по зразку, можна отримати  $\Gamma_o (C_7 \bar{T}^2 + C_8 \bar{T})$ . Схема дослідницької установки представлена на рис. 8.4. Контроль температур холодильників здійснювала електронна система управління за розробкою Тітлова О.С. [274]. Ефективність роботи системи холодильників обумовлено використанням багатоконтурної системи автоматичного керування зі змінною комутуючою структурою [275].



1 – дослідний зразок пористого елемента теплової конструкції; 2 – холодильник з рідиною за температури  $t_{x1}$ ; 3 – холодильник з рідиною за температури  $t_{x2}$ ; 4 – електрична піч.

Рисунок 8.4 – Схема дослідницької установки розподілу температур у відкритих пористих системах

Було проведено дослідження розподілу температури за форми дослідницького зразка  $\Gamma_{01}$  та температурами  $T_{oc} = 318$  °К,  $T_{x2} = 293$  °К;  $T_{x1} = 343$  °К;  $T_{oc} = 345$  °К,  $T_{x2} = 320$  °К,  $T_{x1} = 370$  °К; а також за  $T_{oc} = 425$  °К,  $T_{x2} = 400$  °К,  $T_{x1} = 450$  °К. Результати експерименту відображено на рис. 8.6.

Граничні умови:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{за } y = 0, T = T_1; \\ \text{за } y = b/4, T = T_2; \\ \text{за } y = b/2, T = T_3; \\ \text{за } y = b/3, T = T_4; \\ \text{за } y = b, T = T_5. \end{array} \right.$$

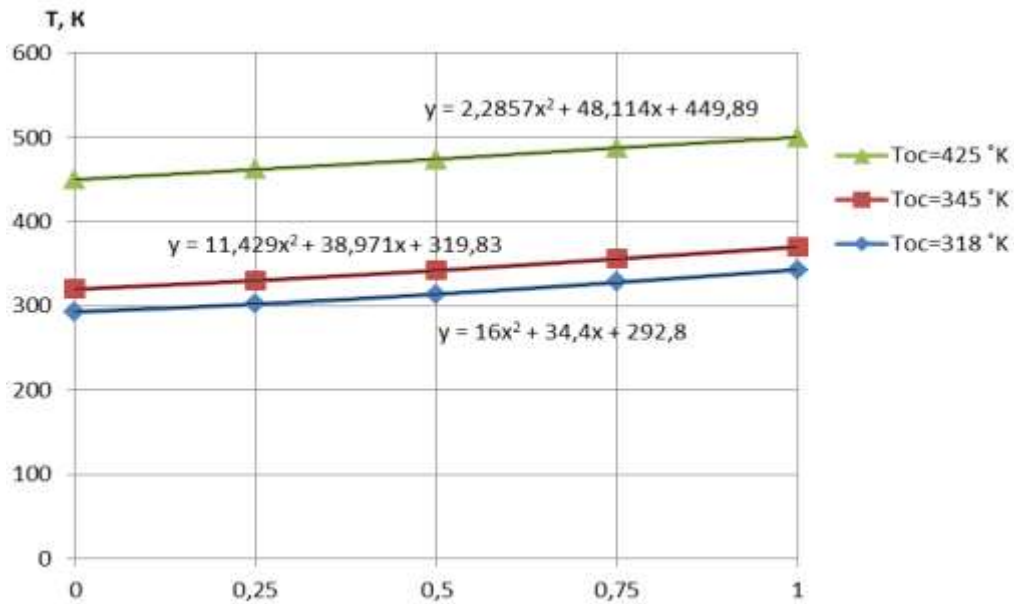


Рисунок 8.6 – Результати розподілу температур у пористому зразку по його відносній довжині при різних середніх температурах

Методом найменших квадратів була проведена апроксимація експериментальних даних та отримана система рівнянь

$$\begin{cases} 126,94 \frac{16y^2 + 34,4y + 292,8}{dy^2} = -\Gamma_{01} (C_7 \cdot 318^2 + C_8 \cdot 318); \\ 126,94 \frac{11,429y^2 + 38,971y + 319,83}{dy^2} = -\Gamma_{01} (C_7 \cdot 345^2 + C_8 \cdot 345); \\ 126,94 \frac{2,2857y^2 + 48,114y + 449,89}{dy^2} = -\Gamma_{01} (C_7 \cdot 425^2 + C_8 \cdot 425). \end{cases}$$

Продиференціював отриману систему знайдено рівняння взаємозв'язку констант рівняння перенесення теплової енергії флюїдами у відкритих пористих структурах теплоізоляційних елементів конструкції теплового захисту та геометричної характеристики відкритої пористої структури даного матеріалу

$$\begin{cases} -12,77 = \Gamma_{01}(C_7 \cdot 318 + C_8); \\ -8,41 = \Gamma_{01}(C_7 \cdot 345 + C_8); \\ -1,56 = \Gamma_{01}(C_7 \cdot 425 + C_8). \end{cases} \quad (8.17)$$

Побудувавши графіки функцій визначимо області можливих рішень. З рис. 8.7 слідує, що функція геометричної характеристики відкритої пористої структури  $\Gamma_{01}$  складається з гіперболічних поверхонь та має декілька коренів.

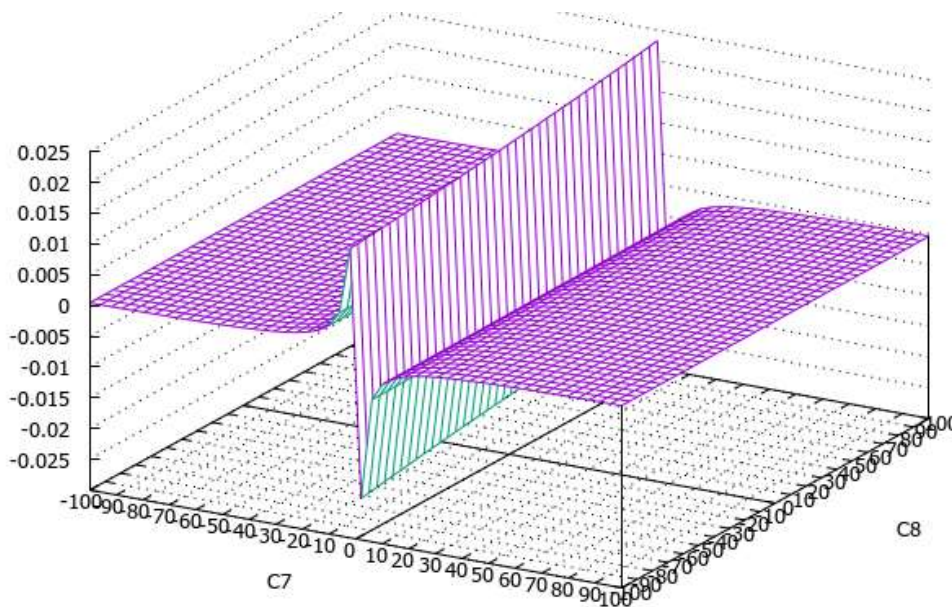


Рисунок 8.7 – Графік функції  $\Gamma_{01} = -\frac{12,77}{C_7 \cdot 318 + C_8}$

Графіки функцій  $\Gamma_{01} = -\frac{8,41}{C_7 \cdot 345 + C_8}$  та  $\Gamma_{01} = -\frac{1,56}{C_7 \cdot 425 + C_8}$  виглядають

аналогічно, та зображені на рис. 8.8.

Для спрощення знаходження кількості теплової енергії, що передається флюїдами крізь пористі структури теплоізоляційних елементів конструкції теплового захисту пропонується вирішувати рівняння теплопровідності у наступному вигляді

$$\lambda_{cm} \cdot \phi \cdot \Gamma \frac{d^2 T}{dy^2} = -\Gamma_o C_7 \bar{T}^2 - \Gamma_o C_8 \bar{T},$$

знаходячи не окремі константи, а комплекси  $\phi \cdot \Gamma$ ,  $-\Gamma_o C_7$  та  $-\Gamma_o C_8$ .

Запишемо систему (8.17) у іншому вигляді

$$\begin{cases} \Gamma_{o1}(C_7 \cdot 318 + C_8) + 12,77 = 0; \\ \Gamma_{o1}(C_7 \cdot 345 + C_8) + 8,41 = 0; \\ \Gamma_{o1}(C_7 \cdot 425 + C_8) + 1,56 = 0. \end{cases} \quad (8.18)$$

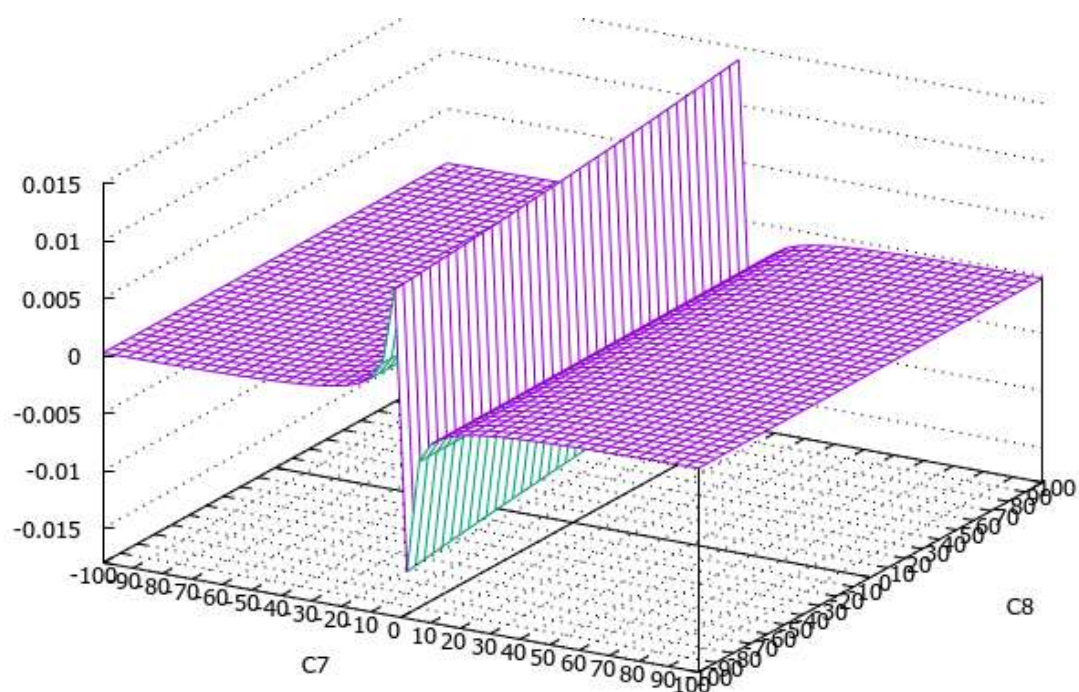
Віднімемо перші два рівняння у системі та знайдемо

$$\frac{4,36}{27} = \Gamma_{o1} C_7. \quad (8.19)$$

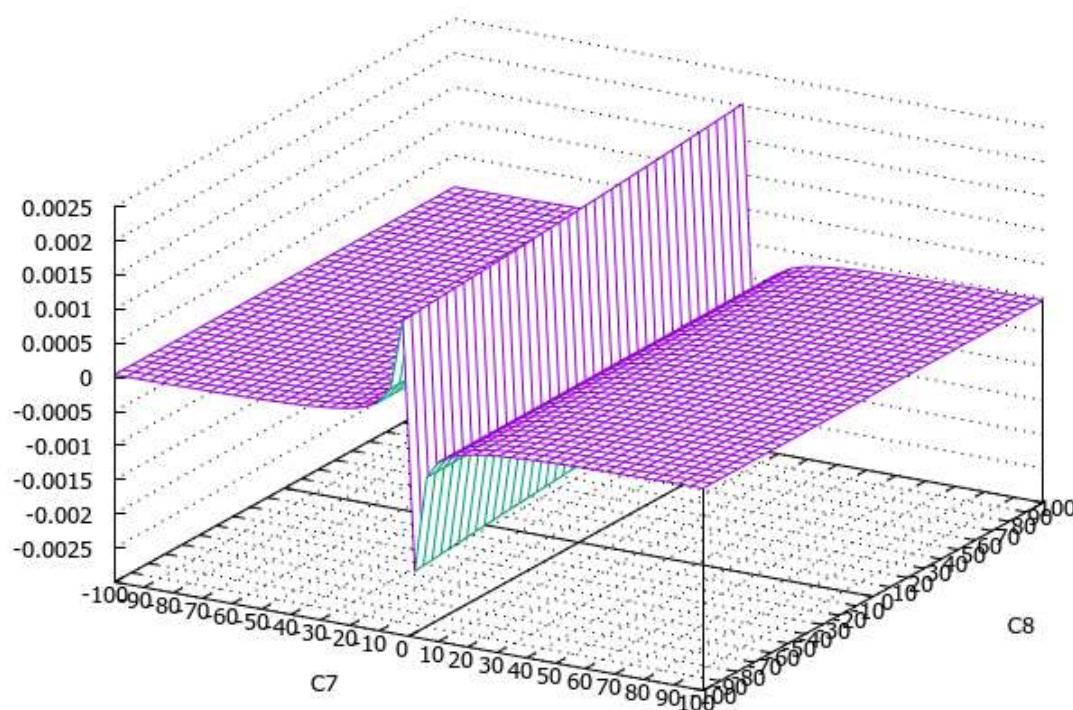
Після підстановки (8.19) у третє рівняння системи (8.18) знайдемо

$$-70,19 = \Gamma_{o1} C_8. \quad (8.20)$$





$$-8.41/(345*x+y)$$



$$-1.56/(425*x+y)$$

Рисунок 8.8 – Графіки функцій  $\Gamma_{01} = -\frac{8,41}{C_7 \cdot 345 + C_8}$  та  $\Gamma_{01} = -\frac{1,56}{C_7 \cdot 425 + C_8}$



Тоді рівняння теплопровідності для пористо-волокнистого виробу зі сталі 12Х17 з пористістю 70% буде виглядати наступним чином

$$\lambda_{cm} \cdot \phi \cdot \Gamma \frac{d^2 T}{dy^2} = -\Gamma_o C_7 \bar{T}^2 - \Gamma_o C_8 \bar{T},$$

де  $\phi \cdot \Gamma = 5,289 \text{ м}^{-1}$ ;

$\Gamma_o C_7 = 0,16148 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^2)$ ;

$\Gamma_o C_8 = -70,19 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Співвідношення  $C_7$  до  $C_8$  можна знайти, поділивши перше рівняння на друге з системи (8.17)

$$C_7 = -0,023C_8.$$

Для визначення впливу геометричної характеристики відкритої пористої структури на передачу енергії крізь пористий елемент конструкції теплового захисту дослідження проводилися під час різних ступенях стискання дослідного зразка пористо-волокнистого виробу зі сталі 12Х17 за однаковою середньою температурою. Результати проведеного експерименту наведено на рис.8.9. Градієнт температури у всіх експериментах дорівнював  $50 \text{ }^\circ\text{К}$ .

Продиференціювавши та знайшовши для кожного стану стискання матеріалу коефіцієнти  $\lambda_{cm} \cdot \phi \cdot \Gamma$ , отримаємо наступну систему рівнянь

$$\begin{cases} 126,94 \cdot 32 = -\Gamma_{o1} (C_7 \cdot 318^2 + C_8 \cdot 318); \\ 124,62 \cdot 48 = -\Gamma_{o2} (C_7 \cdot 318^2 + C_8 \cdot 318); \\ 128,17 \cdot 11,4 = -\Gamma_{o3} (C_7 \cdot 318^2 + C_8 \cdot 318). \end{cases} \quad (8.21)$$

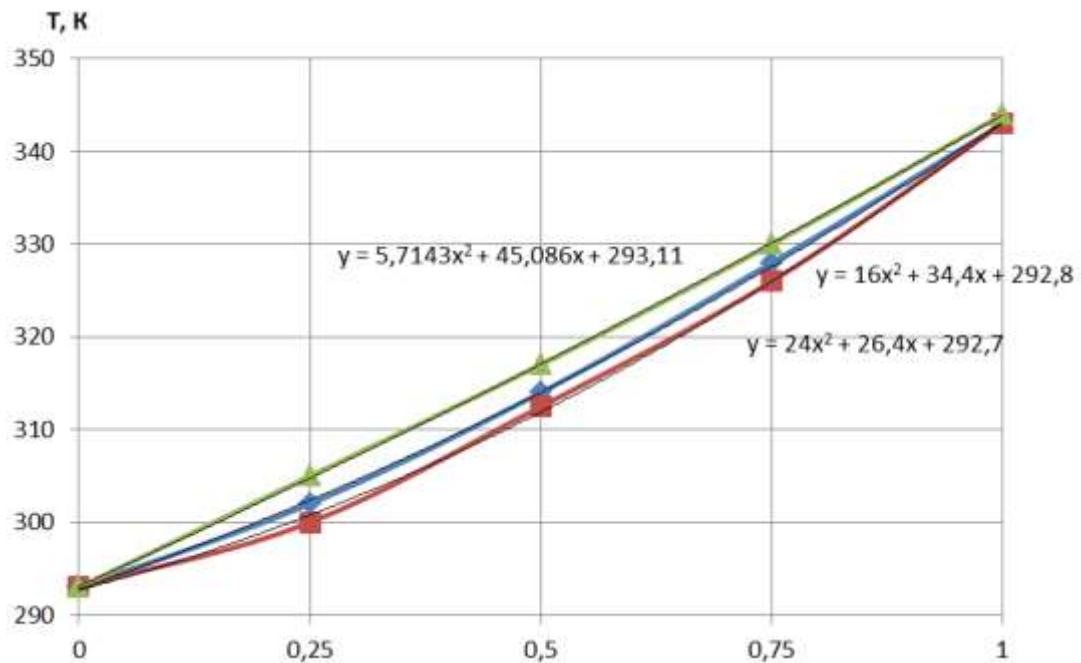


Рисунок 8.9 – Результати розподілу температур у пористому зразку по його відносній довжині під час різних ступенях стискання

Зробивши заміну у системі (8.21)  $C = C_7 \cdot 318 + C_8$ , отримаємо систему рівнянь взаємозв'язку констант рівняння перенесення теплової енергії флюїдами у відкритих пористих структурах теплоізоляційних елементів конструкції теплового захисту та геометричних характеристик відкритої пористої структури матеріалу, що досліджується

$$\begin{cases} C \cdot \Gamma_{o1} = -12,77; \\ C \cdot \Gamma_{o2} = -19,14; \\ C \cdot \Gamma_{o3} = -4,61. \end{cases}$$

Розписавши  $C$ , отримаємо взаємозв'язок функції геометричної характеристики волокнисто-пористого матеріалу по ступінню стискання

$$0,67\Gamma_{o2} = \Gamma_{o1} = 2,77\Gamma_{o3}. \quad (8.22)$$

Аналізуючи (8.22) робимо висновок, що чим тіло більш стиснуте та менше стають пори у волокнистому матеріалі, тим менше стає функція геометричної характеристики волокнисто-пористого тіла. Тобто підтверджується раніше висунута гіпотеза, що для закритої пористої структури дана функція прагне до нуля.

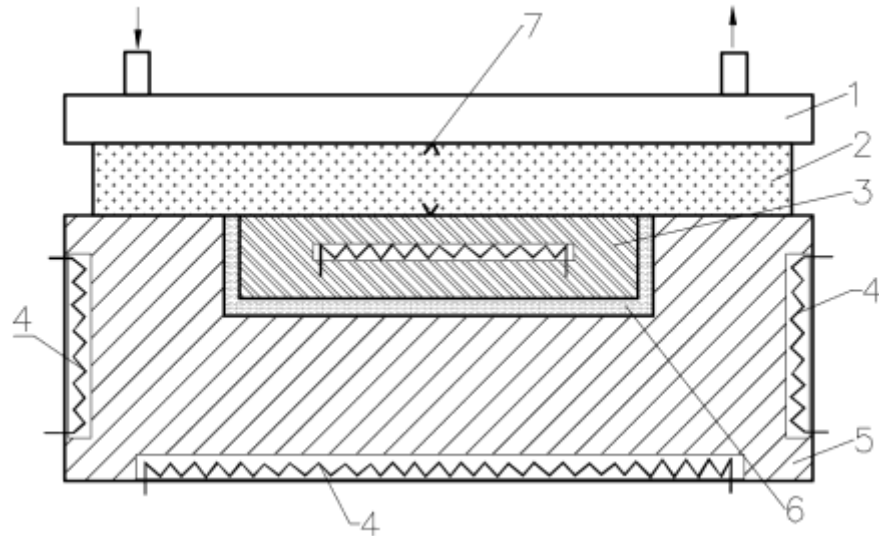
#### **8.4 Знаходження коефіцієнту теплової проникності та геометричної характеристики пористих структур поширених теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкцій теплового захисту**

Знання коефіцієнту проникності пористого елемента конструкції теплового захисту та ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів є дуже важливим під час розрахунку енергетичного та ексергетичного балансу теплоенергетичного обладнання [276, 277], а отже, й для визначення переліку енергозберігаючих заходів підприємства, тому знайдено коефіцієнт теплової проникності та геометричні характеристики пористих структур поширених теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкцій теплового захисту.

Для вимірювання теплопровідності зернистих та порошкових матеріалів найкраще використовувати установки, розроблені по принципу коаксіальних циліндрів, розробленим Дешко В.І. [278].

Для дослідження теплопровідності волокнисто-пористих матеріалів був сконструйований прилад по схемі, яка зображена на рис. 8.10. Основний нагрівач поміщається у внутрішній порожнині диска 3, розташованого в циліндричній проточці масивного мідного блоку 5 для вирівнювання температури; диск 3 і блок 5 розділені шаром теплової ізоляції 6. Зразок досліджуваного матеріалу 2 притискається до поверхні нагрівача холодильником 1. Товщина і щільність зразка змінюються завдяки підтискання його холодильником. Нагрівачі 4 запобігають втратам тепла від основного нагрівача. Перепади температур між диском та основним нагрівачем і блоком

не перевищують 1 К, а втрати тепла складають не більше 2%. Прилад поміщається у вакуумну камеру. Розрахунковою поверхнею зразка є поверхня, відповідна площині зіткнення центрального диска з дослідним зразком.



1 – холодильник; 2 – волокнисто-пористий матеріал; центральний диск з нагрівачем; 4 – додаткові нагрівачі; 5 – мідний блок; 6 – теплоізоляція; 7 – точки заміру температури

Рисунок 8.10 – Прилад для дослідження теплопровідності волокнисто-пористих матеріалів

Коефіцієнт теплопровідності пористого матеріалу розраховується за формулою

$$\lambda = \frac{Q}{F_p (t_{c1} - t_{c2})}$$

Вимірювання теплопровідності пористих будівельних матеріалів з закритими порами здійснювалося приладом «ИТП-МГ4».

Після проведення експериментів були визначені геометричні характеристики пористої структури та теплова проникність пористих структур поширених теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкцій теплового захисту. Результати експериментів занесені до таблиці 8.1.

Таблиця 8.1

Характеристики пористої структури та теплова проникність пористих структур поширених теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкцій теплового захисту

Пористий матеріал	$\phi \cdot \Gamma \cdot \delta$	$\Gamma_o C_7,$ Вт/(м <sup>2</sup> · К <sup>2</sup> )	$\Gamma_o C_8,$ Вт/(м <sup>2</sup> · 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

## 8.5 Висновки до розділу 8

1. Вперше математично виведено рівняння для розрахунку ефективного коефіцієнту теплопровідності для закритих пористих структур теплоізоляційних матеріалів. Аналітично отримано коефіцієнт теплової проникності для пористих структур. Виявлено, що зменшення коефіцієнту теплопровідності пористого матеріалу за рахунок пір буде залежати від коефіцієнта теплової проникності та геометричної характеристики пористої структури.

2. Розподіл тиску флюїду по об'єму пористого тіла залежить лише от властивостей флюїду у порах, сили гравітації та коефіцієнта фільтрації пористого тіла.

3. Отримано рівняння передачі кількості теплової енергії крізь пористі структури теплоізоляційних елементів конструкції теплового захисту.

4. Розроблена методологія, а також експериментальна установка для знаходження характеристики пористої структури та теплової проникності електропровідних пористих елементів теплового захисту.

5. Чим пористе тіло більш стиснуте, тим менше стають пори у волокнистому матеріалі та тим менше стає функція геометричної характеристики волокнисто-пористого тіла. Для закритої пористої структури дана функція прагне до нуля.

6. Знайдено геометричні характеристики пористої структури та теплову проникність чотирнадцяти поширених теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкцій теплового захисту.

## 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 °C 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 теплоізоляційного 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  $\lambda_{\text{мат}}$  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  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; час витримки за даної температури 10 хв.; після пресування цегла поміщалася у піч, де обпалювалася при температурі  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом 2 годин. Теплопровідність виробленої цегли складала  $0,45\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , питома теплоємність  $0,93\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , а міцність на стискання  $7,1\text{ МПа}$ .

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  $6 \times 20$  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  $200$  °С, 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  $272$  °С; основна термообробка - протягом 1,5 годин за температури  $1200$  °С. Міцність на стискання такої цегли  $7,3$  МН/м<sup>2</sup>, 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 ( $0,114 \dots 0,119$ ) Вт/(м·К), питома теплоємність за  $22$  °С становила ( $1,33 \dots 1,41$ ) 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 «Екسкавация», ТОВ «Тера-Гарант», ЗМЗ ім. В.І.Омельченко АТ «МОТОР СІЧ», ПАТ «МК Запоріжсталь».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 1071-р «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року».
2. Соколовская, И.Е. Разработка технологического оборудования и развитие теоретических основ производства высокоэффективных теплоизоляционных материалов: дис. ... кандидата техн. наук : 05.14.06 / Соколовская Ирина Евгеньевна. – Д., 2008.
3. Чудновский, А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов [Текст] / А.Ф. Чудновский. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 456 с.
4. Павленко, А.М. Моделирование процесса производства материала с прогнозируемой теплопроводностью [Текст] / А.М. Павленко, А.В. Кошлак, В.Е. Черниченко // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського – Вип. 2/2008 (49), част. 2. - С. 25-28.
5. Дульнев, Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов [Текст] / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. - Ленинград : Энергия, 1974. - 264 с.
6. Демидович, Б.К. Производство и применение пеностекла [Текст] / Б.К. Демидович. - Минск: Наука и техника, 1972. – 304 с.
7. Бровка, Г.П. Тепло- и массоперенос в природных дисперсных системах при промерзании / Г.П. Бровка. Минск, Наука и техника, 1991, 192 с.
8. Степанов, А.В. Теплофизические свойства дисперсных материалов / А.В. Степанов, А.М. Тимофеев. Якутск, ЯНЦ СО РАН, 1994, 124 с.
9. Hamdami N., Monteau J.-Y., Bail A.L. Transport properties of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures. Pt 1. Properties and water activity // J. Food Eng., 2004, vol. 62, No. 4, p. 373–383.

10. Кругляк, Ю.О., Стріха М.В. Термоелектричні коефіцієнти в узагальненій моделі транспорту електронів // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2016. – Т. 13. – №. 1. – С. 5-23.
11. Liang Y., Wu D., Fu R. Carbon microfibers with hierarchical porous structure from electrospun fiber-like natural biopolymer //Scientific reports. – 2013. – Т. 3. – С. 1119.
12. Мних, А.С. Підвищення енергоефективності теплових процесів згрудкування сипучих матеріалів при інтенсифікації сегрегації у стаціонарних шарах : дис. доктора техн. наук : 05.14.06 / Мних Антон Сергійович. – Одеса., 2017.
13. Säckel W., Nieken U. Structure Formation within Spray-Dried Droplets; Mathematical Modelling of Spray Polymerisation //Process-Spray. – Springer International Publishing, 2016. – С. 89-125.
14. Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н., Савельева И. Ю. Сравнительный анализ оценок теплопроводности однонаправленного волокнистого композита //Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Естественные науки». – 2016. – №. 5 (68).
15. Николаевский, В. Н. Механика насыщенных пористых сред. – Рипол Классик, 2013.
16. Lowell S., Shields J. E. Powder surface area and porosity. – Springer Science & Business Media, 2013. – Т. 2.
17. Pavlenko, A. Basis of forming pores in the material based on argil and their effect on thermal conductivity / 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. ISBN 978-83-7351-457-7. ISSN 2409-658X
18. Dehghan, M. Convection–radiation heat transfer in solar heat exchangers filled with a porous medium: Homotopy perturbation method versus numerical analysis //Renewable Energy. – 2015. – Т. 74. – p. 448-455.

19. Van Bellegghem M. et al. Validation of a coupled heat, vapour and liquid moisture transport model for porous materials implemented in CFD // *Building and Environment*. – 2014. – Т. 81. – p. 340-353.
20. Dhaidan N. S., Khodadadi J. M. Melting and convection of phase change materials in different shape containers: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Т. 43. – p. 449-477.
21. Чейлытко, А.А. Управление теплофизическими характеристиками пористого теплоизоляционного материала / А.А. Чейлытко // *Металлургическая теплотехника*. – 2012. – № 4 (19). – С. 183 – 189
22. Семенов, Л.А., Труды Ростовского инженерно-строительного института, выпуск 4, 1955. – 151 с.
23. Козловский, В.М. Импульсный метод измерения температуропроводности и теплоемкости полупроводниковых образцов малого размера / В.М. Козловский, Б.М. Могилевский, А.Ф. Чудновский // *Инженерно-физический журнал*, – 1972. – Т.20. – № 5. – С.829 – 834.
24. Григорьев С. Н., Гурин А. М., Ковалев О. Б. Моделирование термокапиллярной конвекции расплава с дисперсной примесью при лазерном поверхностном упрочнении материалов // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2013. – Т. 35. – №. 7. – С. 965-980.
25. Филатов С. О., Володин В. И. Метод расчета и анализ совместной работы контура циркуляции грунтовых теплообменников и теплового насоса // *Труды БГТУ*. – 2013. – №. 3. – С. 161-165.
26. Aybar H. Ş. et al. A review of thermal conductivity models for nanofluids // *Heat Transfer Engineering*. – 2015. – Т. 36. – №. 13. – p. 1085-1110.
27. Kumar P. M. et al. Review on nanofluids theoretical thermal conductivity models // *Engineering Journal*. – 2015. – Т. 19. – №. 1. – p. 67–83.
28. Bekezhanova V. B., Shefer I. A. Microconvection in vertical channel at given heat flux // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2016. – Т. 754. – №. 2. – p. 022001.

29. Чейлытко, А.А. Влияние геометрических размеров вихревого аппарата на его аэродинамическое сопротивление / А.А. Чейлытко // Восточноевропейский журнал передовых технологий. – 2013. – №6/8 (66). – С. 45 – 49.

30. Павлюкевич, Н.В. Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах/ Н.В. Павлюкевич// Мн.:Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ. 2002. – 140 с. ISBN 985-6456-31-2

31. Терлецький Р. Ф., Турій О. П. Моделювання і дослідження теплопереносу у пластинах з тонкими покриттями за врахування впливу випромінювання //Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2015. – Т. 55. – №. 2. – С. 186-201.

32. Zhang C. et al. MHD flow and radiation heat transfer of nanofluids in porous media with variable surface heat flux and chemical reaction //Applied Mathematical Modelling. – 2015. – Т. 39. – №. 1. – p. 165-181.

33. Шаповал А. А., Панов Є. М., Стрельцова Ю. В. Закипання води на пористих поверхнях: експерименти та інженерні розрахунки //Вісник НТУУ" Київський політехнічний інститут". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2016. – №. 1. – С. 50-54.

34. Курницький Т. Л., Гачкевич О. Р. Температурне поле шару з волокнистого композитного матеріалу за умов дії зовнішнього теплового випромінювання //Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2016. – Т. 51. – №. 1. – С. 185-193.

35. Fugallo G. et al. Thermal conductivity of graphene and graphite: collective excitations and mean free paths //Nano letters. – 2014. – Т. 14. – №. 11. – p. 6109 – 6114.

36. Яковлева И.Г., Пазюк М.Ю., Мных А.С. Вплив умов формування сипучого шару залізородних та бокситових матеріалів на коефіцієнт тепловіддачі // Холодильна техніка та технологія. – 2017. – Т. 52. – №. 4.



37. Говорун, Т.П. Фізичні властивості і методи дослідження матеріалів: навчальний посібник / Т.П. Говорун, А.Ф. Будник / Суми: Сумський державний університет. – 2014. – 255 с.
38. Renteria J.D. et al. Strongly anisotropic thermal conductivity of free-standing reduced graphene oxide films annealed at high temperature // *Advanced Functional Materials*. – 2015. – Т. 25. – №. 29. – p. 4664–4672.
39. Jana, P., Fierro, V., Pizzi, A., Celzard, A. Thermal conductivity improvement of composite carbon foams based on tannin-based disordered carbon matrix and graphite fillers // *Materials & Design*. – 2015. – Т. 83. – p. 635-643.
40. Low, J.E., Loveridge, F. ., Powrie, W., Nicholson, D. A. Comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications // *Acta geotechnica*. – 2015. – Т. 10. – №. 2. – p. 209 – 218.
41. Бернштейн, Р.С. Исследование процессов горения натурального топлива – М.: Госэнергоиздат, 1948 – 570 с.
42. Старостин, Д.Ф. Отопление и вентиляция, №3,1935
43. Russel H.W. Principles of Heat Flow in Porous Insulators // *Journal of the American Ceramic Society*–1937–№18 1–5p.
44. Ribaud M. *Challur et industrie*, 1937. – № 2001. –Vol. 18. – p. 1–5
45. Некрасов, А.А., *Журнал технической теплофизики*, №2, – 1940
46. Богомолов, В.З. *Труды АФИ* – М: Сельхозгиз, 1941 – №3
47. Torkar, K. *Oster.Chem.Zt.* – 1952 – № 53 – 160 p.
48. Оделевский, В.И. Расчет обобщенной проводимости мости гетерогенных систем / В.И. Оделевский // *Журн. технич. Физики*. – 1951. – Т. 21, №6. – С. 667-677.
49. Спосіб одержання пористого гранульованого матеріалу на основі кремнезему : пат. 76027 Україна / А.О. Чейлитко, А.М. Павленко. – від 25.12.2012

50. Кіндзера, Д.П. Моделювання тепло-масообмінних процесів під час фільтраційного сушіння струганого березового шпону / Д. П. Кіндзера, В. М. Атаманюк, Б. М. Микичак, О. В. Уткіна // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2014. – № 787 : Хімія, технологія речовин та їх застосування. – С. 319–323.

51. Шиманський, В.М. Математичне моделювання неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування у середовищах з фрактальною структурою : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи / Володимир Михайлович Шиманський ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2016. – 193 с.

52. Соколовський, Я. Математичне моделювання просторового тепломасоперенесення в анізотропних капілярно-пористих матеріалах / Я. Соколовський, О. Герасимчук // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології : збірник наукових праць. – 2016. – № 843. – С. 316–324.

53. Collet F., Prétot S. Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content //Construction and building materials. – 2014. – Т. 65. – р. 612-619.

54. Bear J. Dynamics of fluids in porous media. – Courier Corporation, 2013. [електроний ресурс]. Режим доступу: [http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/31171747/195055535.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1485242354&Signature=y643E01BfPq47BKlEmElloM7pb8%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DDynamics\\_of\\_fluids\\_in\\_porous\\_media.pdf](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/31171747/195055535.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1485242354&Signature=y643E01BfPq47BKlEmElloM7pb8%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DDynamics_of_fluids_in_porous_media.pdf)

55. Глебов И.В. Математическая модель многократной пропитки пористых тел растворами полимеров / И.В.Глебов, В.Д.Котенко, В.А. Романенков //Наука и образование: научное издание МГТУ им. НЭ Баумана. – 2015. – №. 11. – с.238–252

56. Walker R., Pavia S. Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Т. 64. – р. 270–276.

57. Кремчеев Э.А., Нагорнов Д.О. Модель движения влаги при полевом обогащении торфа в толстом расстиле // *Записки Горного института*. – 2014. – Т. 209. – с.59–65

58. Павленко, А.М. Особливості формування пористої структури / А.М. Павленко, О.М. Сайко // *Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природоко- ристування : матер. І-го Міжнар. конгресу, 28-29 травня 2009 р. – Львів, 2009. – С. 46.*

59. Новиков, Д.В. и др. Закономерности упорядочения ламелей при формировании пористой структуры мембран из полипропилена // *Физика твердого тела*. – 2014. – Т. 56. – №. 2. – С. 390-398.

60. van Swaay, D. Microfluidic methods for forming liposomes. *Lab on a Chip*, 2013. – 13(5), – р. 752-767.

61. Чейлитко, А.О. Исследование формирования пор во вспучивающемся материале / Чейлитко А.О. // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2013. – № 13. – С.38–40

62. Косенко О.І., Кустовська А.Д. Дослідження закономірностей модифікування структури феросилікагелів // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – 2012. – №. 33. – С. 129-135.

63. Темкин М.И., Шварцман Л.А.. «Успехи химии», 1948, 17, вып. 2, 259–262

64. Павленко А.М. Вспучивание пористого кремнеземистого материала / Павленко А.М. , Чейлытко А.А., – Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 130 с

65. Pavlenko, A. The rate of formation pores in the material which swells. Anatoliy Pavlenko, Andriy Cheilytko // *Kazimierz Pułaski University of Technology*

and Humanities in Radom, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, ,  
p.31–37. ISBN 978–83–7351–454–6

66. Кешишян Т.Н., Бокуняева В.И. Сб. научных работ по стеклу. М.: 1950, с. 128–134

67. Тепломассообмен ММФ-2000 [Текст] / Массоперенос MIF-2000: IV Минский международный форум (22-26 мая 2000г.) / НАН Беларуси, АНК "Институт тепло- и массообмена им А.В.Лыкова.". - Минск, 2000. - Т. 8: Тепломассообмен в капиллярно- пористых телах / ред. Н. В. Павлюкевич [и др.]. - [Б. м.]: [б.и.], 2000. - 226 с. - ISBN 985-6456-11-8.

68. Freire–Gormaly M. The Pore Structure of Indiana Limestone and Pink Dolomite for the Modeling of Carbon Dioxide in Geologic Carbonate Rock Formations [Электронный ресурс] / Department of Mechanical and Industrial Engineering. – University of Toronto, 2013. – Режим доступа: [https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/42840/1/Freire–Gormaly\\_Marina\\_201311\\_MASc\\_thesis.pdf](https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/42840/1/Freire–Gormaly_Marina_201311_MASc_thesis.pdf)

69. Dincov D.D., Parrott K.A., Pericleous K.A. Heat and mass transfer in two-phase porous materials under intensive microwave heating [Электронный ресурс] / Journal of Food Engineering 65, 2004 – Режим доступа: <http://www.researchgate.net/publication/222658046>

70. Jung-Hye E., Young-Wook K., Santosh R. Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics: A review [Электронный ресурс] / Journal of Asian Ceramic Societies 1, 2013, p.220–242. – Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2187076413000523>

71. Мешков, А.В. Составы и технология получения пеностекла пониженной плотности на основе диатомитового сырья: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.17. 11 : дис. – 2013.

72. Дуплик, В.С. Гипсовые вяжущие из фосфогипса для связывания отходов пеностекла [Текст] / В.С. Дуплик, А.Н. Полевик, Я.Г. Вазиев // Хімія: наука і практика: збірник тез доповідей XI відкритого студентського науково-практичного семінару, м. Шостка, 19 березня 2014 р. / Відп. за вип. А.Г. Басов. - Суми: СумДУ, 2014. – С. 22-23.

73. Вакалова Т.В., Верещагин В.И. Получение высокоэффективного теплоизоляционного материала на основе диатомита путем низкотемпературного вспенивания //Техника и технология силикатов. – 2012. – с. 6-12.

74. Рудь, В.Д. (2016). Отримання пористих керамічних матеріалів на основі порошків сталі 18Х2Н4МА та сапоніту (Doctoral dissertation, Національний технічний університет).

75. Демидович Б.К. Пеностекло. – Минск: Наука и техника, 1975. – 247 с.

76. Галицков С.Я., Данилушкин А.И., Фадеев А.С. Моделирование вспучивания керамзита во вращающейся печи как объекта управления [электроний ресурс] // Вестник Самарского государственного технического университета, Серия «Технические науки», №2 (30) СамГТУ. - Самара, 2008. - С.160-168.

77. Крашенинников О.Н., Бастрыгина С.В., Журбенко А.Д. Способ получения вермикулита с пониженной температурой вспучивания //Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2006. – Т. 9. – №. 2. – с.344 – 346.

78. Ремизникова В.И., Спирина О.В. Влияние алюмонатриевых отходов гальванического производства на свойства аморфного кремнезема // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2006. – №. 1. – С. 42-44.

79. Середа, Б.П. Исследование влияния фазового состава Ni-Al сплавов на физикохимические свойства скелетных никелевых катализаторов / Б.П.

Середа, Г.Б. Кожемякин, К.В. Савела, Ю.А. Белоконь и др. // *Металлургия : сб. науч. трудов. - Запорожье : ЗГИА. - 2009. - № 20. - С.112-117.*

80. Piore L.S., Piore I.L. Production of expanded-clay aggregate for lightweight concrete from non-selfbloating clays // *Cement and concrete composites. - 2004. - Т. 26. - №. 6. - p. 639-643.*

81. Середа, Б.П. Теория строения жидкого, кристаллического и аморфного состояния вещества / Б. П. Середа. – Запорожье, 2003. – 179 с.

82. Pan X., Saddler J. N. Effect of replacing polyol by organosolv and kraft lignin on the property and structure of rigid polyurethane foam [Электронный ресурс] // *Biotechnology for biofuels. - 2013. - Т. 6. - №. 1. - p. 12.* Режим доступа: [https:// biotechnologyforbiofuels. biomedcentral.com/ articles/10.1186/1754-6834-6-12](https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/1754-6834-6-12)

83. Evans N.T. et al. Impact of surface porosity and topography on the mechanical behavior of high strength biomedical polymers // *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials. - 2016. - Т. 59. - p. 459-473.*

84. Chan Y.N., Peng G. F., Anson M. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures // *Cement and Concrete Composites. - 1999. - Т. 21. - №. 1. - p. 23-27.*

85. Komonen J., Penttala V. Effects of high temperature on the pore structure and strength of plain and polypropylene fiber reinforced cement pastes // *Fire technology. - 2003. - Т. 39. - №. 1. - p. 23-34.*

86. Петухова, Г.Н. Химизм производства стекла и пеностекла / Г. Н. Петухова, Р. С. Лукьянова, И. А. Шнып // *Новые материалы и технологии их обработки : IX Республиканская студенческая научно-техническая конференция, 23-25 апреля 2008 г. / пред. редкол. Н. И. Иваницкий. - Минск : УП «Технопарк БНТУ «Метолит», 2008. - С. 192-193.*

87. Beyersdorfer P. *Glasshuttenkunde. Leipzig, 1964, S. 333-337.*

88. König J., Petersen R.R., Yue Y. Fabrication of highly insulating foam glass made from CRT panel glass //Ceramics international. – 2015. – Т. 41. – №. 8. – p. 9793–9800.

89. Пшинько, А.Н. Решение вопросов энерго- и ресурсосбережения путем организации производства и технологии получения теплоизоляционного материала / А. Н. Пшинько, Н. В. Савицкий, С. А. Корецкая // Вестник Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. – Д.: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп., 2004. – № 4. – с. 200–202.

90. Одинцов, К.В., Чехлов М.К. Исследования по получению теплоизоляционных материалов на основе техногенного сырья //Сборник материалов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив-2015», посвященной 70-летию Великой Победы. – С. 54.

91. Будников П.П., Гинстлинг А.М.. Реакции в смесях твердых веществ. М., 1971.

92. Годовская, К.И. Технический анализ [Текст] : [учеб. пособие для хим.-технол. техникумов / К.И. Годовская, Л.В. Рябина, Г.Ю. Новик, М.М. Гернер]. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. школа, 1979. - 464 с.

93. Кешишян Т.Н., Бокуняева В.И.. Сб. научных работ по стеклу. М., 1950, с.128-134.

94. Bai, J., Yang, X., Xu, S., Jing, W., Yang, J. Preparation of foam glass from waste glass and fly ash //Materials Letters. – 2014. – Т. 136. – p. 52-54.

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

96. Варужанян А.А., Механизм вспучивания перлита (новая теория) //Неорганические материалы. – 2006. – Т. 42. – №. 9. – С. 1140-1146.

97. Масленникова Г.Н., Харитонов Ф.Я. Перспективы развития производства керамических материалов. // Стекло и керамика. 1992. № 8. С. 1418.

98. Павленко, А.М. Особенности теплообменных процессов в вихревом потоке с влажными дисперсными частицами / Павленко А.М., Чейлытко А.А. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №35. – С. 10 – 13.

99. Підкопай В.М., Ганжа А.М., Марченко Н.А. Математичне моделювання і ідентифікація фактичних теплових втрат через пошкоджену ізоляцію трубопроводів теплотрас //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2016. – №. 12. – С. 83-89.

100. Лыков, А.В. Теплообмен – М: Энергия, 1978 – 480с.

101. Андриянов Д.И., Амосов А.П., Самборук А.Р. Использование гранулирования в технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для получения пористого карбида титана //Вестн. Самарского гос. технич. ун-та. Сер. Техн. науки. – 2014. – №. 3. – С. 43.

102. Смолин, И.Ю. Численное моделирование механического поведения модельных хрупких пористых материалов на мезоуровне //Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2013. – №. 5 (25).

103. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zuev N.A. Hygroscopic Properties Of Seeds // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya. – 2015. – Т. 58. – №. 1.

104. Дульнев, Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов [Текст] / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. - Ленинград : Энергия, 1974. - 264 с.

105. Чейлытко, А.О. Комплексные показатели пористой структуры и их связь с теплофизическими характеристиками теплоизоляционных материалов / А.О. Чейлытко //



Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць.  
– Дніпро: Нова ідеологія. – 2016. – № 8 – с.184-192

106. Bentz D.P. Potential applications of phase change materials in concrete technology / Bentz D.P., Turpin R. // Cement and Concrete Composites. – 2007. – Т. 29. – №. 7. – p. 527-532.

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

108. Шпак, А.П. Кластерные и наноструктурные материалы. Т.3. Пористость как особое состояние самоорганизованной структуры в твердотельных материалах [Текст] // А.П. Шпак, П.Г. Черемской, Ю.А. Куницкий, О.В. Соболев // К.: ВД «Академперіодика», 2005. – 516 с. ISBN 966-360-029-2

109. Очеретний, В.П. Залежність теплотехнічних та фізико-механічних властивостей ніздрюватих бетонів від параметрів виготовлення / В.П. Очеретний, В.П. Ковальський, М.П. Машницький, А.В. Бондар // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2009. – Т. 7. – №. 2. – С. 34-39.

110. Дешко В.И., Карвацкий А.Я. Исследование теплообмена при кристаллизации фтористого кальция //Промышленная теплотехника. – 1988. – Т. 10. – №. 1. – С. 60-65.

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

112. Чейлытко, А.О. Зародження пор та їх вплив на властивості матеріалу / А.О. Чейлытко // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 5/1 (25). – С. 30–35 DOI: 10.15587/2312–8372.2015.48177

113. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980

114. Павленко, А.М. Экспериментальні дослідження впливу пористості на теплопровідність матеріалу / А.М. Павленко, І.Г. Яковлєва, А.О. Чейлитко, С.В. Ільїн // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія. – 2014. – № 6 – с.79-84 – Фахова.

115. Чейлытко, А.А. Математическая модель тепломассообмена вспучивающейся частицы в потоке / А.А. Чейлытко, А.М. Павленко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №44. – С. 52 – 54.

116. Pavlenko A.M., Koshlak H.V. (2015). Design of processes of thermal bloating of silicates, No 1, p.p. 118-122.

117. Bajare, D. Lightweight concrete with aggregates made by using industrial waste / D. Bajare, J. Kazjonovs, A. Korjakins // Journal of sustainable architecture and civil engineering. – 2013. – No. 4(5). – P. 67-73.

118. Bodnárová L., Hela R., Hubertová M., Nováková I. Behaviour of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete Exposed to High Temperatures: International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, Vol:8, – 2014. – No:12, – p.1205–1208.

119. Pavlenko, A. The rate of formation pores in the material which swells / A. Pavlenko, A. Cheylytko // 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.

120. 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).

121. Карклит А.К., Тихонова Л.А. Огнеупоры из высокоглиноземистого сырья //М: Металлургия. – 1974. – 152 с.

122. Cheylitko, A. Investigation of the process of pore formation based materials Hydrosilicates/ A. Cheylitko, A. Pavlenko // 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.

123. Cheylitko, A. A study of the rates of pore nucleation and pore growth in alumina-based thermal insulation materials / A. Cheylitko // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2016. – №8 (80). – С. 56 – 62.

124. Lopez-Pamies, O., Ponte Castaneda, P., I. Idiart, M. Effects of internal pore pressure on closed-cell elastomeric foams [Electronic resource] / International Journal of Solids and Structures, 2012. – Available at: [http://www.researchgate.net/publication/256733990\\_Effects\\_of\\_internal\\_pore\\_pressure\\_on\\_closed-cell\\_elastomeric\\_foams](http://www.researchgate.net/publication/256733990_Effects_of_internal_pore_pressure_on_closed-cell_elastomeric_foams)

125. Vesenjak, M., Öchsner, A., Ren, Z. Influence of pore gas in closed-cell cellular structures under dynamic loading [Electronic resource] / German LS-DYNA Forum. – Bamberg, 2005. – Available at: <https://www.dynamore.de/de/download/papers/forum04/new-methods/influence-of-pore-gas-in-closed-cell-cellular>

126. Aboudi, J. Micromechanics of Composite Materials: A Generalized Multiscale Analysis Approach [Text] / J. Aboudi, S. M. Arnold, B. A. Bednarczyk. – Elsevier, 2013. – 973 p.

127. Титлов А.С. Аналитические зависимости для расчета термодинамических параметров и теплофизических свойств водоаммиачного раствора / Е.А. Осадчук, А.С. Титлов // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. - 2011. - Вип. 39(1). - С. 178-182.

128. Вукалович, М.П. Термодинамика / М.П. Вукалович, И.И. Новиков // Москва: Машиностроение, 1972. – 672 с.

129. Павленко, А.М. Параметры газа агента-порообразователя внутри замкнутой сферической поры в состоянии равновесия / 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

130. 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).

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

132. Скрипов, В.П. / Спинодальный распад (Фазовый переход с участием неустойчивых состояний) / Скрипов В.П., Скрипов А.В. // Успехи физических наук. – 1979. – Т. 128, № 2. – с.193–231.

133. Гоцуленко, В.В. Формула для числа сочетаний с повторениями при ограничениях и её применение // Прикладная дискретная математика. – 2013. – №. 2 (20). – 71-77

134. Pavlenko, A. Study of the formation of gas-vapor in the liquid mixture / 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. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/75428>

135. Іваницький, Г.К. Тепломасообмін та гідродинаміка в парорідинних дисперсних середовищах. Теплофізичні основи дискретно-імпульсного введення енергії : автореф. дис. ... д-ра тех. наук : 05.14.06 / Іваницький Г.К. ; НАН України. – Київ, 2004. – 28 с.

136. Кулиниченко, В.Р. Основы математического моделирования динамики роста паровой фазы [электронное издание] <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/2224>

137. Долинский А.А., Павленко А.М., Басок Б.И. Теплофизические процессы в эмульсиях //К.: Наукова думка. – 2005. – 265с.

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

139. Nakajima H., Kim S. Y., Park J. S. Fabrication of porous aluminium with directional pores through thermal decomposition method //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2009. – Т. 165. – №. 1. – p. 012063.

140. Joseph M. Capus, Metal Powders: A Global Survey of Production, Applications and Markets, Metal Powder Industries Federation (MPIF), 3rd edition, 2000.

141. Meller Alexandre De. Produit Métallique Pour L'obtention D'objets Laminés, Moulés Ou Autres, Et Procédés Pour Sa Fabrication, 1926. French Patent 615.147.

142. Sami Franssila. Introduction to Microfabrication / John Wiley & Sons. 2004. 391p. ISBN 0-470-85106-6

143. Donald M. Mattox, Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control, 1998, pp. 127-135 and 343-364, Noyes Publications, Westwood, New Jersey, U.S.A.

144. Tian Jian Lu, Carlos G. Levi, Haydn N. G. Wadley, Anthony G. Evans. Distributed porosity as a control parameter for oxide thermal barriers made by physical vapor deposition / Journal of the American Ceramic Society. 2001, Vol. 84, No. 12, 2937-2946 p.

145. Ашкрофт, Н. Физика твердого тела. Т.1 [Текст] / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М. : Мир, 1979. – 392 с.

146. 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.

147. Чейлытко, А.А. Определение коэффициента теплопроводности пористых металлических изделий / А.А. Чейлытко, М.А. Носов // Научный вестник. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком» – 2014. – №1. – С. 111 – 118.

148. 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.

149. Дешко В.І., Шовкалюк М.М., Лохманець Ю.В, Куран Ю.Р. Числове моделювання як метод дослідження теплових режимів приміщень // Нова тема. – №4. – 2008. – С. 26-30.

150. Дешко, В.І. Влияние режимных параметров отопления при улучшении тепловой защиты зданий / В.И. Дешко, М.М. Шовкалюк, А.В. Ленькин // Промышленная теплотехника. — 2009. — Т. 31, № 7. — С. 84-85.

151. Чейлитко, А.О. Дослідження впливу форми пор на тепловий опір пористих теплоізоляційних матеріалів/ А.О. Чейлитко, А.А. Чейлитко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2016. – № 3– С. 3 – 9

152. Юркевич, А.А. Теплоперенос в замкнутых воздушных полостях строительных материалов и изделий / А.А. Юркевич // Международный научно-исследовательский журнал №8 (15) Часть 2. Екатеринбург: ООО «Европринт». – 2013. – с.78–83

153. Maziar Dehghan , M.S. Valipour , Amir Keshmiri, S. Saedodin , Nima Shokri. On the thermally developing forced convection through a porous material under the local thermal non-equilibrium condition: An analytical study. International Journal of Heat and Mass Transfer 92 (2016) p. 815–823.

154. Чейлытко, А.А. Исследование формирования пор во вспучивающемся материале / А.А. Чейлытко // Технологический аудит и резервы производства «Наукові підсумки 2013 р.»: Матеріали міжнар. наук.–практ. конф.(Харьков, 2013). – Х.: Технологический центр – 2013. – №4 (13). – С. 38 – 40.

155. Pavlenko A.M., Koshlak N.V., Usenko V.O. The processes of heat and mass exchange in the vortex devices //Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – №. 3. – С. 55-59.

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

157. Корепанов, Е.В. Расчет коэффициента конвекции в воздушных полостях штучных строительных изделий / Е.В. Корепанов, В.Н. Диденко // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности. Материалы Четвертой Российской научно-технической конференции, Ульяновск, 24-25 апреля 2003, – с. 243-245

158. Шатунов, Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. М.: Энергия, – 1973. – 144 с.

159. Денисова Э.И., Шак А.В. Измерение теплопроводности на измерителе ИТ-λ-400 // Екатеринбург ГОУ ВПО УГТУ – УПИ. – 2005. – 35 с.

160. Жметко Д.М., Леміш П.В.. Фізичні методи дослідження. Практикум для студентів фізичного факультету. Запоріжжя: ЗНУ, 2008. – 77с.

161. Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. Физика твердого тела для инженеров //М.: Техносфера. – 2007.

162. Мизюряев, С.А. Теплоизоляционный пористый материал / Мизюряев С. А., Царева А. Н., Нечаева Н. Н., Юмангулова А. Ю. // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии. – Самара:

Самарский государственный архитектурно-строительный университет, - 2016, – с.102-106

163. Чейлитко, А.О. Дослідження можливості зміни коефіцієнту теплопровідності металів шляхом зміни розмірів та розташування пор / А.О. Чейлитко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2016. – № 2– С. 82 – 89

164. Hassan, S.A. Effective thermal conductivity of multiple-phase transversely isotropic material having coupled thermal system / S.A. Hassan, A. Israr, H.M. Ali, W.Asalam // Advanced Materials and Structural Engineering: Proceedings of the International Conference on Advanced Materials and Engineering Structural Technology, April 25–26, 2015, Qingdao, China, – P.237–241

165. Pian, G. Porosity and pore size distribution influence on thermal conductivity of yttria-stabilized zirconia: Experimental findings and model predictions / G. Pian , L. Casnedi, U. Sanna // Ceramics International 42 (2016) p.5802–5809.

166. Tarasov, V. E. Heat transfer in fractal materials [Electronic resource] / V. E. Tarasov // International Journal of Heat and Mass Transfer 93, – 2016. – p.427–430. Available at:

[https://www.researchgate.net/profile/Vasily\\_Tarasov/publication/283665709\\_Heat\\_transfer\\_in\\_fractal\\_materials/links/5643000408aebaaea1f95838.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vasily_Tarasov/publication/283665709_Heat_transfer_in_fractal_materials/links/5643000408aebaaea1f95838.pdf)

167. Li, Y. Calculation of equivalent thermal conductivity of Gasar porous materials / Yong-jin Li, Yang Wang // International Conference on Electric Information and Control Engineering; Wuhan – 15–17 April 2011 , p. 4034 – 4037 <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5777111>

168. Pabst, W. Conductivity of porous materials with spheroidal pores / W. Pabst, E. Gregorová // Journal of the European Ceramic Society. Volume 34, Issue 11, September 2014, p. 2757–2766

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



170. Deshko, V.I. Praktychnyi posibnyk z enerhozberezhennia dlia obiektiv promyslovosti, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy [Practical manual for energy saving for industrial objects, constructing and house holding of Ukraine] / V.I. Deshko, A. V. Prakhovnyk, V. V. Prokopenko // Luhansk, Misiachne siaivo Publ. – 2009. – 696 p.

171. Ганжа, А.М. Обґрунтування варіантів реконструкції системи теплопостачання житлового масиву з використанням математичного моделювання теплових втрат при транспортуванні теплоносія / А.М. Ганжа, Н. А. Марченко, В.М. Підкопай // Вісник національного технічного університету «ХПІ» Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2013 р. – №13(987). – с.104-109

172. Владимиров, В.С. Новое поколение тепло- защитных и огнеупорных материалов. Часть II / В.С. Владимиров, И.А. Карпухин, С.Е. Мойзис // Новые огнеупоры. – №33. – 2002. – с. 81-88.

173. Капустин Р.Д., Первухин Л. Б., Мойзис С. Е. Экспериментально-теоретическое исследование процессов термохимического синтеза муллитовых структур в огнеупорном покрытии на основе материала марки м-1 // Ползуновский вестник. – 2009. – №. 1-2. – С. 267-272.

174. de la Fuente A. et al. Sustainability based-approach to determine the concrete type and reinforcement configuration of TBM tunnels linings. Case study: Extension line to Barcelona Airport T1 //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2017. – Т. 61. – p. 179-188.

175. Lian T. W. et al. Rapid thermal conductivity measurement of porous thermal insulation material by laser flash method //Advanced Powder Technology. – 2016. – Т. 27. – №. 3. – p. 882-885.

176. Marangoni M. et al. White sintered glass-ceramic tiles with improved thermal insulation properties for building applications //Journal of the European Ceramic Society. – 2017. – Т. 37. – №. 3. – p. 1117-1125.

177. Jackson G.R., Fisher T.S. Response of Phase-Change-Material-Filled Porous Foams Under Transient Heating Conditions // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 2016. – Т. 30. – №. 4. – p. 880-889.

178. Зоценко, М.Л. Грунтоцемент–конструктивний і гідроізоляційний матеріал при будівництві підземних споруд //Будівельні конструкції. – 2016. – №. 83 (2). – p. 296-316.

179. Newby P.J. Porous Silicon as a Material for Thermal Insulation in MEMS //Porous Silicon: From Formation to Application: Biomedical and Sensor Applications, Volume Two: Biomedical and Sensor Applications. – 2016. – p. 167.

180. Чейлытко, А.А. Пути создания экологически чистых пористых теплоизоляционных материалов / 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.

181. Смирнов, А.Н. Перспективы развития рынка огнеупоров для сталеплавильного комплекса Украины //Металл и литье Украины. – 2010. – С.1 – 8

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

183. Павленко, А.М. Особенности процесса порообразования в вспучивающихся материалах на основе глинозема / А.М. Павленко, А.А. Чейлытко, М.А. Носов // Современное общество, образование и наука: сборник научных трудов по материалам Междунар. науч.–практ. конф. (Тамбов, 30 июня 2014) в 9 т. Т. 4. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком». – 2014. – С. 114 – 116.

184. Павленко, А.М. Уменьшение неоднородности при структурообразовании пористого материала как фактор улучшения

теплофизических характеристик теплоизоляции / А.М. Павленко, А.А. Чейлытко, А.В. Кошлак // 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.

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

186. Малышев, И.П. Прогрессивные направления в производстве огнеупоров для металлургов Украины и стран СНГ [Текст] / И.П. Малышев, Н. А. Трошенков // Новые огнеупоры. — 2004. — № 11. — С. 69–71.

187. Кашеев, И.Д. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок. Кн. 1. Производство огнеупоров. Справочное издание: В двух книгах. — М.: Интернет Инжиниринг, 2000. — 663 с.

188. Демидов, Р.В. Экспериментальное исследование процессов обжига и изоморфизм в керамических материалах / Р.В. Демидов, И.В. Ковков, Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов // Башкирский химический журнал. – Уфа: 2006. – Том 13, №5. – с.30–31.

189. Павленко, А.М. Исследование процессов термического вспучивания гидросиликатов / А.М. Павленко, А.А. Чейлытко, А.В. Кошлак // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент : Материалы 8-й междунар. науч. конф. посвященной 40-летию КарГУ имени академика Е.А. Букетова. (Казахстан, Караганда 18–20 июня 2012) – Караганды. – 2012. – С.550-555.

190. Лысенков, А.С. Спекание керамики из нитрида кремния в режиме СВС / Лысенков А.С., Каргин Ю.Ф., Захаров А.И., Колесникова С.М., Попова Н.А., Боровинская И.П., Закоржевский В.В. // Успехи в химии и химической

технологии. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. - Выпуск № 7 (87) / том 22. - 2008. – с.86-88.

191. Панов Е.Н., Кононов М.П., Богомолов А.Н., Каравайный А.А., Васильченко Г.Н. Тепловые характеристики изделий для футеровки и теплоизоляции алюминиевых электролизеров// Новые огнеупоры. – 2004

192. Lebedenko I. I. et al. Dental crowns made from a titanium alloy prepared by a superplastic molding method //Stomatologija. – 2000. – Т. 79. – №. 4. – р. 50.

193. Лукашевич, О.Д. Экологические проблемы обработки и утилизации осадков сточных вод / О.Д. Лукашевич, И.В. Барская // Экология промышленного производства. – 2007. – Вып. 3. – С. 68–75.

194. Суханов, А.М. Использование промышленных отходов в строительстве / А.М. Суханов // Современное состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса. Материалы международной научно-практической конференции. - Курган : Курганская ГСХА. – 2016. – 27–28 апреля. – С. 386-388.

195. Hubertová, M. Durability of lightweight expanded clay aggregate concrete / M. Hubertová, R. Hela // Concrete and concrete structures 2013 - 6th International conference, Slovakia. – Vol. 65. – 2013. – P. 2–6.

196. Sereda, B. The retrieving of heat-resistant alloys on intermetallic base for details of gas turbine engine hot track in SHS conditions / B. Sereda, A. Zhrebtsov, I. Kruglyak, Y. Belokon', K. Savela, D. Sereda // Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2010, MS and T'10. – 2010. – Vol. 3. – P. 2097–2102.

197. Bogas, J.A. Microstructural analysis of iberian expanded clay aggregates / J. A. Bogas, A. Mauricio, M.F.C. Pereira // Microscopy and Microanalysis. – 2012. – Vol. 18. – Issue 5. – P. 1190– 1208.

198. Joosep, R. Moisture and thermal conductivity of lightweight block walls / R. Joosep // 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies. – 2015. – Vol. 96. – P. 1-9.

199. Boudaghpour, S. A study on light expanded clay aggregate (LECA) in a geotechnical view and its application on greenhouse and greenroof cultivation / S. Boudaghpour, Sh. Hashemi // *International journal of geology*. – 2008. – Vol. 2. – Issue 4. – P. 59– 63.
200. Turki Khafaji, S.K. Synthesis of light expanded clay aggregates from Iraqi raw materials / S. K. Turki Khafaji, E. A. Al-Majed // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. – 2016. – Vol. 7. – Issue 4. – P. 690– 696.
201. Sivakumar, S. Influence of fly ash, bottom ash, and light expanded clay aggregate on concrete / S. Sivakumar, B. Kameshwari // *Hindawi Publishing Corporation. Advances in Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 2015. – Article ID 849274. – 9 pages.
202. Vaickelionis, G. Production of expanded clay pellets by using non-selfbloating clay, lakes sapropel and glycerol / G. Vaickelionis, A. Kantautas, D. Vaičiukynienė // *Materials science (Medžiagotyra)* . – 2011. – Vol. 17. – No. 3. – P. 314– 321.
203. Дешко, В.І. Розробка нестационарної моделі теплового стану огорожень будівлі [Текст] / В.І. Дешко, М.М. Шовкалюк// *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*. — 2009. — №4. — С.218-225.
204. Чейлитко, А.О. Розробка теоретичних та технологічних основ теплової обробки вологих дисперсних матеріалів у вихрових апаратах: дис. ... кандидата техн. наук : 05.14.06 / Чейлитко Андрій Олександрович. – Х. 2011.
205. Снежкин Ю.Ф., Дабижа Н.А. Исследование адсорбционных характеристик коллоидных капиллярно-пористых материалов с целью определения режимов сушки // *Промышленная теплотехника*. – 2000. – Т. 22. – №. 3. – С. 26-29.
206. Чейлитко, А.О. Вплив форми включень графіту в чавуні на його теплофізичні властивості / 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. – Дніпропетровськ. – 2013. – С. 175.

207. Ганжа А.М., Марченко Н.А., Підкопай В.М. Обґрунтування варіантів реконструкції системи теплопостачання житлового масиву з використанням математичного моделювання теплових втрат при транспортуванні теплоносія. – 2013. – с.104-109

208. Дешко В.І., Шевченко О.М. Структурний аналіз енергоспоживання й енергозбереження в галузі освіти //Наукові вісті НТУУ «КПІ. – 2011. – №. 6. – С. 139-147

209. Маляренко, В.А. Потенциал интеграции когенерационных систем в малую энергетику Украины / Маляренко, В.А., Шубенко, А.Л., Сенецкий, А.В., Темнохуд, И.А. // Інтегровані технології та енергозбереження, №4 – 2012. – с.11-18

210. Безродний М.К., Притула Н.О. Термодинамічна ефективність теплонасосних схем теплопостачання //Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – №. 3. – С. 39-45.

211. Губинский М.В., Затопляев Г.М., Радченко Р.Ю. Исследование теплофизических свойств керамического жидкого теплоизоляционного покрытия // Техшчна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць. – Вип. 3 – 2011. – Т. 3.

212. Guler U. Refractory plasmonics / U. Guler, A. Boltasseva, V. Shalaev M. //Science. – 2014. – Т. 344. – №. 6181. – p. 263-264.

213. Shimizu T. etal. Thermal conductivity of high porosity alumina refractory bricks made by a slurry gelation and foaming method //Journal of the European ceramic Society. – 2013. – Т. 33. – №. 15. – p. 3429-3435.

214. Han Y. Porous anorthite ceramics with ultra-low thermal conductivity / Han, Y., Li, C., Bian, C., Li, S., Wang, C. A. //Journal of the European Ceramic Society. – 2013. – Т. 33. – №. 13. – С. 2573-2578.

215. Krupa V.S. Study on Strength & Durability of Concrete by Partial Replacement of Fine & Coarse Aggregates using Marble, Granite & Spent Fire Brick Waste. / Krupa V.S., Ratnam M., Sarma V.V.S. // IJSRSET, –Vol.1, – 2015. - p. 135– 139

216. Li C. Mullite whisker reinforced porous anorthite ceramics with low thermal conductivity and high strength / Li, C., Bian, C., Han, Y., Wang, C. A., & An, L. //Journal of the European Ceramic Society. – 2016. – Т. 36. – №. 3. – p. 761-765.

217. Онопрієнко В.В., Захарченко П.В. Вплив кремнеземистого компоненту на формування споживчих властивостей силікатної цегли //Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2016. – №. 3 (78). – С. 164-171.

218. Назаренко, И.А. Влияние температуры пека на выходе из внешнего подогревателя на расход циркулирующего высокотемпературного пека и время нагрева [Текст] / И.А. Назаренко, И.Г. Яковлева // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2013. - № 5. - с. 100-102.

219. Гузман, И.Я. Химическая технология керамики. — М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2003. — 496 с.

220. Ковков И.В. Экспериментальное исследование физико-химических процессов при обжиге композиционных керамических материалов / И.В. Ковков, В.З. Абдрахимов, Д.Ю. Денисов, Е.С. Абдрахимова // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50. – №. 9. – С. 58-62.

221. Sutcu M. Production of anorthite refractory insulating firebrick from mixtures of clay and recycled paper waste with sawdust addition / Sutcu, M., Akkurt, S., Bayram, A., Uluca, U. //Ceramics International. – 2012. – Т. 38. – №. 2. – p. 1033-1041.

222. Хлыстов А.И., Божко А.В., Соколова С.В., Рязов Р.Т. Получение эффективных огнеупорных футеровочных материалов на основе отходов

производства // Успехи современного естествознания. Материалы научных конференций с международным участием, Египет:Хургада, – №2, – 2004. – с. 131-133.

223. Majchrowicz I., Barański J. Rozwój technologii wytwarzania betonów ogniotrwałych //Materiały Ceramiczne. – 2002. – Т. 54. – р. 144-150.

224. Мойзис С. Е. Владимиров, В., Фокин, В., Платонов, Ю. Использование новых огнеупорных СВС материалов и покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами в металлургических и литейных производствах // Черные металлы. – 2006. – №. 3. – с. 57-61.

225. Соломатов, В.И. Строительное материаловедение на рубеже веков: ретроспектива двадцатого века, прогноз приоритетных направлений [Текст] /В.И. Соломатов //Современные проблемы строительного материаловедения: Матер. Пярых Академических чтений РААСН. – С.5-12.

226. Жаростойкие бетоны [Текст] / Под ред. К.Д. Некрасова.- М.: Стройиздат, 1974.-176 с. (Госстрой СССР, науч.-исслед. ин-т бетона и железобетона).

227. Antonovič V. et al. A review of the possible applications of nanotechnology in refractory concrete //Journal of civil engineering and management. – 2010. – Т. 16. – №. 4. – р. 595– 602.

228. Höfler J. et al. (S)-Ketamine in Refractory and Super-Refractory Status Epilepticus: A Retrospective Study //CNS drugs. – 2016. – Т. 30. – №. 9. – р. 869 – 876

229. US 5628940 A, Eric L. Allison. Process for applying low-cement castable refractory material

230. Sang-Yeop Chung. Evaluation of effect of glass beads on thermal conductivity of insulating concrete using micro CT images and probability functions / Sang-Yeop Chung, Tong-Seok Han, Jang-Ho Jay Kim, Kwangsoo Youm // Cement and Concrete Composites 65 – 2016. – р.150 – 162.



231. US5512523 A, Yasushi Ono, Satoshi Sakamoto, Yutaka Murata, Tetsuo Kaji, Yasuhiko Endo. Monolithic refractory powder mixture. 30.04.1996

232. Ершов М.Ю., Лепешкин И.А. Вспененный алюминий в автомобилестроении // Автомобильная промышленность, 2010. – № 10. – с. 36 – 39.

233. Komissarchuk O., Xu Z., Hao H. Pore structure and mechanical properties of directionally solidified porous aluminum alloys: China Foundry, 11 (1), – 2014. – p.1–7

234. Wang Z. et al. Highly porous open cellular TiAl-based intermetallics fabricated by thermal explosion with space holder process //Intermetallics. – 2016. – Т. 68. – p. 95-100.

235. Крушенко, Г.Г. Получение и применение пористых металлических материалов в технике [Текст] / Г. Г. Крушенко // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – Технологические процессы и материалы. – 2012. – С. 181-184.

236. Banhart, J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams [Text] / J. Banhart // Progress in Materials Science. – 2001. - Vol. 46. - p. 559-632.

237. Titlow, A. Studies on corrosion resistance of coatings formed by plasma electrolytic oxidation on aluminum alloys / Kuznetsov, Titlow, A., Y., Kosenko, A., Lugovskoy, A., Kazansky, B. // Proceedings of the Tenth Bi-National Israeli Workshop «The optimization of the composition, structure and properties of metals oxides, composites, nano and amorphous materials. – 2011. – p. 297– 303

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

239. Zhao X., Liu S., Riffat S. B. Comparative study of heat and mass exchanging materials for indirect evaporative cooling systems //Building and Environment. – 2008. – Т. 43. – №. 11. – С. 1902-1911.

240. Bednářová, V. Cast cellular metals with regular and irregular structures [Text] / V. Bednářová, P. Lichý, T. Elbel, A. Hanus. - Materialiintehnologije. – 2014. – Vol. 48. – p. 175– 179.

241. Шаповалов, В.И. Газоармированные материалы (газары) – 30-летний путь проблем и прогресса [Текст] / В.И. Шаповалов // Металл и литье Украины. – 2011. – № 3(214). – С. 3– 10.

242. Simančík, Fr. Metallic foams – ultra light materials for structural applications [Text] / Fr. // Simančík Inżynieria Materiałowa. – 2001. – Vol.5. – p. 823– 828.

243. Kennedy A., Porous metals and metal foams made from powders, powder metallurgy [Электронная версия]. In Tech. Powder Metallurgy 2012. – p. 31– 46. - ISBN: 978-953-51-0071-3. Available from: <http://www.intechopen.com/books/powder-metallurgy/the-manufacture-of-porous-and-cellular-metals-by-powder-metallurgy-processes>. — Выборка: 09.12.2016.

244. Pavlenko, A.M. Research of effective thermal conductivity and its parts in porous metallic materials with different parameters of porosity / 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.

245. Nakajima, H. Porous Metals with Directional Pores [Text] / H. Nakajima. - 2013. - 284 p. DOI 10.1007/978-4-431-54017-5\_7.

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

247. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст] / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. - М. : Мир, 1977. – 552 с.

248. Бельков, В.И. Автоматическое проектирование технических систем [Текст] / В. И. Бельков, В. Л. Ланшаков – М. : Академия Естествознания, 2009. – 143 с. – ISBN 978-5-91327-0566.

249. Генбач А.А., Гратченко Ю.А. Система охлаждения теплонагруженного элемента – детонационного горелочного устройства. Экспериментальные исследования // Вестник КазНТУ, Алматы, 2007. – №5(62), – с. 93 – 96.

250. Анатичук Л.И. и др. Термоэлектрический генератор для питания маломощной электронной аппаратуры газораспределительных станций //Наука та інновації. 2009. – Т. 5., – № 5. – с. 34 – 41.

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

252. Sandwich panels. General Product Information [електроний ресурс] / ROCKWOOL Asia – 2013. – 2 р. Режим доступу: <http://www.rockwoolasia.com/products+and+solutions/u/2011.construction/9890/External+walls/Sandwich+panels>

253. Ma, X. Structural performance of composite panels filled with light-weight crumb rubber concrete / X. Ma, J.E. Mills // 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials. Byron Bay, Australia, – 2014. – P. 669-674.

254. Wang, R. Polymer Matrix Composites and Technology / R. Wang, S. Zheng, Y. George Zheng // A volume in Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. – 2011. – 549 p. ISBN: 978-0-85709-221-2

255. Yanjun, Yu. The research and development of heat insulation materials with low thermal-conductivity in high temperature. / Yu Yanjun // International Conference on Materials, Environmental and Biological Engineering. – 2015. – P. 868-871.

256. Fesmire, J.E. Layered composite thermal insulation system for nonvacuum cryogenic applications / J.E. Fesmire // 2015 Space Cryogenics Workshop. – 2015. – Vol. 74. – P. 154-165.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.10.008>

257. La Rosa, A.D. Environmental impacts and thermal insulation performance of innovative composite solutions for building applications / A.D. La Rosa, A. Recca, A. Gagliano, J. Summerscales, A. Latteri, G. Cozzo, G. Cicala // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 55. – P. 406-414.

258. Volfkovich, Y. Structural properties of porous materials and powders used in different fields of science and technology / Y. Volfkovich, A. Filippov, V. Bagotsky // Springer-Verlag London. – 2014. – 328 p. DOI 10.1007/978-1-4471-6377-0

259. Mei Liu, H. Research Progress of Composite Thermal Insulation Wall in Hot Summer and Cold Winter Zone of China / H. Mei Liu, Ch. Qun Wu, Y. Bin Xu, A. Dong Zhu // Advanced Materials Research. – 2014. – Vols. 919-921. – P. 1725-1729. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.919-921.1725

260. Rasky, D. J. Flexible ceramic-metal insulation composite and method of making. / D. J. Rasky, P. M. Sawko, P. Kolodziej, D. A. Kourtides // Patent US5744252. – 28.04.1998.

261. Li Chou H Li Chou H. Metallized Coatings On Ceramics For High-temperature Uses. // US 5000986. – 19.03.1993.

262. 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.

263. Басок Б.И., Гоцуленко В.В. Отрицательное тепловое сопротивление в одномерном установившемся течении совершенного невязкого газа //ТРУДЫ МФТИ – 2014. – Т. 6. – №. 4. – С. 153-157

264. Трифонова Т.А., Шеремет М.А. Сравнительный анализ моделей Дарси и Бринкмана при исследовании нестационарных режимов сопряженной естественной конвекции в пористой цилиндрической области //Компьютерные исследования и моделирование. – 2013. – Т. 5. – №. 4. – С. 623-634

265. Hanspal N.S., Waghode A.N., Nassehi V., Wakeman R.J.. Development of a predictive mathematical model for coupled stokes/Darcy flows in cross-flow membrane filtration / Chemical Engineering Journal. – 2008. – 11p. doi:10.1016/j.cej.2008.10.012

266. Ehrhardt M., Fuhrmann J., Holzbecher E., Linke A. Mathematical modeling of channel-porous layer interfaces in PEM fuel cells / Berlin, Germany. 2008. – 8p. ISSN 0946-8633

267. Brinkman, H.C., 1948, A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles, Appl. Sci. Res. A, pp. 27-34

268. Nield D. A., Bejan A. Heat transfer through a porous medium //Convection in Porous Media. – Springer New York, 2013. – С. 31-46.

269. Беляев, Н.М. Методы теории теплопроводности : Учебное пособие для вузов : в 2 частях. / Беляев Н.М., Рядно А.А. – М. : Высш.школа, 1982 – Ч.1. – 327 с.

270. Осипова, В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена [Текст] : [учеб. пособие для теплоэнерг. спец. вузов] / В.А. Осипова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергия, 1979. - 319 с.

271. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов. Справочник. М.: ФИЗМАТГИЗ., 1962.- 247 с.

272. Saito R.M. et al. Monitoring the electroosmotic flow in capillary electrophoresis using contactless conductivity detection and thermal marks //Analytical chemistry. – 2007. – Т. 79. – №. 1. – p. 215-223

273. Ediger M.D., Hebert K. A molecular perspective on the yield and flow of polymer glasses: The role of enhanced segmental dynamics during active deformation // *Polymer Glasses*. – CRC Press, 2016. – p. 357-374.

274. Тітлов, О.С. Математичне моделювання енергетично ефективних режимів управління універсальними абсорбційними низькотемпературними камерами / О.С. Тітлов, Г.М. Редунов, Д.П. Гожелов, Н.Є. Озолін // *Холодильна техніка та технологія*. – 2015. – Т. 51. – №. 4.

275. Титлова, О.А. Энергоэффективное управление абсорбционными холодильниками : монография / В.А. Хобин, О.А. Титлова. - Одесса: Гринь Д.С., 2014. - 214 с.

276. Deshko V.I., Karvatskii A.Y., Sukhodub I.O. Heat and mass transfer in cross-flow air-to-air membrane heat exchanger in heating mode // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Т. 100. – p. 133-145

277. Снежкин Ю.Ф., Дабижа Н.А. Исследование адсорбционных характеристик коллоидных капиллярно-пористых материалов с целью определения режимов сушки // *Промышленная теплотехника*. – 2000. – Т. 22. – №. 3. – С. 26-29.

278. Deshko, V.I. Thermophysical and optical properties of fluoride crystals and melts / Deshko V.I. Varlamov G.B., Vasil'chenko G.N., Karvatskii A., Khlebnikov, O.E // *High Temperatures. High Pressures*. – 1989. – Т. 21. – №. 6. – С. 647-656.

## ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості  
про апробації результатів дисертації

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІ

**Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:**

1. Чейлытко, А.А. Управление теплофизическими характеристиками пористого теплоизоляционного материала [Текст]/ А.А. Чейлытко // *Металлургическая теплотехника*. – 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 // *Восточноевропейский 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. Чейлытко, 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. р. 81 – 84. (Міжнародне видання, Biblioteka Narodowa)

9. Чейлытко, А.О. Зародження пор та їх вплив на властивості матеріалу [Текст] / А.О. Чейлытко // Технологический аудит и резервы 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. Cheylyitko // 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. – р. 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. Cheilytko, A. A study of the rates of pore nucleation and pore growth in alumina-based thermal insulation materials [Текст] / A. Cheilytko // 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. Яковлева, 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

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

33. Жеманюк П.Д. Исследования кинетики образования интерметаллидных  $\gamma$ -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).

34. Павленко, А.М. Вспучивание пористого кремнеземистого материала [Текст] / А.М. Павленко, А.А. Чейлытко // монографія 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 [Текст]: монографія / А. О. Чейлытко. — Дніпро: ПП «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. Чейлытко. — Запоріжжя: ЗДІА, 2017. — 318 с. ISBN 978–617–7120–11–6

#### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

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. Чейлытко, А.О. Вплив форми включень графіту в чавуні на його теплофізичні властивості [Текст] / А.О. Чейлытко, 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 вспучивающемся 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. Особенности процесса порообразования в материалах, які спучуються на основі глинозему [Текст] / А.О. Чейлытко, 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 научных 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 Zagadnienia 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 «ХПИ». – 2016. – с.10

**Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

**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.

## **ДОДАТОК Б**

Змішаний композиційний план другого та третього порядку з результатами експериментів



Таблиця 1

Змішаний композиційний план другого та третього порядку з результатами експериментів

№ експерименту	X1	X2	X3	X4	X5	Y
1	2	3	4	5	6	7
1	-1	-1	-1	-1	-1	0,0365
2	-1	-1	-1	0	1	0,0369
3	-1	-1	-1	1	0	0,0369
4	-1	-1	0	-1	1	0,0369
5	-1	-1	0	0	0	0,0369
6	-1	-1	0	1	-1	0,0366
7	-1	-1	1	-1	0	0,0369
8	-1	-1	1	0	-1	0,0366
9	-1	-1	1	1	1	0,0357
10	-1	1	-1	-1	0	0,0256
11	-1	1	-1	-1	1	0,0569
12	-1	1	-1	0	-1	0,0243
13	-1	1	-1	0	0	0,0257
14	-1	1	-1	1	-1	0,0243
15	-1	1	-1	1	1	0,0570
16	-1	1	0	-1	-1	0,0243
17	-1	1	0	-1	0	0,0256
18	-1	1	0	0	-1	0,0243
19	-1	1	0	0	1	0,0570
20	-1	1	0	1	0	0,0256
21	-1	1	0	1	1	0,0570
22	-1	1	1	-1	-1	0,0243
23	-1	1	1	-1	1	0,0569
24	-1	1	1	0	0	0,0256
25	-1	1	1	0	1	0,0570
26	-1	1	1	1	-1	0,0243
27	-1	1	1	1	0	0,0256
28	1	-1	-1	-1	0	0,1272
29	1	-1	-1	-1	1	0,0349
30	1	-1	-1	0	-1	0,2184
31	1	-1	-1	0	0	0,1285
32	1	-1	-1	1	-1	0,2196
33	1	-1	-1	1	1	0,0355

продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7
34	1	-1	0	-1	-1	0,0243
35	1	-1	0	-1	0	0,0462
36	1	-1	0	0	-1	0,0243
37	1	-1	0	0	1	0,0351
38	1	-1	0	1	0	0,0475
39	1	-1	0	1	1	0,0371
40	1	-1	1	-1	-1	0,0141
41	1	-1	1	-1	1	0,0389
42	1	-1	1	0	0	0,1385
43	1	-1	1	0	1	0,0389
44	1	-1	1	1	-1	0,0270
45	1	-1	1	1	0	0,0395
46	1	1	-1	-1	-1	0,0362
47	1	1	-1	0	1	0,0422
48	1	1	-1	1	0	0,0402
49	1	1	0	-1	1	0,0421
50	1	1	0	0	0	0,0402
51	1	1	0	1	-1	0,0363
52	1	1	1	-1	0	0,0446
53	1	1	1	0	-1	0,0363
54	1	1	1	1	1	0,0469

**ДОДАТОК В**  
Акти впровадження

УТВЕРЖДАЮ:  
Технический директор  
АО «Мотор Сич»



### АКТ

об использовании результатов диссертационной работы  
к.т.н. Чейлытко Андрея Александровича

В период 2012 года Чейлытко А.А. выполняет исследования связанные с совершенствованием технологий тепловой защиты термонапряженных агрегатов, а также исследования связанные с производством пористых теплоизоляционных материалов на кремнеземистой основе применительно к условиям АО «Мотор Сич».

В результате выполненной работы исследованы различные технологии и режимы тепловой защиты:

1. Исследованы закономерности физических процессов тепловой обработки нового пористого теплоизоляционного материала;
2. Найдены оптимальные технологические режимы тепловой обработки пористого материала;
3. Разработано оборудование для производства нового пористого теплоизоляционного материала.

Использование теплоизоляционного материала на котлоагрегатах ТЭЦ позволит увеличить стойкость тепловой изоляции в 2,5 раза и уменьшает ее теплопроводность на 10%, что соответственно снижает расходы на 157389 грн. в год.

Главный технолог

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'В. Ф. Мозговой'.

В. Ф. Мозговой

ЗАТВЕРДЖУЮ  
ВАТ «Екскарвация»  
Директор С.М. Кожевніков  
07 березня 2017 р.

Акт

про використання результатів дисертаційної роботи

«Формування теплофізичних властивостей матеріалу шляхом створення  
прогнозованих пористих структур»

к.т.н., доцента каф. ТЕ ЗДІА, докторанта Чейлитко Андрія Олександровича

В період 2017 року Чейлитко А.О. виконував дослідження пов'язані з вдосконаленням технологій створення пористих теплоізоляційних матеріалів на основі гідросилікатів. У рамках дисертаційної роботи створено наповнювач для бетонів та вогнетривких бетонів на основі білої глини. Знайдено оптимальні параметри термообробки: температура термообробки 200 °С, час термообробки 15 хвилин, початкова вологість суміші 50%. Використання даних розробок дозволить покращити термічний опір вогнетривких бетонів. Очікуваний економічний ефект від впровадження розробки складає 51 580 грн/рік.

Підпис директора:





ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Головний інженер  
 ЗМЗ ім. В.І.Омельченко  
 АО «Мотор Січ»  
 С.М. Данилов  
 22.05.2017 р.

М.П.

Акт  
 про використання результатів дисертаційної роботи  
 «ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ  
 ШЛЯХОМ СТВОРЕННЯ ПРОГНОЗОВАНИХ ПОРИСТИХ СТРУКТУР»  
 к.т.н., доцента Чейлитко Андрія Олександровича

В період з 2016 по 2017 роки Чейлитко А.О. виконував дослідження пов'язані з вдосконаленням технологій створення вогнетривкої цегли з урахуванням умов ВАТ «Мотор Січ». У рамках дисертаційної роботи Чейлитко А.О. розробив вогнетривку цеглу, яка створювалася з сировини з показниками якості по таблиці 1. Для мінімізації усадки додавався шамот у кількості 30%.

Таблиця 1 – Показники якості сировини

Показник	Величина показника
Відносна вологість, %, не більше	46
Середня густина, $\text{кг/м}^3$ , не менше	1450
Вміст діоксиду кремнію, %	52
Вміст оксиду алюмінію, %	8
Вміст оксиду заліза, %, не більше	5
Вміст оксиду кальція, %, не більше	10

Експериментально досліджено динаміку формування пористої структури глиноземистих матеріалів в залежності від термодинамічних параметрів та складу сировинної суміші при термообробці, що дозволило визначити функціональний зв'язок технологічних параметрів і структурних характеристик пористого матеріалу (кількістю та розміром пор).

Запропоновані технологічні процеси для створення високоякісної продукції вогнетривків : для вогнетривкої цегли, виготовленої набором пластин з заданими структурними характеристиками (температура при пресуванні 200 °С; час витримки 10 хвилин; обпалювання при температурі 1250 °С на протязі 2 годин).

Використання теплоізоляційного матеріалу на ВАТ "Мотор Січ" дозволить знизити тепловтрати високотемпературного енергетичного обладнання. Очікуваний економічний ефект від впровадження розробки складає 2988000 грн/рік.

Головний металург

  
 В.В.Сторожук  
 22.05.17р.





про використання результатів дисертаційної роботи  
 «Формування теплофізичних властивостей матеріалу шляхом створення  
 прогнозованих пористих структур»  
 докторанта, к.т.н., доцента Чейлитко Андрія Олександровича

В період з 2016 по 2017 роки Чейлитко А.О. виконував розрахунки та дослідження пов'язані з вдосконаленням теплоізоляції для доменного обладнання МК «Запоріжсталь». Розроблена методологія створення пористих матеріалів з оптимальними теплофізичними властивостями за рахунок зміни пористої структури на стадії формування матеріалів. Досліджено динаміку формування пористої структури глиноземистих матеріалів. Визначено функціональний зв'язок технологічних параметрів і структурних характеристик пористого матеріалу (кількістю та розміром пор).

У рамках дисертаційної роботи Чейлитко А.О. розробив вогнетриві суміші та теплоізоляційний наповнювач для бетонів встановленого складу (табл.1).

Таблиця 1 - Хімічний склад глини для вироблення вогнетривкої суміші

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
46,32 - 56,37	26,18 - 35,20	1,29 - 2,98	1,08 - 1,84	0,40 - 0,91	0,26 - 0,57	0,07 - 0,61	0,02 - 0,66	0,23 - 1,01

Розроблена технологія створення теплоізоляційного наповнювача для бетонів: формування гранул з білої глини 6x20 мм, температура термообробки 200 °С, час термообробки 15 хвилин, початкова вологість суміші 50%.

Використання розроблених теплоізоляційних матеріалів дозволить знизити тепловтрати високотемпературного енергетичного обладнання доменного цеху МК «Запоріжсталь». Очікуваний економічний ефект від впровадження розробок складає 2 731 100 грн/рік.

Головний спеціаліст з  
 металургійного виробництва

 Фоменко А.П.



ЗАТВЕРДЖУЮ  
 ВОТ «Тера-Гарант»  
 Директор  
 Романенко Ю.П.  
 2017 р.

### Акт

про використання результатів дисертаційної роботи  
 «Формування теплофізичних властивостей матеріалу шляхом створення  
 прогнозованих пористих структур»  
 Чейлитко Андрія Олександровича

В період грудень 2016 - лютий 2017 року Чейлитко А.О. виконував дослідження пов'язані з вдосконаленням теплофізичних характеристик теплоізоляції будівель, споруд та енергетичного обладнання. У рамках дисертаційної роботи вдосконалена існуюча теплоізоляція та розроблена нова (пінобетони).

Чейлитко А.О. розроблена методологія створення пористих матеріалів з оптимальними теплофізичними властивостями за рахунок зміни пористої структури на стадії формування матеріалів.

Очікуваний економічний ефект від впровадження нової теплоізоляції складає 1 500 700 грн/рік.

Тех.директор

Савченко О.А.





ЗАТВЕРДЖУЮ  
Технічний директор  
АО «Мотор Січ»

\_\_\_\_\_ 2017 р.

Акт  
про використання результатів дисертаційної роботи  
«Формування теплофізичних властивостей матеріалу шляхом створення  
прогнозованих пористих структур»  
к.т.н., доцента Чейлитко Андрія Олександровича

В період листопад 2016 - березень 2017 року Чейлитко А.О. виконував дослідження пов'язані з вдосконаленням теплофізичних характеристик теплоізоляції будівель, споруд та енергетичного обладнання з урахуванням умов АО «Мотор Січ». У рамках дисертаційної роботи вдосконалена існуюча та розроблена нова теплоізоляція (засипка для бетонів та керамзит).

Розроблено методологія, а також експериментальну установку для знаходження характеристики пористої структури та теплової проникності пористих матеріалів.

Запропоновані технологічні процеси для створення високоякісної пористої теплоізоляції на основі білої глини: температура термообробки 200 °С, час термообробки 15 хвилин, початкова вологість суміші 50%.

Очікуваний економічний ефект від впровадження розробок дисертанта на АО "Мотор Січ" складає 2 350 000 грн/рік.

Головний технолог

В.Ф.Мозговий

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор ЗДІА

д.т.н., професор В.А. Банах



2017 р.

## Акт

впровадження результатів дисертаційної роботи Чейлитко А.О.  
«Формування теплофізичних властивостей матеріалу шляхом створення  
прогнозованих пористих структур»  
в навчальний процес кафедри «Теплоенергетика»

В період з 2013 по 2017 роки к.т.н., доцент Чейлитко А.О. виконував дослідження, пов'язані з вдосконаленням технологій створення пористих теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкції теплового захисту енергетичного обладнання.

Наукові результати та розроблені дисертантом методики розрахунків оптимальних теплофізичних характеристик теплоізоляційних матеріалів використовуються в навчальному процесі при викладені лекцій та практичних занять по загальним та спеціальним курсам для студентів енергетичного напрямку ЗДІА, а саме з таких дисциплін: «Тепломасообмін», «Дослідження та випробування апаратів теплотехнологій», «Математичне моделювання та оптимізація процесів тепломасообміну», «Математичне моделювання в системах ТП», «Опалення спеціального призначення», «Проектування та оптимізація систем тепlopостачання»

Також отримані результати використовуються при виконанні індивідуальних курсових завдань, магістерських робіт та для дослідницьких робіт аспірантів.

Перший проректор  
д.т.н., професор Воденніков С.А.

/ зав.кафедрою теплоенергетики  
Назаренко І.А.



ЗАТВЕРДЖУЮ  
Технічний директор  
АО «Мотор Січ»

\_\_\_\_\_ 2018 р.

### Акт

про використання результатів дисертаційної роботи  
«Розвиток теоретичних основ формування теплофізичних властивостей  
теплоізоляційних матеріалів шляхом управління процесами тепломасообміну в  
пористих структурах»  
к.т.н., доцента Чейлитко Андрія Олександровича

В період листопад 2016 - грудень 2017 року Чейлитко А.О. виконував дослідження пов'язані з вдосконаленням теплофізичних характеристик теплоізоляції будівель, споруд та елементів теплового захисту енергетичного обладнання з урахуванням умов АО «Мотор Січ». Було виготовлено гідросилікати з сировини, що з наступними показниками якості.

Показники якості сировини на підприємстві АО «Мотор Січ»

Показник	Величина показника
Відносна вологість, %, не більше	55
Середня густина, кг/м <sup>3</sup> , не менше	1650
Вміст оксиду кремнію, %	46
Вміст оксиду алюмінію, %	12
Вміст оксиду заліза, %, не більше	6
Вміст оксиду кальція, %, не більше	12

Визначені режими термообробки, та отримано керамзитобетони з наступними теплофізичними характеристиками: коефіцієнт теплопровідності 0,114-0,119 Вт/(м·К), питома теплоємність при 22 °С дорівнювала 1,33-1,41 кДж/(кг·К).

Очікуваний економічний ефект від впровадження розробок дисертанта на АО "Мотор Січ" в перерахунку на електричну енергію складає 2 498 420,83 грн/рік (економія теплової енергії складає 1,366 кВт).

Головний технолог

В.Ф. Мозговий