

# POROUS COMPOSITE INDEX STRUCTURES AND THEIR EFFECT ON THERMAL PROPERTIES PHYSICAL ELEMENTS THERMAL PROTECTION

PAVLENKO Anatolii<sup>1, a \*</sup>, CHEILYTKO Andrii<sup>2, b</sup> and ILIN Sergii<sup>2, c</sup>

<sup>1</sup> Kielce University of Technology, Kielce, Poland

<sup>2</sup> State Higher Educational Institution «Zaporizhzhia State Engineering Academy», Zaporizhzhia, Ukraine

<sup>a</sup> apavlenko@tu.kielce.pl, <sup>b</sup> cheilytko@i.ua, <sup>c</sup> svizp1@gmail.com

**Keywords:** thermophysical properties of the material, impurities, porous structure, swelling.

## Abstract

The improvement of the thermal insulation material thermophysical characteristics of the thermal protection elements by studying the porous structure is a promising direction of research. The article describes the methods of influence on the porosity and coupling of the porous structure with the thermophysical characteristics of thermal insulation materials.

The article uses standard systematized techniques and means of scientific research in thermophysics. The high-porous materials thermophysical properties research methodology is based on conducting empirical laboratory investigations of the samples obtained.

It was found that for the pores structure study on the characteristics of the material it is expedient to use complex indicators: porosity, number of pores, pore position in space, pore form, pore formation energy. The article shows the influence of the porous structure on the thermophysical characteristics of the material. The complex parameters of the porous structure, which will allow to develop a new method of management of the porous structure, are proposed.

The method of planning the experiment obtained the regression equation of an effective coefficient of thermal conductivity for porous thermal protection structures. It has been established that for a more even spreading of the mixture in volume it is necessary to minimize the size of the dispersed output components, thereby increasing the area of their contacts

Experimental method revealed that the evaporation of moisture caused the formation of pores inside the clay. The shape and shape of the pores were determined on an electron microscope of MMP-2P, both on the cut and on the surface of the sample. The purest clay has the greatest porosity (no iron oxide and calcium oxide). In it pores have a spherical shape. The presence of impurities reduces the porosity of the material due to the increased viscosity of the clay.

## Introduction

В умовах побудови енергетичної незалежності України, найбільш затребуваними в народному господарстві ізоляційними матеріалами є пористі будівельні матеріали, які є елементами теплового захисту. Серед цієї групи матеріалів, окремо необхідно виділити висококопористі матеріали, що отримують різким спучування сировинної маси. Дана група матеріалів цікава тим, що з однієї сировинної суміші можна отримати матеріали різної якості шляхом зміни їх кінцевої пористої структури. Пориста структура впливає на всі теплофізичні характеристики матеріалу. Тому вивчення пористої структури є цікавим для можливості поліпшення теплофізичних характеристик матеріалу.

Більшість авторів при дослідженні макропористих матеріалів, оцінюють лише кількісний показник, - пористість. Питання про достатність даного критерію для твердих макропористих матеріалів до сих пір не визначалось.

## Literature review

В [1] проведено дослідження термічного розвитку примусової конвективної теплопередачі всередині каналу, заповненого пористим середовищем, стінки якого

накладаються на постійний тепловий потік (термограничний стан ізофлазу). Розглянуто закон двигуна Дарсі та двоенергетичне рівняння (локальна тепла нерівноважна модель). Проте в статті відсутній кінцевий зв'язок виду пористої структури матеріалу з його теплофізичними характеристиками. Також зі статті не ясно як необхідно оцінювати пористу структуру.

В роботі [2] проведено гідродинамічні та масообмінні розрахунки транспортування параметризованого каркасу в перфузійних біореакторах, що аналізують вплив мікроструктури каркасу, використовуючи підхід взаємодії флюїд-структури. Це дозволяє розглядати пористу структуру як сумісну. Представлено модель, яка досліджує перфузію течії. Проте, не було визначено важливі структурні параметри, такі як напруги та деформації, які можуть впливати на пори в масиві матеріалу. Найімовірніше, невідповідність теорії та експерименту зумовлено ідеалізуванням модельних структур [3]. Також доволі значна кількість інших робіт [4-6], в яких наводиться, що узагальнене теоретичне обґрунтування теплопровідності пористого матеріалу дає розходження з проведеними експериментами.

У [7] Представлені результати проведених теоретичних і практичних досліджень теплообмінних процесів переробки залізовмісних відходів травлення сталевих поверхонь. На основі результатів досліджень обґрунтовано та практично апробовано нові технологічні підходи до переробки відходів з метою мінімізації їх скидів в навколишнє середовище і зниження витрат підприємства. Проте в роботі не було наведено аналізу впливу пористості металевих матеріалів на теплопровідність зразків, що досліджено.

Пориста структура керамічних виробів з силікату вуглецю (SiC) розглядається у [8]. 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.

В статті [9] проведено дослідження процесів деформації на титанових алюмінідах. Визначено залежності тиску стискання від геометричних розмірів та щільності злитка для різних типів алюмінідів титану. Також виконуються дослідження визначення різних ущільнювальних зон під час пресування. Встановлено коефіцієнт неізостатичної деформації при пресуванні титанових алюмінідів з виливками. Проте в роботі не розглянуто питання зміни теплопровідності матеріалу від зміни геометричних характеристик пористого матеріалу.

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.

В літературі проведено ґрунтовні дослідження спрямовано на характеристику поглинання капіляром структурного легкого агрегованого бетону (LWAC) з урахуванням різних композицій з легкими агрегатами (LWA) з дуже різною пористістю [10]. Проаналізовано вплив наступних параметрів: об'єм і вихідний вміст води в LWA; вміст цементу та його заміна на золи, осадженої золи або діоксиду кремнію та інші на процес формування пористої структури матеріалу. Проте не приділено достатньої уваги дослідженню теплофізичних властивостей отриманого матеріалу.

Встановлено, що на ефективний коефіцієнт теплопровідності палива значно впливає пористість [11], а отже пористість буде формувати основні закони протікання процесів тепломасообміну.

В [12] наведено результати експериментальних досліджень теплопровідності домінуючих типів зовнішніх забруднювачів повітряних охолоджувачів. Результати

представлені як залежність теплопровідності від густини забруднюючих речовин. Показано, що теплопровідність істотно залежить від пористості забруднювача, але комплексні показники пористості не розглянуто.

Було виведено теоретичне обґрунтування методологічних основ встановлення умов прояву можливих ефектів і пост-ефектів технології гідравлічного розриву пласта [13]. Встановлено, що до числа фундаментальних закономірностей, які визначають формування і розвиток пост-ефектів технології гідравлічного розриву пласта при відпрацюванні продуктивних пластів, відносяться методичні положення й критерії для прогнозу показників руйнування та ефектів подрібнення.

### **Problem formulation**

Існуючі експериментальні дані за оптимальними умовами створення макропористої структури матеріалів отриманих при спучення різняться. До таких матеріалів можна віднести піноскло, керамзит, вогнетривкі вироби. На сьогоднішній день відсутня теорія, яка узагальнює фізичні процеси, що відбуваються при формуванні пористості в твердих матеріалах при їх спученні. Наприклад, підігрів вихідної суміші піноскла до температури спікання (690 °C) рекомендують проводити як 70 хвилин, так і 15 хвилин [14].

Метою даної статті є визначення існуючих методів формування пористої структури в теплоізоляційних і будівельних матеріалах, що використовуються як елементи теплового захисту, визначення можливості управління структурою, а також створення комплексних показників пористої структури.

### **Results and Discussions**

В [14] досліджувалися процеси спучування і кристалізації скла з різним хімічним складом, з метою визначення температури, при якій спучування скла відбувається найбільш ефективно. З аналізу експериментальних даних можна зробити висновок, що пористість значно збільшується у скла зі зниженою температурою кристалізації, але при цьому автор досліджень стверджує, що початкова рання кристалізації утворюється локально. Тобто для більшого спучування піноскла рекомендується вибирати найбільш чисті види скла (з мінімальною кількістю домішок), а осередки кристалізації створювати за рахунок додавання піноактивних домішок, які після хімічної реакції утворюють газ і тверду речовину з температурою кристалізації більшою за температуру спучення. Найбільш активно спучуються скло з підвищеним вмістом  $Al_2O_3$  (5,6 - 7,4%), при температурах 830 - 850°C. Варто окремо відзначити спучування скла з підвищеним вмістом  $CaO$  (5,7 - 6,2%) і значним вмістом  $K_2O$  (1,9 - 2,1%). Але головне, досить сильно проглядається зв'язок між температурою теплової обробки піноскла і коефіцієнтом спучування. Отже, режим теплової обробки впливає на структуру матеріалу і на його теплофізичні характеристики. Дану залежність, автор знаходить для певного хімічного складу скла методом планування експерименту. В якості керуючих факторів було обрано наступні параметри: вміст вуглецю суміші, дисперсність скла, температура теплової обробки і її тривалість.

Як впливає з проведеного експерименту, коефіцієнт спучення знижується при збільшенні вмісту вуглецю в суміші, що утворює піну. Інші параметри неоднозначно впливають на спучування. Найбільш сильний вплив чинять температура і тривалість теплової обробки, менший - дисперсність і вміст вуглецю. Проте варто враховувати і спільний вплив цих факторів за коефіцієнтами парних взаємодій. Однозначно проявляється вплив керуючих факторів на втрату маси. Спільне або роздільне збільшення дисперсності скла, тривалості і температури теплової обробки призводить до зростання втрат маси, що говорить про збільшення виділення газу з суміші.

Автор в [14] не приділив належної уваги формуванню самої структури матеріалу, але вказав, що на пористість підсумкового матеріалу буде впливати синтез вихідних сировинних компонентів і газоутворювачів (в невеликому діапазоні) і режими термообробки.

Основним фактором впливу на пористу структуру було визначено час термічної обробки матеріалів, температура обробки і початкова вологість сировинної суміші. В якості основного показника оцінювання пористої структури було обрано пористість і діаметр пір, що не дозволило провести якісної оцінки пористої структури. Результатом дослідження були залежності теплофізичних характеристик від режимів термообробки в певному діапазоні. Відкритим залишилося питання про необхідність поєднання пористої структури і теплофізичних властивостей.

Залежність коефіцієнта теплопровідності кінцевого матеріалу від коефіцієнта спучування виявилася не лінійною. Це дозволяє зробити висновок, що кількісний показник пористості не є критерієм якісної оцінки матеріалу. Збільшення коефіцієнта теплопровідності при збільшенні значення пористості пов'язано з тим, що після певної критичної точки пори починають рости в хаотичному порядку, отже, збільшується перенесення теплоти конвективної складової в порі, а також порушується рівномірність розподілу пор за об'ємом.

Також було зроблено спробу отримання емпіричних залежностей теплофізичних властивостей матеріалу без якісної оцінки структури. Методом планування експерименту було знайдено залежності теплоємності, теплопровідності і щільності кремнеземистого матеріалу від режимів спучування. З аналізу даних залежностей випливає, що для кремнеземистих матеріалів вплив на загальну щільність і на коефіцієнт спучування, надає сукупність різних факторів. Причому вплив температури і часу теплової обробки на спучування приблизно рівний. Для коефіцієнта теплопровідності кремнеземистого матеріалу більший вплив чинить час теплової обробки, але цей вплив не є однозначним. При тривалій тепловій обробці коефіцієнт теплопровідності починає зростати. Що, як було показано раніше, не характерно для спучується піноскла. Аналогічний вплив чинить час спучування на теплоємність матеріалу. Головним недоліком наведених залежностей є вузький діапазон їх застосування.

Збільшення розміру пір збільшує ефективну теплопровідність за рахунок збільшення конвективної складової. При цьому зменшується тиск всередині пір, що в свою чергу зменшує конвективну складову. Значить повинен існувати екстремум функції залежності конвективної складової від режимів спучування матеріалу. У відомих джерелах дані про дослідження одночасного впливу тиску газообразних речовин і розміру пір на ефективний коефіцієнт теплопровідності не наведено. Це дозволяє сформулювати завдання в визначенні впливу пористої структури на ефективний коефіцієнт теплопровідності. Для вирішення можливо використання теоретичних і емпіричних методів. Для узагальнення отриманих результатів стосовно до різних технологій і матеріалів доцільно створення теоретичної бази процесів і структурних елементів, які впливають на спучування матеріалу.

Характеристики міцності також є важливою характеристикою матеріалів, які досліджуються. Вони залежать від режиму теплової обробки матеріалу. Дослідження показують, що основним етапом, що впливає на характеристики міцності, є отжиг і охолодження матеріалу, що спучується. При цьому основним фактором, що впливає на швидкість охолодження, є температуропровідність. Наприклад, для піноскла безпечна швидкість охолодження на початку процесу може бути рівною  $1,2-1,8^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ , знижуючись в кінці до  $0,6-0,7^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ . Також важливу роль в міцності грають дефекти структури і розмір зерна. Тому вибір температурної кривої відпалу для різних матеріалів, що спучуються, визначається структурою пористого матеріалу, який повинен враховуватися при виборі режимів охолодження.

Таким чином, розробка комплексних показників пористої структури і визначення їх впливу на теплофізичні та міцності характеристики різних пористих матеріалів є актуальним завданням, рішення якого дозволить підвищити можливість отримання матеріалів із заданими властивостями.

В роботі [15] визначено кінетичні характеристики процесів окислення оксиду вуглецю та пропану на інтерметалідному каталізаторі складу Ni-Co-Mn-Cu-Al. На основі

модифікованої моделі Мар-са-Ван Кревель отримані ефективні константи швидкостей реакцій і енергії активації. Для реакції окислення оксиду вуглецю на катализаторі складу Ni-Al-Co-Mn-Cu енергія активації становить 37,2 кДж/моль, що в 1,4 рази нижче енергії активації Ni-Al сплавів. Проте в роботі не наводяться графічні експериментальні залежності зміни діаметра сферичної частки, що спучується, на основі кремнезему, для різних температур.

Для проведення експериментів зі створення теплоізоляційних елементів теплового захисту вибиралися глини з різних родовищ та вмістом діоксиду кремнію від 48 до 65%, оксиду алюмінію від 3 до 10%, оксиду заліза не більше 11%, оксиду кальцію не більше 15%.

Для термообробки використовувалася муфельна електропіч, контроль температури в якій проводився за допомогою термопар ХК-0,1. Зразки наситились до максимальної вологості. Після цього частина кожного зразка висушувалася непрямим прискореним методом (час сушки 10 хвилин, температура печі 130°C).

З проведеного експерименту випливає, що випаровування вологи викликало утворення пір всередині глин. Характер і форма пір визначалася на електронному мікроскопі ММР-2Р, як по зрізу, так і на поверхні зразка. Найбільшою пористістю володіє чиста глина (без вмісту оксиду заліза і оксиду кальцію). У ній пори мають сферичну форму. Наявність домішок зменшує пористість матеріалу через те, що збільшується в'язкість глини. Необхідно відзначити, що домішки також впливають на форму пір. Пори стають витягнуті перпендикулярно лініям дифузії вологи, що поділяють матеріал на окремі пласти. Велика кількість домішок веде до утворення тріщин. Це пов'язано з нерівномірністю розподілу домішок за об'ємом. Отже, створюються різні напруженості всередині матеріалу при пороутворенні. Але домішки можуть збільшувати кінцеву міцність матеріалу.

Для визначення впливу газів, що утворюють пори ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  а також можливо  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ), на процес спучування, наявні зразки спучено при температурах 750°C протягом 8 хвилин. Даної температури достатньо для виділення газів, але при цьому вона нижча за температуру плавлення глини. Після термообробки у всіх зразках спостерігалися наступні зміни: пори є більшими, ніж в попередньому експерименті, але не сферичними; іноді виникає велика пора всередині матеріалу; матеріал стає міцнішим, що пов'язано з утворенням муллита; виникають більш виразні тріщини; матеріал з чистої глини крихкий, пори в ньому є більш нерівномірними і різними за розміром.

Для розуміння впливу структури досліджуваних зразків на їх теплопровідність були проведені експерименти по визначенню теплопровідності різних пористих матеріалів. Досліджувалися зразки пресованого порошку гіпсу (зразок № 1), зразки спученої (при різних умовах) глини і мають різні структурні характеристики (зразки № 2, 3, 4) і зразок  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (зразок № 5). Вимірювання теплопровідності всіх зразків проводилося на ІТ- $\lambda$ -400. Результати вимірювання відображено на рис.1.

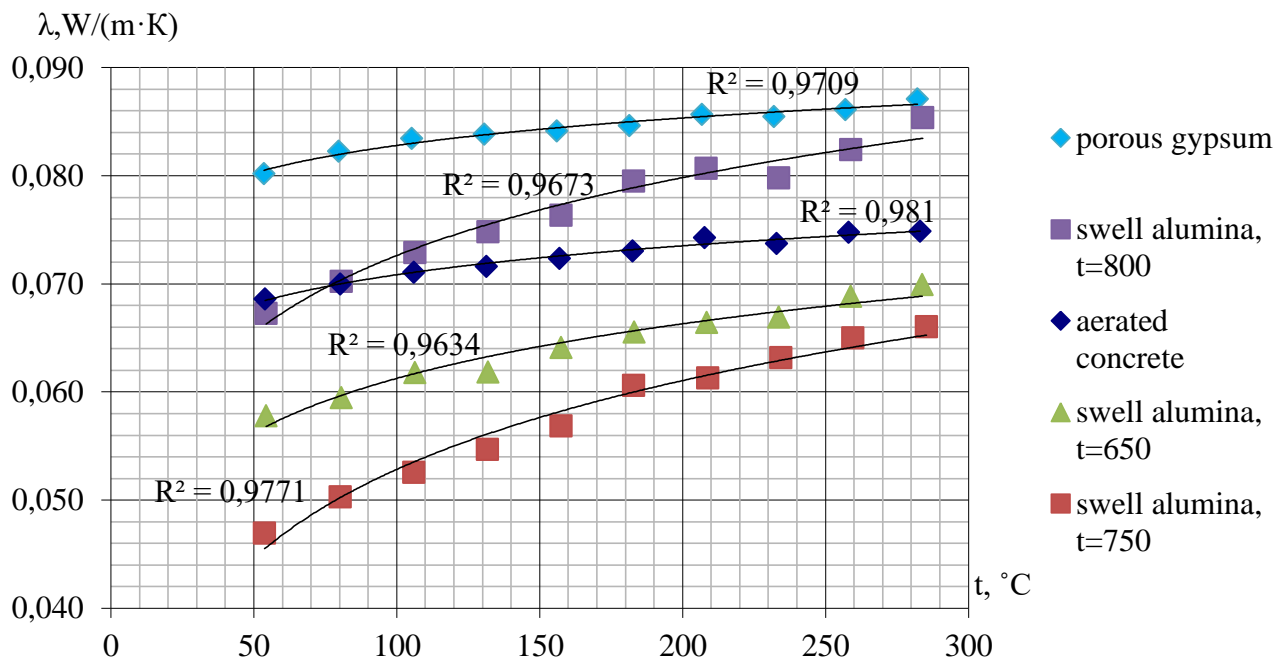
Похибка вимірювання теплопровідності теоретично складається з похибок визначення геометричних розмірів ( $\pm 0,8\%$ ), температури ( $\pm 1,7\%$ ), показів приладів ( $\pm 2\%$ ). З врахуванням теплових втрат, які не піддаються розрахунку внаслідок складності температурних полів у пористому матеріалі, повна похибка становить  $\pm (5-7)\%$ . Практично, внаслідок неоднорідності матеріалу і різних похибок експерименту, похибка цього методу досягає (10–15) %.

За результатами експерименту можна сказати, що зі збільшенням температури від 50°C до 275°C теплопровідність пористих матеріалів збільшується. При цьому, теплопровідність чистого  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з ростом температури (в даному діапазоні) повинна зменшуватися [16]. Це підтверджує можливість регулювання залежності теплопровідність-температура шляхом збільшення вмісту  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Але ґрунтуючись на попередніх експериментах можна стверджувати, що збільшення вмісту  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в глиноземах буде виправдано тільки при мінімумі домішок.

З рис.1 можна зробити висновок, що характер зміни теплопровідності у всіх зразків однаковий, але у газобетону залежність має більш пологий характер, тобто мінімально залежить від температури.

Для всіх досліджуваних зразків характерно, що залежності теплопровідності від температури можна описати лінійними або логарифмічними залежностями (для логарифмічних залежностей коефіцієнт детермінації не відрізняється більш ніж на 5%). Для зразків 1, 2 і 5 більш точно описує логарифмічна залежність.

Залежність температури термообробки сировинної суміші глиноземистого теплоізоляційного матеріалу на коефіцієнт теплопровідності носить неоднозначний характер. Мінімальний коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему було досягнуто при температурі 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.



Eq. 1– Залежність теплопровідності зразків від температури

Так, при термообробці сировинної суміші глинозему при температурі 650 °С – більшість пір у теплоізоляційному матеріалі розташовано рівномірно, але їх розмір менший за розмір пір теплоізоляційного матеріалу спученого при температурі 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 °С і 800 °С 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 %).

Можна зробити висновок, що рівномірність пористості і розмір пір чинять значний вплив на теплопровідність пористих будівельних матеріалів.

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 [17–21]. Проведений аналіз сучасної літератури показує, що навіть одночасне врахування загальної пористості матеріалу, розміру і типу пір недостатньо для повної характеристики пористої структури теплоізоляційного матеріалу. 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.

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 при формуванні 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.

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

$$dQ_{\text{pore}} = T_{\text{pore}} dS + \varphi_{\text{pore}} dM_{\text{pore}}. \quad (1)$$

Враховуючи наведені комплексні показники, методом планування експерименту отримано рівняння регресії ефективного коефіцієнту теплопровідності для пористих конструкцій теплового захисту

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

де  $\lambda_m$  - коефіцієнт теплопровідності елемента конструкції, що має логарифмічну залежність від температури ( Eq.1),  $\lambda_m \in [0,03; 0,9]$ ;

$d_1$  - діаметр пори/пустоти у конструкції вздовж теплового потоку,  $d_1 \in [4; 8]$  мм;

$d_2$  - діаметр пори/пустоти у конструкції перпендикулярний теплового потоку,  $d_2 \in [4; 8]$  мм;

$grad(t)$  - градієнт температури по порі/пустоті,  $grad(t) \in [10; 90]$ , К;

$n$  - кількість пір/пустот на одиницю об'єму, шт./6,4 · 10<sup>-5</sup> м<sup>3</sup>,  $n \in [1; 9]$ .

## Conclusions

Аналіз літератури і власні експериментальні дослідження впливу особливостей структури пористих матеріалів на їх теплофізичні характеристики дозволяють зробити наступний висновок: в даний час відсутній єдиний підхід для оцінки впливу пористої структури на теплофізичні властивості матеріалу. Для дослідження структури пір на характеристики матеріалу доцільно використовувати комплексні показники: пористість, кількість пір, розташування пір в просторі, форма пори, енергія пороутворення.

В результаті досліджень встановлено, що:

- для більш рівномірного спучування суміші за об'ємом необхідно мінімізувати розмір дисперсних вихідних компонентів, тим самим збільшивши площу їх контактів;
- наявність домішок у глиноземистих матеріалах, що спучуються, зменшує кінцеву пористість матеріалу. Пори стають витягнуті перпендикулярно лініям дифузії вологи та поділяють матеріал на окремі пласти. Велика кількість домішок веде до утворення тріщин;
- рівномірність пористості значно впливає на теплопровідність пористих будівельних матеріалів;
- залежність коефіцієнта теплопровідності від температури для теплоізоляційних матеріалів з мікропористою структурою носить логарифмічний характер.

### **Acknowledgements**

The publication contains the results of studies conducted by President's of Ukraine grant for competitive projects (No. Ф75/29090) of the State Fund for Fundamental Research.

Також робота виконана з відповідністю 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).

Матеріали статті отримані також при виконанні досліджень у рамках гранту ЄС «Development of theoretical basis for the method of energy discrete transformation (EDT) in multiphase process media» (ID: 409531, Nr 2018/29/B/ST8/01121).

### **Reference**

1. Jouybari, H. J., Saedodin, S., Zamzajian, A., Nimvari, M. E., & Wongwises, S. (2017). Effects of porous material and nanoparticles on the thermal performance of a flat plate solar collector: An experimental study. *Renewable Energy*, 114, 1407-1418.
2. Malvè, M., Bergstrom, D. J., & Chen, X. B. (2018). Modeling the flow and mass transport in a mechanically stimulated parametric porous scaffold under fluid-structure interaction approach. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 96, 53-60.
3. Liang, Y., Wu, D., & Fu, R. (2013). Carbon microfibers with hierarchical porous structure from electrospun fiber-like natural biopolymer. *Scientific reports*, 3, 1119.
4. Säckel, W., & Nieken, U. (2016). Structure Formation within Spray-Dried Droplets; Mathematical Modelling of Spray Polymerisation. In *Process-Spray*, pp. 89-125.
5. Lowell, S., & Shields, J. E. (2013). *Powder surface area and porosity (Vol. 2)*. Springer Science & Business Media, 252p.
6. Cheilytko, A. A., Ilin, S. V., & Nosov, M. A. (2017). Creation of effective metallic thermal insulation constructions. *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk*, (6), 103-108.
7. Yatskov, M., Korchyk, N., Budenkova, N., Kyrylyuk, S., & Prorok, O. (2017). Development of technology for processing liquid iron-containing wastes of etching of steel surfaces. *Eastern European Journal of Advanced Technology*, 2(6), 70-77.
8. Eom, J. H., Kim, Y. W., & Raju, S. (2013). Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics: A review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 1(3), 220-242.
9. Sereda, B., Kruglyak, I., Zherebtsov, A., & Belokon, Y. (2011). The influence of deformation process at titan aluminides retrieving by SHS-compaction technologies. *Metallurgical and Mining Industry*, 3(7), 59-63.
10. Bogas, J. A., Gomes, M. G., & Real, S. (2015). Capillary absorption of structural lightweight aggregate concrete. *Materials and Structures*, 48(9), 2869-2883.
11. Syrodoy, S. V., Kuznetsov, G. V., Zhakharevich, A. V., Gutareva, N. Y., & Salomatov, V. V. (2017). The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal-water fuel particles ignition in high temperature environment. *Combustion and Flame*, 180, 196-206.



12. Kuntys, V. B., Dudarev, V. V., Filatov, S. O., & Korol'kova, A. M. (2017). Thermal Conductivity of External Contaminants of Air-Cooled Heat Exchangers. *Chemical and Petroleum Engineering*, 53(3-4), 244-247.
13. Biletskyi, V., Horobets, L., Fyk, M., Al-Sultan, M. (2018). Theoretical background of rock failure at hydraulic seam fracture and after effect analysis. *Mining of Mineral Deposits*, 12, 45-55.
14. Cheylitko, A. (2015). The influence of synthesis of the initial mixture and blowing agents on the formation of a porous structure. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 5(77), 35-38.
15. Sereda, BP, Belykon, KV, Belykon, Yu. O., & Kruglyak, I. AT. (2018). Model of mechanism of catalytic reactions of deep oxidation of carbon monoxide. *Mathematical modeling*, (1 (38)), 62-68.
- 16 Pavlenko, A., Usenko, B., Koshlak, A. (2014). Thermal conductivity of the gas in small space. *Metallurgical and Mining Industry*, No 2, 20-24.
17. Pavlenko, A., Koshlak, H., Usenko, B. (2014) Heat and mass transfer in fluidized layer. *Metallurgical and Mining Industry* No 6, 96-100.
18. Hurto, V. A., & Osaulenko, R. N. (2007). *Fyzyka tverdoho tela dlya ynzhenyrov*, 561 p.
19. Andriyanov, D. I., Amosov, A. P., & Samboruk, A. R. (2014). Ispol'zovaniye granulirovaniya v tekhnologii samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza dlya polucheniya poristogo karbida titana. *Vestn. Samarskogo gos. tekhnich. un-ta. Ser. Tekhn. nauki*, (3), 43.
20. Smolin, I. YU., Yerebin, M. O., Makarov, P. V., Buyakova, S. P., Kul'kov, S. N., & Yevtushenko, Ye. P. (2013). Chislennoye modelirovaniye mekhanicheskogo povedeniya model'nykh khрупkikh poristykh materialov na mezourovne. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, (5 (25)), 78-90
21. Rudobashta, S. P., Zueva, G. A., & Zuev, N. A. (2015). Hygroscopic properties of seeds. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*, 58(1).

A.M. Pavlenko, [orcid.org/0000-0002-8103-2578](https://orcid.org/0000-0002-8103-2578),

A. O. Cheilytko, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof., [orcid.org/0000-0002-5713-155X](https://orcid.org/0000-0002-5713-155X),

S. V. Ilin, Cand. Sc. (Tech.), [orcid.org/0000-0003-3563-9536](https://orcid.org/0000-0003-3563-9536)