

## РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПОРИСТОГО ТІЛА ДЛЯ УМОВ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО НАГРІВАННЯ

**Степанов О. В.**, к.т.н., доцент КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: [ostepanoff@iff.kpi.ua](mailto:ostepanoff@iff.kpi.ua), ORCID: 0000-0002-6601-6852;

**Романенко Ю. М.**, провідний інженер КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: [romanenko.yuri@ill.kpi.ua](mailto:romanenko.yuri@ill.kpi.ua), ORCID: 0000-0003-3877-8646;

**Лобода П. І.**, д.т.н., професор КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: [decap@iff.kpi.ua](mailto:decap@iff.kpi.ua), ORCID: 000-0003-2012-1080;

**Андрієнко Ю. Є.**, студентка КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: [youandrienko@gmail.com](mailto:youandrienko@gmail.com);

**Богомол Ю. І.**, д.т.н., доцент КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: [ubohomol@iff.kpi.ua](mailto:ubohomol@iff.kpi.ua), ORCID: 0000-0001-6633-0078

*Метою дослідження є аналіз поля температурного градієнту, засобами математичного моделювання для визначення ефективної теплопровідності пористих заготовок з порошку молібдену в умовах електронно-променевого нагріву.*

*Проаналізовано вклад різних механізмів перенесення тепла в умовах електронно-променевого нагрівання пористих заготовок. У результаті дослідження було отримано коефіцієнти лінійної залежності відносної теплопровідності пористого тіла від пористості. Доведено, що за умов швидкісного нагріву у вакуумі при розмірі пор до 25 мкм, визначальну роль відіграє кондуктивна теплопровідність, вплив інших механізмів можна не враховувати. Показано, що кондуктивна і сумарна теплопровідність пористого тіла може бути розрахована з деяким рівнем невизначеності, який зростає з ростом пористості виробу.*

*Запропоновано проводити розрахунки значення питомої теплопровідності пористого тіла шляхом комп'ютерного моделювання з застосуванням методу скінчених елементів. Даний підхід дозволяє кількісно і якісно оцінити теплофізичні параметри процесу спікання високоенергетичними джерелами нагріву з урахуванням пористості порошкових тіл.*

*Стаття містить детальний аналіз теплових ефектів, які притаманні процесу спікання, з побудовою математичних моделей теплопередачі в пористому середовищі. Результати дослідження можуть бути використані при розробці технології електронно-променевого спікання різних порошкових матеріалів, термообробці, оптимізації вже існуючих процесів.*

**Ключові слова:** математичне моделювання; теплопровідність; пористість; спікання; поле температурного градієнту; електронно-променевий нагрів.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.108-117**

**Постановка задачі.** Формування і контроль температурного поля в неоднорідному середовищі є досить непростим завданням. З подібною задачею зустрічаються при використанні порошкових та пористих каталізаторів, при реалізації технологічних прийомів селективного лазерного чи електронно-променевого спікання, в теплообмінниках, тощо. Серед ключових моментів контролю температурного поля є визначення ефективних коефіцієнтів теплопровідності пористого середовища, а також їх залежність від пористості та температури. Визначенню показників ефективної теплопровідності для різних практичних застосувань, від характеристики вогнетривів до температурного режиму порошкових каталізаторів та впливу концентрованих джерел енергії на ущільнені порошкові шари в *powder bed* адитивних технологіях присвячено десятки робіт теоретичного та експериментального характеру за більш ніж 60 років [1, 2, 3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [4] виділено та докладно проаналізовано чотири основних механізми передачі тепла в пористій структурі яка складається з набору довільно розташованих сфер, у тому числі під дією деякого ущільнюючого навантаження. Серед розглянутих механізмів: а) кондуктивна теплопровідність в об'ємі частинки; б) кондуктивна теплопровідність контакту між частинками; в) теплопровідність газової фази в пустотах; г) теплопровідність випромінюванням між поверхнями частинок.

В серії робіт Asakuma [5–7] досліджено окремі механізми перенесення тепла в пористому середовищі та одержано узагальнені гомогенізаційні залежності ефективної теплопровідності від розміру сфер, температури, тиску. В роботі [8] проаналізовано вплив механізму випромінювання на теплопровідність пористих середовищ з застосуванням різних моделей.

Основними недоліками проведених досліджень є їх направленість на специфічні системи: елементи досить великого розміру  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  м як для середовища *pebble-bed*, різні інтервали температур, які досягають лише  $1500^{\circ}\text{C}$ , порівняно високі значення тиску газу в пористому середовищі.

**Метою роботи** є розроблення підходу та визначення ефективної теплопровідності пористих заготовок з порошку Мо при спіканні в умовах електронно-променевого нагріву.

**Постановка завдання.** Додатковими характеристиками об'єктів є розмір часток порошку і характерний розмір пор порядку  $1\text{--}5\cdot 10^{-6}$  м та порівняно стабільні контакти між частками, оскільки спресована заготовка підлягала попередньому спіканню.

Для оцінки ефективної теплопровідності пористого тіла застосували дещо змінену формулу, запропоновану в [3], яка в нашому випадку має вигляд:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{(Q_{\text{cond}} + Q_{\text{gas}} + Q_{\text{rad}}) \cdot h}{S \cdot \Delta T}, \quad (1)$$

де  $\lambda_{\text{eff}}$  – ефективна теплопровідність ( $\text{Вт} / \text{м} \cdot \text{К}$ );  $Q_{\text{cond}}$ ,  $Q_{\text{gas}}$ ,  $Q_{\text{rad}}$  – теплові потоки, що здійснюються відповідно механізмами кондуктивним, через газову фазу в порах та випромінюванням через пори,  $\text{Вт}$ ;  $h$  – відстань, на яку передається тепло, м;  $S$  – площа поперечного перетину домену,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta T$  – різниця температур на протилежних боках домена,  $\text{К}$ .

Для розрахунку ефективної теплопровідності формулювали та розв'язували обернену задачу стаціонарної теплопровідності. Визначальним рівнянням теплопровідності є рівняння Фур'є, яке в стаціонарному одновимірному випадку при відсутності внутрішніх джерел тепла, має вигляд:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} = 0.$$

Розв'язком прямої задачі теплопровідності є температурне поле в домені та розраховані на його основі теплові потоки, що визначаються за відомими значеннями температури на протилежних сторонах домену та характеристиками теплопровідності матеріалу домену. В оберненому формулюванні, яке є продовженням прямої задачі і використовується в даній роботі, пропонується за відомими значеннями температури на протилежних сторонах домену та відомим значенням питомої теплопровідності безпористого матеріалу, застосовуючи домен з геометрією пористої структури, обчислювати ефективну питому теплопровідність пористого тіла. Подібні підходи до обчислення ефективних характеристик композиційних матеріалів описано в [9].

Для розв'язку прямої задачі теплопровідності використовували метод скінченних елементів. В якості середовища моделювання було обрано систему ANSYS Workbench 19R2 Academic edition. Оскільки пряма одночасна реалізація усіх трьох механізмів теплообміну викликає суттєві ускладнення, і робить задачу надто громіздкою, окремі механізми опрацьовували по чергово.

**Обчислення кондуктивної теплопровідності.** Кондуктивна теплопровідність, враховуючи дані робіт [1–5], переважає інші механізми за ефективністю. Для її оцінки, випадковим чином згенеровано близько 20 прикладів мікроструктур, які можуть виступати варіантами представницьких об'ємів пресовок. Представницькі об'єми формувались у вигляді двовимірних прямокутних доменів з лінійними розмірами сторін, що коливались

в межах 30–80 мкм. Пори в представницьких доменах генерувались різної форми: круглі, прямокутні, ромбовидні, трикутні та п'ятикутні без дотримання їх ізоляції одна від одної. Розмір пор задавали таким, щоб їх кількість в домені була не менше 20–30. Товщину (пасивний параметр) домену обирали рівним  $\delta = 1$  мкм. Приклади модельних розрахункових доменів наведено на рис. 1. Для порівняння використовували розрахункові домени (реальні), одержані шляхом графічного оброблення зображень реальної пористої структури зразків, як показано на рисунку 2. Розміри реальних розрахункових доменів склали 30x30 мкм і мали товщину 1 мкм.

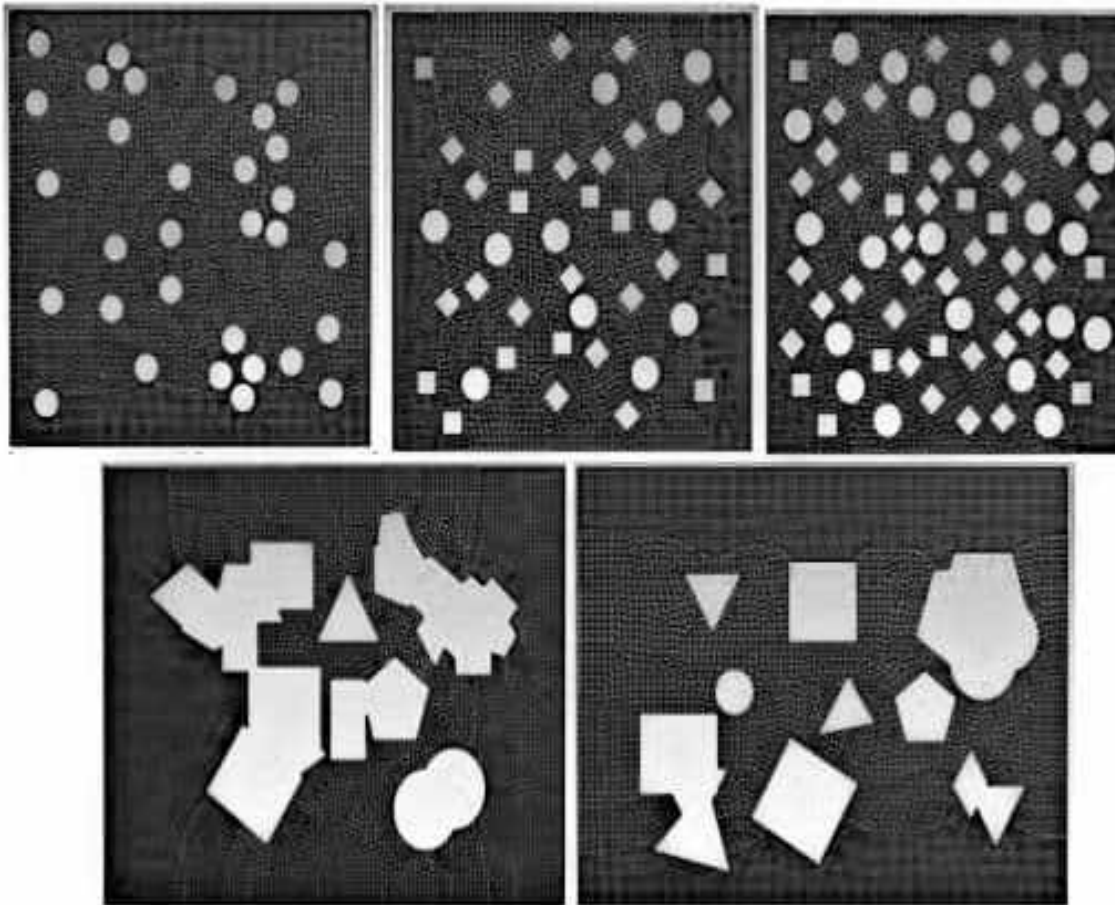


Рисунок 1 – Приклади модельних розрахункових доменів з обчисленим полем температур

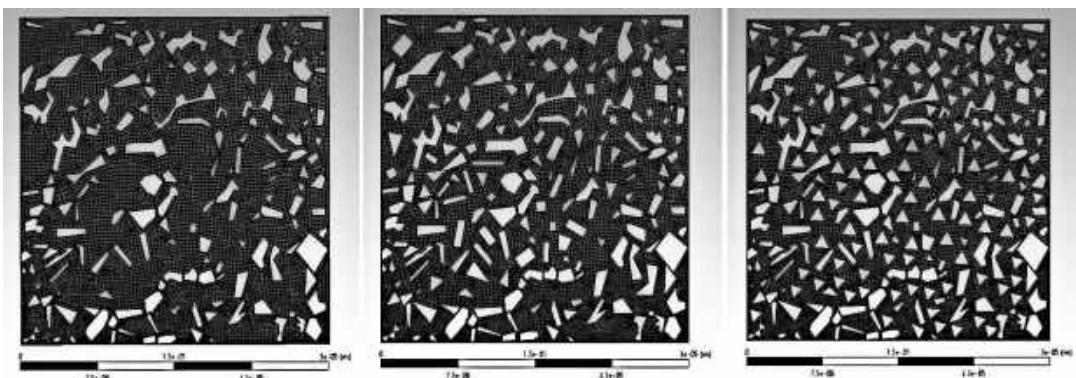


Рисунок 2 – Реальні розрахункові домени з обчисленим полем температур

Для усіх розрахункових доменів розв'язували пряму задачу теплопровідності в двох взаємо перпендикулярних напрямках: вертикальному та горизонтальному, та з використанням різних градієнтів температури в межах від 1 до 100  $^{\circ}\text{C}/\text{мкм}$ . Результатом

розв'язку прямої задачі є сумарний тепловий потік, який фіксувався на одній з поверхонь, з застосованими граничними умовами першого роду  $Q$ .

Теплопровідність домену для кожного випадку визначали, як результат оберненої задачі за формулою:

$$\lambda_i = \frac{Q_i \cdot l_i}{m_i \cdot \delta \cdot \Delta T_i},$$

де  $l, m$  – повздовжній та поперечний відносно напрямку перенесення тепла розміри домену відповідно, м;  $Q$  – сумарний тепловий потік через домен, Вт;  $\Delta T$  – різниця температур на протилежних сторонах домена, °С;  $\delta$  – товщина домена,  $1 \cdot 10^{-6}$  м.

Для врахування того, що використовується двовимірна модель розрахункового домену, за обчисленими значеннями теплопровідності домену для взаємно перпендикулярних напрямів ( $\lambda_1, \lambda_2$ ) знаходили ефективну кондуктивну теплопровідність:

$$\lambda_{eff}^c = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{ss}(T) \cdot (1 - \theta)}{3},$$

де  $\lambda_{ss}(T)$  – значення питомої теплоємності безпористого матеріалу за температури  $T$ , яка є середньою для розрахункового домену,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{°С}$ ;  $\theta$  – пористість, відн. од.

Графік залежності відносної питомої кондуктивної теплопровідності  $(\lambda_{eff}^c / \lambda_{ss})$  від пористості показано на рис. 3.

Як показано на графіку, розрахункові значення відносної питомої теплопровідності мають тим більший розкид, чим вище пористість розрахункового домену, що пов'язано з випадковим характером розташування пор в окремо взятій структурі. Це створює відповідний рівень невизначеності, який необхідно враховувати при використанні обчислених значень теплопровідності в реальних розрахунках.

**Обчислення теплопровідності випромінюванням.** Теплове випромінювання описується рівнянням Стефана-Больцмана, і у випадку теплопередачі між паралельними поверхнями може бути записане [10] як:

$$q = \varepsilon_n \cdot c_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (2)$$

де  $q$  – густина теплового потоку,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $c_0$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла,  $c_0 = 5.67 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}^4$ ;  $T_1, T_2$  – температури поверхонь, К;  $\varepsilon_n$  – нормалізована степінь чорноти в системі, що розраховується за значеннями степені чорноти протилежних поверхонь за формулою:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}.$$

Стосовно випадку, який розглядається в даній роботі значення степені чорноти  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  співпадають. Густина теплового потоку, обчислена за формулою (1) є максимально можливою для пари температур  $T_1$  та  $T_2$ . Якщо поверхні, між якими здійснюється теплоперенесення непаралельні чи криволінійні густина теплового потоку може зменшуватись [10].

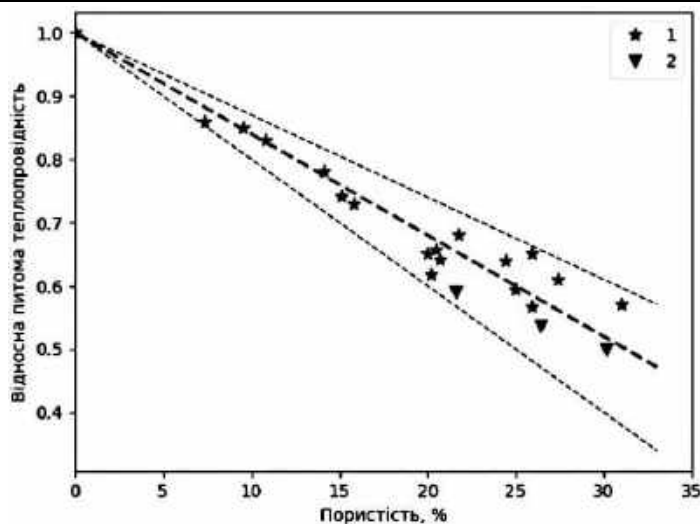


Рисунок 3 – Залежність відносної питомої теплопровідності від пористості зразку (1 – модельні домени, 2 – реальні домени)

З точки зору оцінки вкладу теплообміну випромінюванням в загальну ефективну теплопровідність пористого середовища необхідно оцінити її максимально можливі значення. На відміну від інших механізмів теплоперенесення, випромінювання суттєво залежить від температури. Для оцінки теплового потоку через окремо взятую пору з застосуванням додаткових моделей, обмежились наступними змінними моделі:

- розмір пор моделі складає від 2 до 25 мкм, що відповідає і дещо перевищує розмірам реальних пор в дослідних зразках і корелює з розміром часток порошку, з якого зразки виготовлено;

- значення градієнта температур від 50 до 1000 К/мм – відповідає і дещо перевищує значенням градієнта температури, обчисленим за додатковою моделлю нестационарного нагрівання зразків електронним променем з потужністю до  $10^7$  Вт/м<sup>2</sup> та пористістю зразків від 20 до 45 %;

- степінь чорноти матеріалу в межах 0.6 – 1.0, що відповідає реалістичним значенням для поверхні порошку молібдену;

- максимальна температура 2650 °С – близька до температури плавлення молібдену – максимальне значення температури, для якого доцільно проводити відповідні розрахунки.

Повний тепловий потік визначали за формулою (2) та з застосуванням скінченноелементної моделі, умовно показаної на рис. 4, яка забезпечує розрахунок теплового потоку виключно випромінюванням.

Результати обчислень дозволяють стверджувати, що значення теплового потоку випромінювання між двома поверхнями на відстані  $s$  (рис. 4) розраховані двома вказаними методами співпадають з точністю до 3-го знаку, за умови розгляду пори як ізольованого об'єкту – коли відсутнє випромінювання у відкритий простір. Якщо врахувати ймовірність випромінювання в простір, значення теплового потоку, за скінченноелементною моделлю зменшиться, що буде відповідати нижчому значенню питомої теплопровідності. Але оскільки необхідно оцінити максимально можливі щільності теплового потоку випромінюванням, то останнім варіантом можна знехтувати.

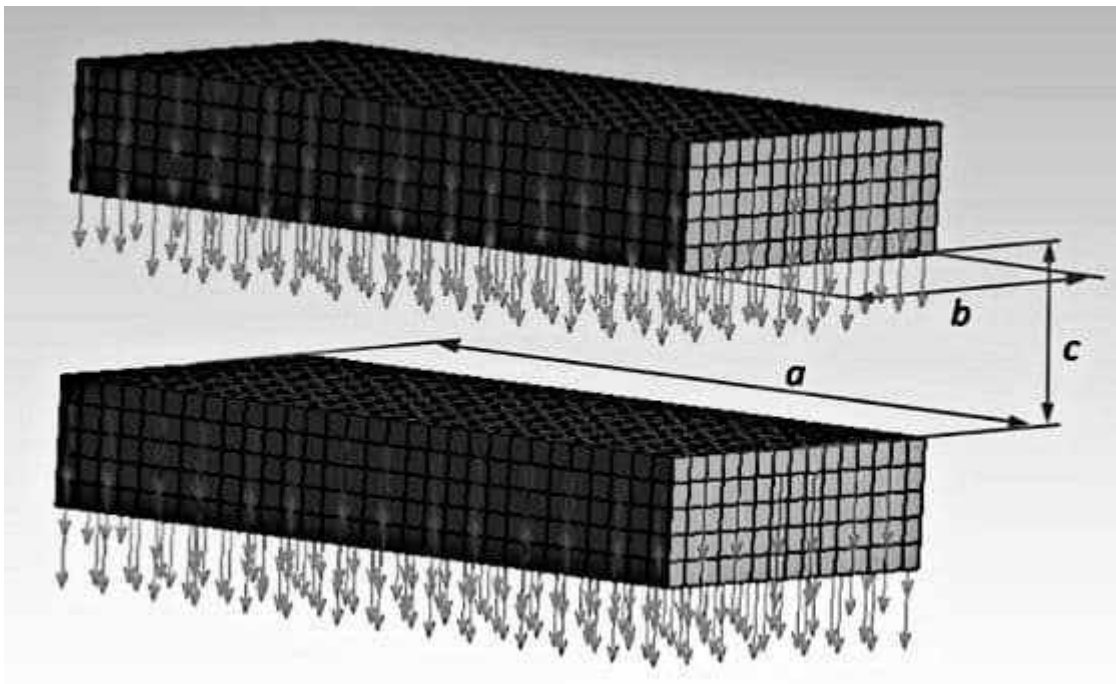
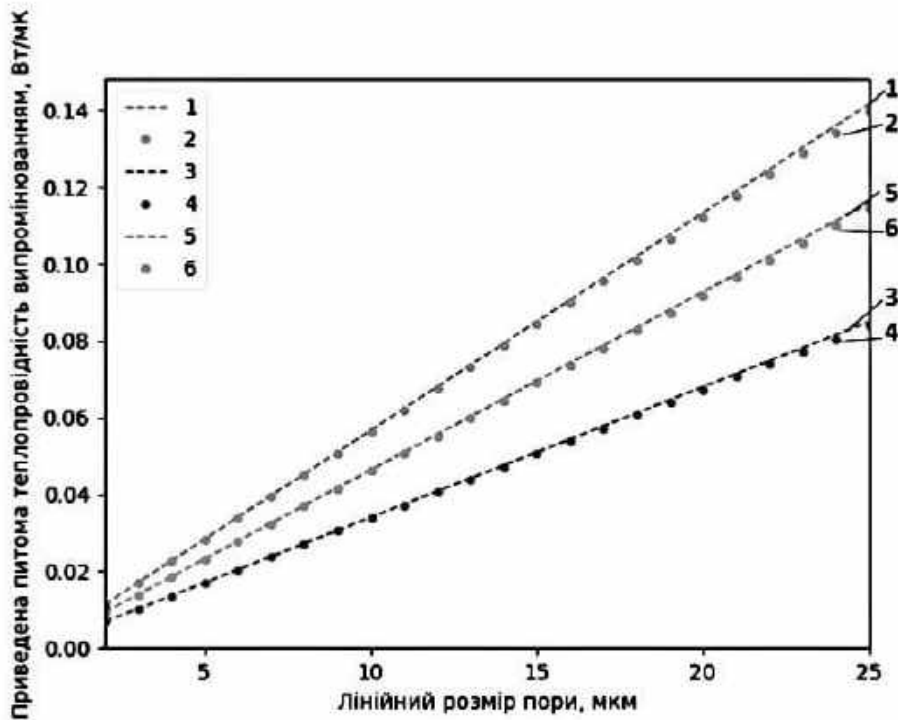


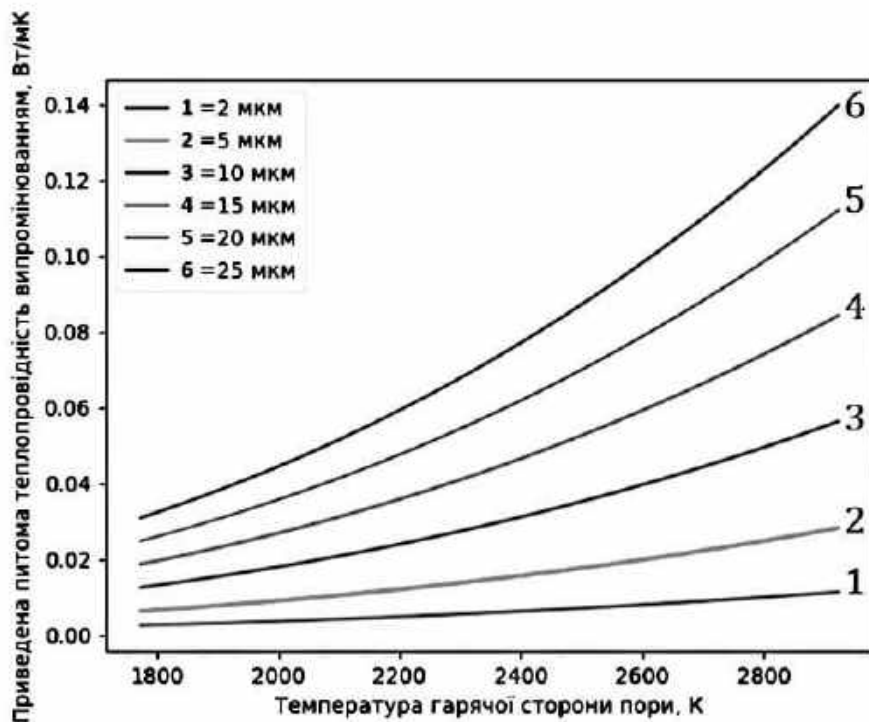
Рисунок 4 – Схема проведення розрахунків теплопровідності випромінюванням в середовищі ANSYS

Обчислені щільності теплових потоків було перераховано в значення питомої теплопровідності (Вт/м·К) і показано на графіках (рис. 5) .

Як показано, приведена питома теплопровідність випромінюванням практично не залежить від градієнта температури в досліджених межах. Основними параметрами, які впливають на показник теплопровідності випромінюванням є температура та коефіцієнт чорноти. За будь-яких умов, обчислені значення теплопровідності випромінюванням складають не більше ніж 0.5 % від значень кондуктивної теплопровідності пористої пресовки. Враховуючи сказане, в практичних розрахунках, теплопровідність випромінюванням через пору розміром 2-10 мкм можна ігнорувати. Одержані результати показують задовільне співпадіння з опублікованими раніше [6, 7, 8]. *Теплопровідність через газову фазу* зазвичай визначають за рівняннями конвекції [11], які опираються на плівковий коефіцієнт тепловіддачі. Однак для умов швидкісного нагрівання електронним променем характерний низький тиск ( $<10^{-1}$  Па), а значить – відсутність направлених потоків газу між стінками з різною температурою. Висока температура оточуючого матеріалу обумовлює часткову дисоціацію залишкових молекул газу, а можливість їх іонізації – рух обумовлений електромагнітним полем, що, скоріш за все, може погіршувати теплопровідність такого середовища. Екстраполяція табличних даних теплопровідності газів [12] на тиски та температури технологічного процесу спікання в умовах електронно-променевого нагріву дозволяє стверджувати, що теплопровідність залишкового газового середовища буде складати  $10^{-5}$ – $10^{-7}$  Вт/м·К, що не може впливати на сумарну теплопровідність пористого тіла, яка визначається за формулою (1).



а)



б)

Рисунок 5 – Залежність приведеної питомої теплоємності випромінюванням через пору від розміру пори (а) та від температури високотемпературної стороно пори для різного розміру пори (б).

Залежності 1, 3, 5 відповідають значенню градієнта температури 1000 К/мм, 2, 4, 6 – 10 К/мм; 1, 2 – коефіцієнт чорноти 1.0, 3,4 – коефіцієнт чорноти 0.75, 5, 6 – коефіцієнт чорноти 0.9; залежності рис.5 (б) – градієнт температури 1000 К/мм

**Висновки.** Таким чином, обгрунтовано застосування методу скінчених елементів для розрахунку питомої теплопровідності пористого середовища. Одержано коефіцієнти лінійної залежності відносної теплопровідності пористого тіла від пористості. Доведено, що за умов швидкісного нагріву у вакуумі при розмірі пор до 25 мкм, визначальну роль відіграє кондуктивна теплопровідність, вплив інших механізмів можна не враховувати.

Показано, що кондуктивна і сумарна теплопровідність пористого тіла може бути розрахована з деяким рівнем невизначеності, який зростає з ростом пористості виробу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sakae Yagi, Kunil Daizo. Studies on effective thermal conductivities in packed beds. *AIChE Journal*. 1957. Vol. 3. P. 373–381.
2. Argento C., Bouvard D. Modeling the effective thermal conductivity of random packing of spheres through densification. *Int. J. Heat Transfer*. 1996. Vol. 39, № 7. P. 1343–1350.
3. Jingwen Mo, Heng Ban. Measurement and theoretical modeling of effective thermal conductivity of particle beds under compression in air and vacuum. *Case Studies in thermal Engineering*. 2017. Vol. 10. P. 423–433.
4. W. van Antwerpen, Rousseau P. G., C. G. du Toit Multi-sphere. Unit Cell model to calculate the effective thermal conductivity in packed pebble beds of mono-sized. *Nuclear Engineering and Design*. 2012. Vol. 247. P. 183–201.
5. Yusuke Asakuma, Shinsuke Miyauchi, Tsuyoshi Yamamoto [et. al]. Homogenization method for effective thermal conductivity of metal hydride bed. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2004. Vol. 29. P. 209–216.
6. Yusuke Asakuma, Yushin Kanazawa, Tsuyoshi Yamamoto. Thermal radiation analysis of packed bed by a homogenization method. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 73. P. 97–102.
7. Yusuke Asakuma, Itsuro Honda, Tsuyoshi Yamamoto. Numerical analysis of effective thermal conductivity with thermal conduction and radiation in packed beds. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 114. P. 402–406.
8. Hao Wu, Nan Gui, Xingtuan Yang [et. al] Effect of scale on the modeling of radiation heat transfer in packed pebble beds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 101. P. 562–569.
9. Choi Y. S., Brockman R. A. Representation of Materials Constitutive Responses in Finite Element-Based Design Codes. *Computational Methods for Microstructure-Property Relationships*. Springer. 2010. P. 199–238.
10. Михеев М. А., Михеева М. И. Основы теплопередачи. Москва : Энергия, 1977. 344 с.
11. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Москва : Высшая школа, 1967. 600 с.
12. Физические величины : справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

### REFERENES

1. Yagi S., & Kunii D. (1957). Studies on effective thermal conductivities in packed beds. *AIChE Journal*, 3(3), 373–381. DOI:10.1002/aic.690030317.
2. Argento C., & Bouvard D. (1996). Modeling the effective thermal conductivity of random packing of spheres through densification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(7), 1343–1350. DOI:10.1016/0017-9310(95)00257-x
3. Mo J., & Ban H. (2017). Measurements and theoretical modeling of effective thermal conductivity of particle beds under compression in air and vacuum. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 423–433. DOI:10.1016/j.csite.2017.10.001
4. Antwerpen, W. V., Rousseau, P., & Toit, C. D. (2012). Multi-sphere Unit Cell model to calculate the effective thermal conductivity in packed pebble beds of mono-sized spheres. *Nuclear Engineering and Design*, 247, 183–201. DOI:10.1016/j.nucengdes.2012.03.012
5. Asakuma, Y. (2004). Homogenization method for effective thermal conductivity of metal hydride bed. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(2), 209–216. DOI:10.1016/s0360-3199(03)00106-x.



6. Asakuma, Y., Kanazawa, Y., & Yamamoto, T. (2014). Thermal radiation analysis of packed bed by a homogenization method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 73, 97–102. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.065.

7. Asakuma Y., Honda I., & Yamamoto T. (2017). Numerical analysis of effective thermal conductivity with thermal conduction and radiation in packed beds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 114, 402–406. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.083.

8. Wu H., Gui N., Yang X., Tu J., & Jiang S. (2016). Effect of scale on the modeling of radiation heat transfer in packed pebble beds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101, 562–569. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.090

9. Choi Y. S., & Brockman R. A. (2010). Representation of Materials Constitutive Responses in Finite Element-Based Design Codes. *Computational Methods for Microstructure-Property Relationships*, 199–238. DOI:10.1007/978-1-4419-0643-4\_6.

10. Mikheev M. A., & Mikheeva I. M. (1977). *Osnovy teploperedachi*. Moskva : «Energiia».

11. Lykov A. V. (1967). *Teoriya teploprovodnosti*. Moskva : «Vysshaya shkola».

12. Grigoriev I. S., & Meilikhov E. Z. (1991). *Fizicheskie velichiny : spravochnik*. Moskva : «Energoatomizdat».

**Степанов О. В., Романенко Ю. Н., Лобода П. И., Андриенко Ю. Е., Богомол Ю. И. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРИСТОГО ТЕЛА ДЛЯ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА**

Целью исследования является анализ поля температурного градиента, средствами математического моделирования для определения эффективной теплопроводности пористых заготовок из порошка молибдена в условиях электронно-лучевого нагрева.

Проанализированы вклад различных механизмов переноса тепла в условиях электронно-лучевого нагрева пористых заготовок. В результате исследования были получены коэффициенты линейной зависимости относительной теплопроводности пористого тела от пористости. Доказано, что в условиях скоростного нагрева в вакууме при размере пор до 25 мкм, определяющую роль играет кондуктивная теплопроводность, влияние других механизмов можно не учитывать. Показано, что кондуктивная и суммарная теплопроводность пористого тела может быть рассчитана с некоторым уровнем неопределенности, который растет с ростом пористости изделия.

Предложено проводить расчеты значение удельного теплопроводности пористого тела путем компьютерного моделирования с применением метода конечных элементов. Данный подход позволяет количественно и качественно оценить теплофизические параметры процесса спекания высокоэнергетическими источниками нагрева с учетом пористости порошковых тел.

Статья содержит подробный анализ тепловых эффектов, присущих процессу спекания, с построением математических моделей теплопередачи в пористой среде. Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологии электронно-лучевого спекания различных порошковых материалов, термообработке, оптимизации уже существующих процессов.

**Ключевые слова:** математическое моделирование; теплопроводность пористость; спекания; поле температурного градиента; электронно-лучевой нагрев.

**Stepanov O. V., Romanenko Yu. M., Loboda P. I., Andriienko Yu. Ye., Bogomol Iu. I. CALCULATION OF EFFICIENT THERMAL CONDUCTIVITY OF A POROUS BODY FOR ELECTRONIC HEATING CONDITIONS**

The aim of the study is to analyze the temperature gradient field by means of mathematical modeling to determine the effective thermal conductivity of porous blanks of molybdenum powder under conditions of electron beam heating.

The contribution of different heat transfer mechanisms in the conditions of electron beam heating of porous workpieces is analyzed. As a result of the study, the coefficients of the linear dependence of the relative thermal conductivity of the porous body on the porosity were obtained. It is proved that under conditions of high-speed heating in vacuum at a pore size of up to 25 μm, the determining role is played by conductive thermal conductivity, the influence of other mechanisms can be ignored. It is shown that the conductive and total thermal conductivity of a porous body can be calculated with some level of uncertainty, which increases with increasing porosity of the product.

It is proposed to calculate the value of the specific thermal conductivity of the porous body by computer simulation using the finite element method. This approach allows to quantitatively and qualitatively assess

*the thermophysical parameters of the sintering process by high-energy heat sources, taking into account the porosity of the powder bodies.*

*The article contains a detailed analysis of the thermal effects inherent in the sintering process, with the construction of mathematical models of heat transfer in a porous medium. The results of the study can be used in the development of electron-beam sintering technology of various powder materials, heat treatment, optimization of existing processes.*

**Keywords:** *mathematical modeling; thermal conductivity; porosity; sintering; temperature gradient field; electron beam heating.*

© Степанов О. В., Романенко Ю. Н., Лобода П. І., Андрієнко Ю. Є., Богомол Ю. І.

Статтю прийнято  
до редакції 22.06.20