

УДК 532.536

ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛООБМІНУ В ПЛАСКОМУ ПОРИСТОМУ МІКРОКАНАЛІ

Авраменко А.О., член-кореспондент НАН України, Дмитренко Н.П., канд. техн. наук,
Ковецька Ю.Ю., Кондратьєва О.О., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2020.1>

Представлені результати дослідження процесу теплообміну при змішаній конвекції в вертикальному плоскому мікроканалі, заповненому пористим середовищем. Показано вплив числа Кнудсена і пористості на коефіцієнти тепловіддачі і гідравлічного опору.

Представлены результаты исследования теплообмена при смешанной конвекции в вертикальном плоском микроканале, заполненном пористой средой. Показано влияние числа Кнудсена и пористости на коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления.

The results of studying the heat transfer into mixed convection in a vertical flat porous microchannel were presented. Effects of Knudsen number and porosity on heat transfer coefficient and the hydraulic resistance are shown.

Бібліографія 15, рис. 4.

Ключові слова: теплообмін, мікроканал, пористе середовище.

a – половина ширини каналу;
 A – градієнт температури на стінці;
 c_p – теплоємність при постійному тиску;
 D_e – еквівалентний діаметр каналу;
 d_p – діаметр пори;
 g – гравітаційне прискорення;
 K – проникливість;
 L – довжина вільного пробігу;
 p – тиск;
 q – тепловий потік;
 T – температура;
 u – швидкість;
 x, y – декартові координати;
 α – коефіцієнт теплопровідності;
 β – коефіцієнт температурного розширення;
 γ – коефіцієнт в'язкого проковзування;

μ – динамічна в'язкість;
 λ – коефіцієнт гідравлічного опору;
 ϕ – пористість;
 ρ – густина;
 Φ – різниця температур.

Безрозмірні параметри:

E – параметр градієнту тиску;
 Kn – число Кнудсена;
 M – параметр, враховуючий пористість середовища;
 Nu – число Нуссельта;
 Pr – число Прандтля;
 Ra – число Релея;
 U – безрозмірна швидкість;
 Y – безрозмірна координата;
 Θ – безрозмірна температура.

Пористі мікроканали знаходять своє застосування в мікроелектроніці, енергетиці, біомедицині [1-7]. В наслідку перспективності застосування мікросистем в різних галузях, інтерес багатьох дослідників спрямовано на вивчення процесів теплообміну при течії рідини в мікроканалах і мікропористих середовищах.

Результати дослідження змішаної конвекції в вертикальному мікроканалі з граничними умовами проковзування представлено в роботі [8]. Отримано співвідношення для профілів швидкості і температури та показано вплив чисел Кнудсена, Релея і Прандтля на параметри теплообміну.

В роботі [9] теоретично досліджено нестійкість течії рідини в плоскому пористому каналі. Проаналізовано залежність критичного числа Рейнольдса від пористості та проникливості пористого середовища.

Результати теоретичного та експериментального досліджень природної конвекції в циліндричному каналі представлено в роботі [10]. Вказано про труднощі, що виникають при спробі порівняти теоретичні та експериментальні результати.

На основі розробленої математичної моделі конвективного перенесу теплоти в мікроканальних теплообмінниках з розвинутою поверхнею теплообміну

проведено чисельне моделювання процесів гідродинаміки і теплообміну для різних конфігурацій мікроканальних вставок [11]. Отримано поля тисків, швидкостей течії, температур охолоджувача і матриці з монокристалів кремнію в широкому діапазоні витрат охолоджувача, визначені критеріальні залежності для числа Нуссельта, а також втрат тиску різних геометричних конфігурацій теплообмінників.

В роботі [12] показано результати теоретичного дослідження тепловіддачі в залежності від перепаду тиску в мікроканальних теплообмінниках. Розрахунки показали, що використання пористих вставок дозволяє підвищити коефіцієнт тепловіддачі. Результати розрахунків з урахуванням проковзування дають більш високі значення коефіцієнта тепловіддачі в порівнянні з результатами розрахунків без урахування проковзування.

В статті розглянуто особливості теплообміну при течії теплоносія в вертикальному обігріваному мікроканалі, заповненому пористим середовищем.

Математична модель

Згідно з роботою [13] в діапазоні зміни чисел Кнудсена $10^{-3} \leq \text{Kn} \leq 10^{-1}$ течію в мікроканалах можливо описувати системою рівнянь Нав'є - Стокса з використанням граничних умов проковзування на стінках. Розглядається одно температурна модель, коли температура теплоносія та пористої матриці вважається однаковою.

Вирішується задача теплообміну при розвиненому плинні в вертикальному плоскому пористому мікроканалі, ширина якого $2a$. Вісь x розташована по центру каналу і спрямована вгору за течією, вісь y перпендикулярно до неї. Математична модель, що описує сталу течію і теплообмін в плоскому вертикальному пористому мікроканалі, включає рівняння нерозривності, руху та енергії у вигляді [14]

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0,$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\mu}{K} u + \rho g \beta (T - T_w), \quad (1)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (2)$$

де проникливість K визначається через пористість за формулою Козені [14]

$$K = \frac{d_n^2 \phi^3}{180(1-\phi)^2}.$$

Рівняння руху (1) відрізняється від класичного наявністю члену, що враховує лінійний опір Дарсі. На стінках каналу, що обігриваються, задається закон зміни температури стінки у вигляді $T_w = Ax$ [15], де A - постійний градієнт температури. Так як для повністю розвиненого ламінарного потоку профіль температури в плоскому каналі також змінюється лінійно вздовж вісі x , то різниця температур теплоносія та стінки не буде залежить від продольної координати, тобто

$$T - T_w = \phi(y). \quad (3)$$

Тоді граничні умови з урахуванням проковзування на стінці для швидкості та різниці температур запишуться у вигляді

$$u = \gamma L \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \phi = \frac{\gamma L}{\text{Pr}} \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad \text{при} \quad y = -a, \quad (4)$$

$$u = -\gamma L \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \phi = -\frac{\gamma L}{\text{Pr}} \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad \text{при} \quad y = a. \quad (5)$$

Запишемо рівняння (1), (2) у безрозмірному вигляді за допомогою наступних безрозмірних параметрів.

$$Y = \frac{y}{a}, \quad U = \frac{u}{E}, \quad \theta = \frac{\alpha \phi}{A a^2 E},$$

де

$$E = \left(-\frac{dp}{dx} \right) \frac{a^2}{\mu}.$$

В результаті отримаємо

$$\frac{d^2 U}{dY^2} + \text{Ra} \theta - MU = -1, \quad (6)$$

$$\frac{d^2 \theta}{dY^2} - U = 0. \quad (7)$$

$$\text{де } M = (\text{Da})^{-1/2}, \text{ Da} = \frac{K}{a^2} - \text{число Дарсі,}$$

$$\text{Ra} = \frac{g \beta \rho a^4 A}{\alpha \mu} - \text{число Рейля.}$$

Граничні умови (4), (5) в безрозмірній формі записуються у наступному вигляді

$$U = \text{Kn} \frac{dU}{dY}, \quad \theta = \frac{\text{Kn}}{\text{Pr}} \frac{d\theta}{dY} \quad \text{при} \quad Y = -1, \quad (8)$$

$$U = -\text{Kn} \frac{dU}{dY}, \quad \theta = -\frac{\text{Kn}}{\text{Pr}} \frac{d\theta}{dY} \quad \text{при} \quad Y = 1, \quad (9)$$

де $\text{Pr} = \frac{\mu}{\alpha\rho}$ – число Прандтля, $\text{Kn} = \gamma L/a$ – число Кнудсена.

Двічі диференціюючи по Y рівняння (7), та виключаючи швидкість за допомогою рівняння (6), отримаємо

$$\frac{d^4\theta}{dY^4} + \text{Ra} \theta - M \frac{d^2\theta}{dY^2} = -1. \quad (10)$$

З урахуванням граничних умов (8), (9) рішення рівняння (10) запишеться у вигляді

$$\begin{aligned} \theta = & -\frac{1}{\text{Ra}} + C_1 \cosh\left(b \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) + C_2 \cosh\left(b \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) + \\ & C_3 \cosh\left(n \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) + C_4 \cosh\left(n \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) + C_1 \sinh\left(b \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) - \\ & C_2 \sinh\left(b \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) + C_3 \sinh\left(n \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) - C_4 \sinh\left(n \frac{Y}{\sqrt{2}}\right). \end{aligned} \quad (11)$$

В результаті, з рівняння (7), отримаємо залежність для профілю швидкості

$$\begin{aligned} U = & \frac{1}{2} b^2 C_2 \left(\cosh\left(b \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) - \sinh\left(b \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) \right) + \\ & \frac{1}{2} b^2 C_1 \left(\cosh\left(b \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) + \sinh\left(b \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) \right) + \\ & \frac{1}{2} n^2 C_4 \left(\cosh\left(n \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) - \sinh\left(n \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) \right) + \\ & \frac{1}{2} n^2 C_3 \left(\cosh\left(n \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) + \sinh\left(n \frac{Y}{\sqrt{2}}\right) \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Тут C_1, C_2, C_3, C_4 є константами інтегрування,

$$b = \sqrt{M - \sqrt{M^2 - 4\text{Ra}}}, \quad n = \sqrt{M + \sqrt{M^2 - 4\text{Ra}}}.$$

При течії теплоносія в вільному каналі ($M = 0$) рішення (11), (12) зводяться до відповідних рішень, отриманих в роботі [8].

Розглянемо вплив параметрів процесу на коефіцієнт тепловіддачі. Визначимо число Нуссельта через середню масову температуру

$$\text{Nu} = \frac{q_w 4a}{(T_m - T_w) \alpha c_p \rho}$$

де середня масова температура T_m визначається як

$$T_m = \frac{\int_{-a}^a T u dy}{\int_{-a}^a u dy}.$$

Розглянемо також гідравлічний опір, який описується рівнянням Дарсі-Вейсбаха

$$\frac{\Delta p}{l} = \lambda \frac{\rho u_m^2}{2D_e},$$

де u_m – середня масова швидкість.

$$u_m = \frac{1}{2a} \int_{-a}^a u dy$$

Результати розрахунків

На рис. 1 показана динаміка зміни профілю швидкості в мікроканалі для різних чисел Kn і параметра M , що враховує пористість середовища при $\text{Ra} = 1$; $\text{Pr} = 1$. Рисунок 1(а) відповідає течії без проковзування на стінці ($\text{Kn} = 0$). Збільшення числа Кнудсена призводить до збільшення швидкості в центральній частині каналу та стрибка швидкості на стінці каналу.

Зі збільшенням параметру пористості M (зменшенням проникливості) швидкість потоку зменшується, а профіль швидкості стає більш заповненим. Також при цьому зменшується стрибок швидкості на стінці. Однак форма профілю швидкості залежить не тільки від числа Кнудсена і M , а й від числа Релея. Розрахунки показали, що зі збільшенням значення числа Релея відносна швидкість потоку зменшується, стрибок швидкості на

стіни також зменшується. Отже, ефекти мікротечій більш яскраво виражені переважно при впливі вимушеної конвекції.

Рис. 2 демонструє вплив числа Кнудсена та параметра пористості M на профілі температури. Аналогічно профілю швидкості збільшення Kn викликає стрибки температури на стінці, збільшення параметру пористості M призводить до вирівнювання температурного профілю. Локальні температури потоку в поперечному перетині каналу прагнуть до температури стінки, а скачки температури на стінці зменшуються.

Розрахунки показали, що величина температурного скачка на стінці також залежить від числа Прандтля. Для більш високих чисел Прандтля скачок температури на стінці слабшає, що впливає з граничних умов (8), (9). Це ослаблення температурного скачка є нелінійним. Для чисел Прандтля $Pr > 5$ величина температурного скачка залишається майже незмінною.

На рис.3 показано вплив числа Кнудсена та параметра M на нормоване число Нуссельта Nu/Nu_0 , де Nu_0 – число Нуссельта при $Kn=0$. Для всіх комбінацій критеріїв Ra , Kn та M збільшення числа Кнудсена знижує

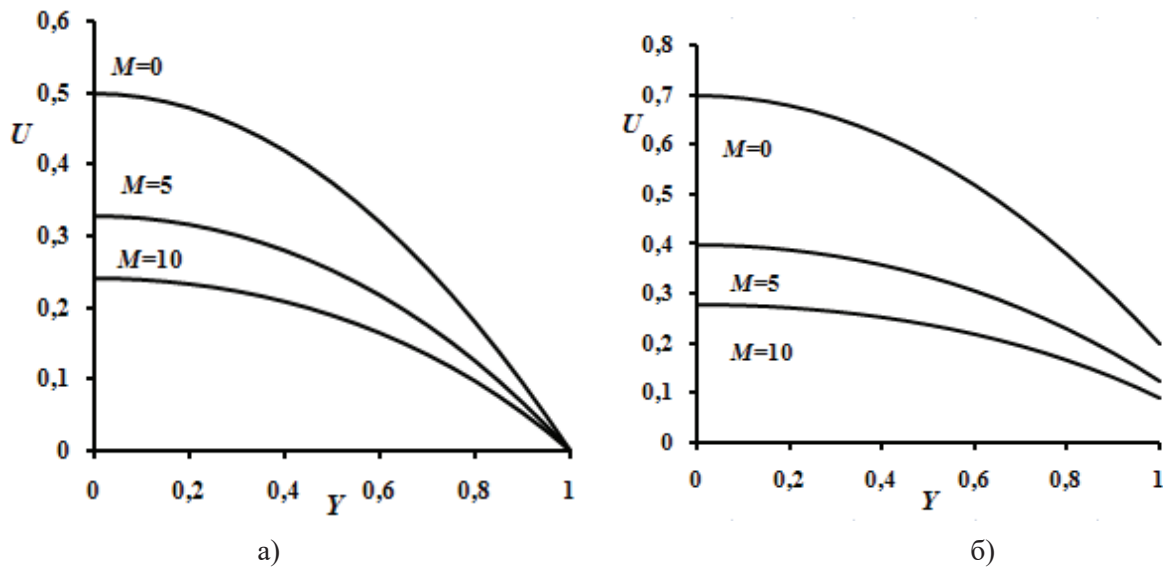


Рис.1. Вплив параметра M на профіль швидкості при: а) $Kn = 0$, б) $Kn = 0.05$.

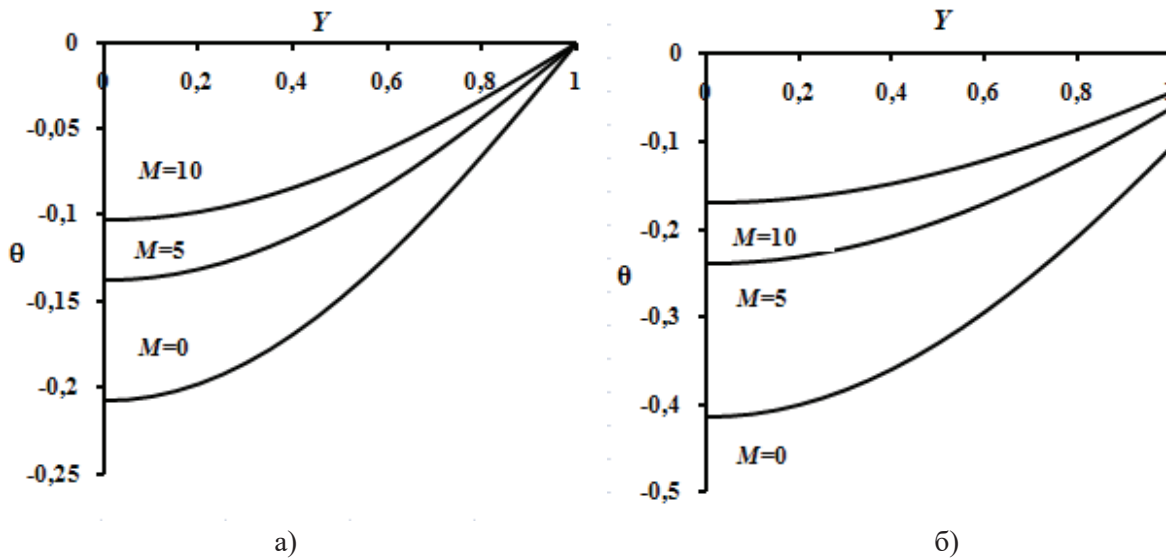


Рис. 2. Вплив параметра M на профіль температури: а) $Kn = 0$, б) $Kn = 0.05$ при: $Pr = 1$, $Ra=1$

інтенсивність теплообміну. Це пов'язано зі збільшенням температури на стінці, що викликає погіршення умов теплової взаємодії між рідиною та стінкою. Динаміка зміни відносного числа Нуссельта з ростом числа Релея показує, що існує інверсія впливу пористості на коефіцієнт тепловіддачі. При малих значеннях Ra зі збільшенням параметру пористості M коефіцієнт тепловіддачі збільшується, оскільки скачок температури на стінці зменшується.

Збільшення числа Релея спричиняє збільшення швидкості біля стінки, що супроводжується інтенсифі-

кацією теплопередачі. Це є причиною того, що теплова взаємодія в цих умовах нечутлива щодо ефектів проковзування.

Результати розрахунків для нормованого коефіцієнта гідравлічного опору λ/λ_0 представлено на рис. 4.

Як видно з рисунку в міру збільшення числа Кнудсена гідравлічний опір зменшується і зростає зі збільшенням параметру пористості M . Однак, для більш високих чисел Релея спостерігається ослаблення ефекту проковзування та збільшення градієнту швидкості на стінці. Тому, починаючи з певних значень числа Релея, інтенсивність падіння гідравлічного опору зменшується.

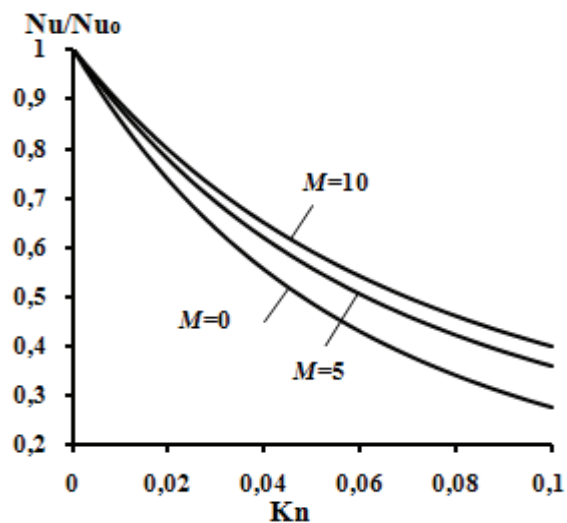


Рис. 3. Нормоване число Нуссельта Nu/Nu_0 при $Ra = 1$.

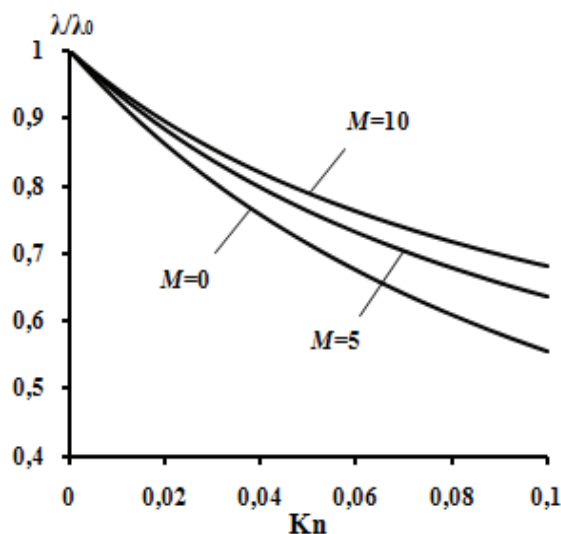


Рис. 4. Нормований коефіцієнт гідравлічного опору λ/λ_0 при $Ra = 1$.

Робота виконана за фінансової підтримки програми наукових досліджень НАН України «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок», 2020 – 2021 р. Проект «Розроблення науково-технічних засад інтенсифікації тепломасообміну в пористих середовищах для матеріалів будівельних конструкцій та теплоенергетичного обладнання».

Висновки

Розглянуто сталий процес теплообміну при змішаній конвекції в пласкому вертикальному мікроканалі, заповненому пористим середовищем.

Результати моделювання показали, що вплив числа Кнудсена є більш значим поблизу стінки де збільшення K_n супроводжується збільшенням стрибків швидкості та температури на стінках каналу. Зі збільшенням параметру пористості M (зменшенням проникливості) швидкість потоку зменшується, стрибок швидкості на стінці також зменшується.

Для всіх комбінацій критеріїв K_n , M , Ra збільшення числа Кнудсена зменшує інтенсивність передачі теплоти. Це пояснюється збільшенням температурного стрибка на стінці, що призводить до погіршення теплової взаємодії рідини зі стінками.

Для малих чисел Ra збільшення параметру M призводить до збільшення тепловіддачі, оскільки стрибок температури на стінці зменшується. Для великих чисел Ra навпаки, оскільки зі збільшенням параметра M швидкість біля стінки зменшується.

Для низьких чисел Ra зі збільшенням числа Кнудсена коефіцієнт гідравлічного опору зменшується, але зі збільшенням параметру M збільшується. При високих числах Ra збільшення числа Кнудсена призводить до збільшення гідравлічного опору, що обумовлено збільшенням градієнту швидкості на стінці.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jun Jie Liu, Hua Zhang, S. C. Yao, Yubai Li. Porous Media Modeling of Two-Phase Microchannel Cooling of Electronic Chips With Nonuniform Power Distribution. *Journal of Electronic Packaging*. – 2014. – V.136, № 2. – 021008.
2. Коновалов Д.А. Экспериментальные исследования тепломассопереноса в микроканальных теплообменных элементах. *Инженерно-физический журнал*. – 2016. – Т. 89, № 3. – С. 625 – 631.
3. Власов М.Н., Корсун А.С., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Рачков В.И., Харитонов В.С. Определенные параметров интегральной модели турбулентности

применительно к расчёту обтекания стержневых сборок в приближении пористого тела. *Теплофизика и аэромеханика*. – 2016. – Т.23, № 2. – С. 209 – 218.

4. Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. A minimal hydrodynamic model for a traffic jam in an axon. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2009. – V.36, №1. – P. 1 – 5.

5. Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. Stability analysis of bioconvection of gyrotactic motile microorganisms in a fluid saturated porous medium. *Transport in porous media*. – 2003. – V. 53, №1. – P. 95 – 104.

6. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. The onset of convection in a suspension of gyrotactic microorganisms in superimposed fluid and porous layers: effect of vertical throughflow. *Transport in porous media*. – 2006. – V. 65, №2. – P. 159 – 176.

7. Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. A 2D analysis of stability of bioconvection in a fluid saturated porous medium—estimation of the critical permeability value. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2002. V. 29, № 2. P. 175 – 184.

8. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P., Kravchuk A.V., Shevchuk V.I. Mixed convection in a vertical flat microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – № 106. – P. 1164 – 1173.

9. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Basok B.I., Blinov D.G. Investigation of stability of a laminar flow in a parallel-plate channel filled with a fluid saturated porous medium. *Physics of Fluids*. – 2005. – V.17, №9. – P. 094102–1 – 094102 – 6.

10. Vargas M., Sierra F.Z., Ramos E., Avramenko A.A. Steady natural convection in a cylindrical cavity. *International communications in heat and mass transfer*. – 2002. – V.29, №2. – P. 213 – 221.

11. Коновалов Д.А. Моделирование теплогидравлических характеристик микроканальных теплообменных элементов на основе матрицы монокристаллов К. «Наука. ИННоваЦИИ. ТехНологИИ». – 2017. – № 3. – С.29-40

12. Maziar Dehghan, Mohammad Sadegh Valipour, Seyfolah Saedodin. Microchannels enhanced by porous materials: Heat transfer enhancement or pressure drop increment. *Energy Conversion and Management*. – 2016. – № 110. – P. 22–32.

13. Gad-el-Hak M. The fluid mechanics of microdevices, *J. Fluids Engineering*, 1999, V. 121, №1, P.5 – 33.

14. Nield D.A., Bejan A. *Convection in Porous Media*. Springer Science, USA. – 2006. – 640p.

15. Tao, L.N. On combined free and forced convection in channels. *J. Heat Transfer*. –1960. – 82(3). –P. 233–238.

FEATURES OF HEAT TRANSFER IN A FLAT POROUS MICROCHANNEL

Avramenko A.A., Dmitrenko N.P., Kovetska Yu.Yu., Kondratieva E.A

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03680, Ukraine<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2020.1>

A steady heat transfer process of mixed convection in a flat vertical porous microchannel is considered.

The results of simulation showed that Knudsen number effects are more significant in the neighborhood of the wall where growth of Knudsen numbers is accompanied with the velocity and temperature jumps on wall. With increasing parameter of porosity M (decreasing permeability), the flow velocity decreases and the velocity jump decrease as well.

For all combinations of the criteria Ra , Kn and M increasing Knudsen number reduces heat transfer intensity. This can be attributed to increasing temperature jump on wall which causes deterioration of thermal interaction between the fluid and the wall.

For low Rayleigh numbers increasing parameter M leads to increasing heat transfer since the temperature jump decrease on walls. For large Rayleigh numbers the trend becomes reversed, since for larger parameters M , the near-wall velocity decreases.

For low Rayleigh numbers increasing the Knudsen number leads to decreasing hydraulic resistance coefficient, but with increasing parameter M leads to increasing this coefficient. At high Ra numbers increasing Knudsen number leads to growth of hydraulic resistance, which is due to increasing velocity gradient on the wall.

References 15, figures 4.

Key words: heat transfer, microchannel, porous medium.

1. Jun Jie Liu, Hua Zhang, S. C. Yao, Yubai Li. Porous Media Modeling of Two-Phase Microchannel Cooling of Electronic Chips With Nonuniform Power Distribution. *Journal of Electronic Packaging*. 2014. V.136, № 2. 021008.

2. Konovalov D.A. Experimentalnye issledovaniya teplomassoperenosa v mikrokanalnykh teploobmennykh elementakh [Experimental studies of heat and mass transfer in microchannel heat exchange elements], *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering Physical Journal], 2016, V. 89, № 3, P. 625–631. (Rus.)

3. Vlasov M.N., Korsun A.S., Maslov Yu.A., Merinov I.G., Rachkov V.I., Kharitonov V.S. Opredelenie parametrov integralnoy modeli turbulentsnosti primenitelno k raschetu obtakanija sterzhnevnykh sborok v priblizhenii poristogo tela [Determination of the parameters of the integral turbulence model in relation to the calculation of flow around the rod

assemblies in the porous body approximation], *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and aeromechanics], 2016, V. 23, №2, P. 209–218. (Rus.)

4. Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. A minimal hydrodynamic model for a traffic jam in an axon. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2009. V.36, №1. P. 1–5.

5. Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. Stability analysis of bioconvection of gyrotactic motile microorganisms in a fluid saturated porous medium. *Transport in porous media*. 2003. V. 53, №1. P. 95–104.

6. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. The onset of convection in a suspension of gyrotactic microorganisms in superimposed fluid and porous layers: effect of vertical throughflow. *Transport in porous media*. 2006. V. 65, №2. P. 159–176.

7. Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. A 2D analysis of stability of bioconvection in a fluid saturated porous medium-estimation of the critical permeability value. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2002. V. 29, № 2. P. 175–184.

8. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P., Kravchuk A.V., Shevchuk V.I. Mixed convection in a vertical flat microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. № 106. P. 1164–1173.

9. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Basok B.I., Blinov D.G. Investigation of stability of a laminar flow in a parallel-plate channel filled with a fluid saturated porous medium. *Physics of Fluids*. 2005. V.17, №9, P. 094102–1 – 094102 – 6.

10. Vargas M., Sierra F.Z., Ramos E., Avramenko A.A. Steady natural convection in a cylindrical cavity. *International communications in heat and mass transfer*. 2002. V.29, №2. P. 213–221.

11. Konovalov D.A. Modelirovanie teplogidravlicheskih karakteristik mikrokanalnyh teploobmennykh elementov na osnove matricy monokristallov [Modeling the thermohydraulic characteristics of microchannel heat exchange elements based on a single crystal matrix], *K, «Nauka. Innovacii. Tehnologii»* [K. "The science. INNOVATION. Technology"]. 2017. № 3. P. 29-40 (Rus.)

12. Maziar Dehghan, Mohammad Sadegh Valipour, Seyfolah Saedodin. Microchannels enhanced by porous materials: Heat transfer enhancement or pressure drop increment. *Energy Conversion and Management*. 2016. № 110. P. 22–32.

13. Gad-el-Hak M. The fluid mechanics of microdevices, *J. Fluids Engineering*. 1999. V. 121. №1. P.5–33.

14. Nield D.A., Bejan A. *Convection in Porous Media*. Springer Science, USA. 2006. 640p.

15. Tao, L.N. On combined free and forced convection in channels. *J. Heat Transfer*. 1960. 82(3). P. 233–238.

Отримано 15.01.2020

Received 15.01.2020