УДК 532.536

ТЕПЛООБМІН ПРИ ТЕЧІЇ ТЕПЛОНОСІЯ В ВЕРТИКАЛЬНОМУ ПОРИСТОМУ МІКРОКАНАЛІ

Авраменко А.О., член-кореспондент НАН України, Ковецька М.М., канд. техн. наук,
Ковецька Ю.Ю., канд. техн. наук, Сорокіна Т.В., канд. техн. наук.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. М. Капніст 2а, м. Київ 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2020.3>

Представлено результати дослідження процесу теплообміну при змішаній конвекції в вертикальному пористому мікроканалі. Дана оцінка впливу параметрів середовища на теплообмін при сталому русі теплоносія.

Представлены результаты исследования процесса теплообмена при смешанной конвекции в вертикальном пористом микроканале. Дана оценка влияния параметров среды на теплообмен при стационарном течении теплоносителя.

The results of a study of the heat transfer process during mixed convection in a vertical porous microchannel are presented. The influence of environmental parameters on heat transfer in a stationary coolant flow is considered.

Бібл. 20, рис. 3.

Ключові слова: теплообмін, мікроканал, пористе середовище.

A – градієнт температури на стінки;

c_p – теплоємність при постійному тиску;

d_n – діаметр пори;

g – гравітаційне прискорення;

K – проникливість;

L – довжина вільного пробігу;

p – тиск;

q – тепловий потік;

T – температура;

u – швидкість;

r, z – циліндричні координати;

r_0 – радіус каналу;

α – коефіцієнт теплопровідності;

β – коефіцієнт температурного розширення;

γ – коефіцієнт в'язкого проковзування;

μ – динамічна в'язкість

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;

R – безрозмірна координата;

Θ – безрозмірна температура.

Вступ

Для ефективного охолодження компактних технічних систем таких, як малогабаритні генератори теплової енергії, мікророзмірні радіоелектронні прилади, необхідно вивчення теплофізичних процесів в мікроканалах і пористих середовищах [1-4]. Використання мікроканальних теплообмінних елементів заповнених пористим середовищем, що мають високе значення коефіцієнту тепловіддачі, дозволяє підвищити ефективність охолодження високоенергетичних пристроїв без збільшення їх розмірів.

В роботі [5] розглянуто теплообмін в мікроканальному теплообмінному елементі з нитковидних монокристалів кремнію при ламінарній течії теплоносія та двох температурної моделі теплообміну. Дано співставлення результатів чисельного моделювання з експериментальними даними. Показано, що середня температура теплоносія більш залежить від його швидкості і менш від геометрії матриці пористого тіла, а середня температура матриці визначається теплопровідністю матеріалу і частково інтенсивністю теплообміну з теплоносієм. Результати роботи дозволяють оцінити ефективність мікроканальних теплообмінних елементів.

У роботі [6] експериментально досліджений теплообмін систем охолодження лазерних дзеркал з пористої вставкою. Отримані дані узагальнені для декількох систем охолодження з різними пористими елементами.

Для охолодження мікроелектронного обладнання розробляються мініатюрні теплові трубки і мікроканальні системи охолодження з двофазним теплоносієм [7,8]. Дослідження процесів теплообміну при течії двофазних теплоносіїв через пористі середовища актуальні для різних інженерних додатків в геотермальних системах, системах поховання ядерних відходів, системах зберігання і транспорту теплової енергії. В роботі [7] представлений огляд публікацій з моделювання течії рідини і газу в пористих мікроканалах для різних енергетичних систем. Розглянуто чотири напрямки застосування цих пристроїв в енергетичному секторі: пристрої для перетворення електрокінетичної енергії; мембранне опріснення води за допомогою зворотного осмосу; сланцеві колектори і зберігання водню. Дано рекомендації для подальшого поліпшення моделювання конвективних і дифузійних процесів в пористих середовищах мікро- і нанорозміру.

Результати дослідження змішаної конвекції в вертикальному мікроканалі з граничними умовами проковзування представлено в роботі [9]. Надано співвідношення для профілів швидкості і температури та проаналізовано вплив чисел Кнудсена, Релея и Прандтля на параметри теплообміну.

В роботі [10] показано результати теоретичного дослідження тепловіддачі в мікроканальних теплообмінниках в залежності від перепаду тиску. Розрахунки показали, що використання пористих вставок дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт тепловіддачі. Результати розрахунків з урахуванням ефекту проковзування дають більш високі значення коефіцієнта тепловіддачі в порівнянні з результатами розрахунків без урахування ефекту проковзування.

Результати теоретичного дослідження нестійкості течії рідини в пористому каналі наведено в роботах [11,12]. Проаналізовано залежність критичного числа Рейнольдса від пористості та проникності пористого середовища. Авторами роботи [13] надано результати порівняння експериментальних та теоретичних досліджень природної конвекції в циліндричному каналі. Надано рекомендації щодо способу представлення теоретичних результатів для адекватного порівняння їх з експериментальними.

Велика увага в біомедицині надається вивченню процесів біоконвекції в пористому середовищі [14-16], транспорту внутрішньоклітинних органел в мікроканалах [17]. В роботах [14,16] представлено результати моделювання біоконвекції рухливих мікроорганізмів в пористому середовищі. Отримано аналітичне рішення для критичної проникності пористого середовища в залежності від параметрів біоконвекції.

Згідно з даними роботи [18] в діапазоні зміни чисел Кнудсена $10^{-3} \leq Kn \leq 10^{-1}$ течію в мікроканалах можливо описувати системою рівнянь Нав'є - Стокса з використанням граничних умов проковзування на стінках. Виходячи з цього, в статті представлено математичну модель та результати дослідження теплообміну в пористому мікроканалі на основі одно температурної моделі теплообміну, згідно якої температури теплоносія та пористої матриці вважаються однаковими.

Математична модель

Розглядаються процеси теплообміну в вертикальному циліндричному пористому мікроканалі радіусом r_0 при повністю розвиненій стаціонарній течії теплоносія. Вісь z розташована в середині каналу і спрямована вгору в напрямку руху, вісь r перпендикулярно до неї. Математична модель включає систему рівнянь нерозривності, руху та енергії. Згідно підходу Бусінеска вільна конвекція враховується зміною щільності теплоносія тільки при визначенні під'ємної сили в рівнянні руху. Рівняння руху також включає член, що враховує опір Дарсі, обумовлений пористістю середовища. В результаті система рівнянь в циліндричних координатах записується у вигляді [19]

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

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

$$u \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (3)$$

де проникливість K визначається через пористість за формулою [19]

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

На стінки каналу задається температура, яка змінюється по довжині каналу за лінійним законом $T_w = Az$ [20], де A – постійний градієнт температури. Для повністю розвинутого ламінарного потоку профіль температури в каналі також змінюється лінійно вздовж вісі z , тому різниця температур теплоносія та стінки не буде залежить від координати z , тобто

$$T - T_w = \phi(r). \quad (4)$$

Таким чином, граничні умови з урахуванням проковзування на стінки запишуться у вигляді

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \quad \text{при} \quad r = 0, \quad (5)$$

$$u = -\gamma L \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \phi = -\frac{\gamma L}{Pr} \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad \text{при} \quad r = r_0. \quad (6)$$

Перепишемо рівняння (2),(3) у безрозмірному вигляді за допомогою наступних безрозмірних параметрів

$$R = \frac{r}{r_0}, \quad U = \frac{u}{E}, \quad \theta = \frac{\alpha \phi}{Ar_0^2 E},$$

де

$$E = \left(-\frac{dp}{dz} \right) \frac{r_0^2}{\mu}.$$

В результаті отримаємо систему безрозмірних рівнянь руху та енергії у вигляді

$$\frac{d^2 U}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{dU}{dR} + Ra \theta - MU = -1, \quad (7)$$

$$\frac{d^2 \theta}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{d\theta}{dR} - U = 0, \quad (8)$$

де

$$Da = \frac{K}{r_0^2} - \text{число Дарсі}, \quad M = (Da)^{-1/2},$$

$$Ra = \frac{g \beta \rho r_0^4 A}{\alpha \mu}, \quad Pr = \frac{\mu}{\alpha \rho}.$$

Граничні умови (5), (6) в безрозмірному вигляді запишуться

$$\frac{dU}{dR} = 0, \quad \frac{d\theta}{dR} = 0 \quad \text{при} \quad R = 0, \quad (9)$$

$$U = -Kn \frac{dU}{dR}, \quad \theta = -\frac{Kn}{Pr} \frac{d\theta}{dR} \quad \text{при} \quad R = 1, \quad (10)$$

де $Kn = \gamma L / a$ – число Кнудсена.

Рішення системи рівнянь (7), (8) з граничними умовами (9), (10) отримано чисельно з використанням програми «Wolfram Mathematica».

Рис. 1. Вплив параметра M на профіль швидкості при: $Kn = 0,1$, $Pr = 1$; а) $Ra = 1$, б) $Ra = 800$.

Результати розрахунків

Результати розрахунків впливу параметру пористості, чисел Релея на профілі швидкості та температури показано на рис. 1, 2.

З рис.1 видно, що зі збільшенням значення параметра M (зменшенням проникливості) швидкість потоку зменшується, профіль швидкості стає більш заповненим, значення стрибка швидкості на стінці падає. Зі збільшенням числа Релея відносна швидкість потоку зменшується, змінюється форма профілю швидкості, він стає M -подібний. При високих значеннях чисел Релея вплив вільної конвекції стає переважаючим і зсув максимуму швидкості до стінки каналу пов'язано зі зменшенням щільності середовища поблизу стінки.

Дослідження впливу числа Релея на профіль температури в мікроканалі показали (рис. 2), що зі зростанням числа Ra , і параметра M стрибок температури на стінці зменшується, локальні значення температури прагнуть до температури стінки, форма профілю температури вирівнюється.

Розглянемо вплив параметрів процесу на коефіцієнт тепловіддачі, визначив число Нуссельта через середню масову температуру T_m

$$Nu = \frac{q_w 2r_0}{(T_m - T_w) \alpha c_p \rho}.$$

На рис. 3 показано вплив чисел Кнудсена, Релея 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 інтенсивність теплообміну. Це пов'язано зі збільшенням стрибка 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 параметру пористості M на коефіцієнт тепловіддачі. При малих значеннях Ra зі збільшенням параметра M коефіцієнт тепловіддачі збільшується, оскільки скачок температури на стінці зменшується. При $Ra = 400$ вплив пористості не спостерігається. При великих значеннях Ra швидкість падіння тепловіддачі зменшується, тому що зменшується швидкість потоку поблизу стінки.

Висновки

Розглянуто теплообмін при сталій течії теплоносія в вертикальному циліндричному мікроканалі, заповненому пористим середовищем. Проаналізовано вплив пористості, ефекту проковзування на стінці та числа Релея на теплообмін.

Результати моделювання показали, що зі збільшенням параметру пористості M (зменшенням проникливості) швидкість потоку зменшується, стрибок швидкості на стінці також зменшується, профіль швидкості стає більш заповненим.

Зі збільшенням числа Релея відносна швидкість потоку зменшується, змінюється форма профілю швидкості, він стає M -подібним. При високих значеннях чисел Релея вплив вільної конвекції стає переважаючим, а зсув максимуму швидкості до стінки каналу пов'язано зі зменшенням густини середовища поблизу стінки. При зростанні числа Релея, і параметра M стрибок

Рис. 2. Вплив параметра M на профіль температури при: $Kn = 0,1$, $Pr = 1$, а) $Ra = 1$, б) $Ra = 800$.

Рис. 3. Нормоване число Нусельта Nu/Nu_0 : а) $Ra = 1$, б) $Ra = 400$.

температури на стінки зменшується, локальні значення температури прагнуть до значень температури стінки, форма профілю температури вирівнюється.

Збільшення числа Кнудсена знижує інтенсивність теплообміну. Це пов'язано зі збільшенням стрибка температури на стінці, що викликає погіршення умов теплової взаємодії між рідиною та стінкою.

Динаміка зміни відносного числа Нусельта з ростом числа Релея показує, що існує інверсія впливу параметра пористості M на коефіцієнт тепловіддачі. При малих значеннях Ra зі збільшенням параметра M коефіцієнт тепловіддачі збільшується, оскільки скачок температури на стінці зменшується. При $Ra = 400$ вплив пористості не спостерігається. При великих значеннях Ra швидкість падіння тепловіддачі зменшується, тому що зменшується швидкість потоку поблизу стінки.

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».

ЛІТЕРАТУРА

1. Коновалов Д.А., Дроздов И.Г., Шматов Д.П., Дахин С.В., Кожухов Н.Н. Разработка и моделирование микроканальных систем охлаждения. Воронеж: Воронежский государственный технический университет. – 2013.

2. Дилевская Е.В., Каськов С.И., Шевич Ю.А., Станкевич И.В. Теплообмен и гидродинамика в каналах противоточных микротеплообменников различных конструкций. Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену. М.: Издательский дом МЭИ. – 2006, т.6. – С.207–210

3. Коновалов Д.А., Лазаренко И.Н., Кожухов Н.Н., Дроздов И.Г. Разработка методов интенсификации теплообмена в микроканальных теплообменниках гибридных систем термостабилизации. Вестник Воронежского государственного университета. – 2016. – Т.12, №3. – С. 21–30.

4. Дзюбенко Б.В., Кузьма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И., Федик И.И., Холпанов Л.П. Интенсификация тепло- массообмена на макро- микро- и наномасштабах. Москва ФГУП «ЦНИИАТОМИНТОРМ». 2008

5. Коновалов Д.А., Рязских В.М., Лазаренко И.Н., Кожухов Н.Н. Модель охлаждения компактных поверхностей микроканальными рекуперативными теплообменниками с матрицей из нитевидных монокристаллов кремния. Инженерно-Физический журнал. – 2019. – т.92, №2. – С.371–380.

6. Шанин Ю.И. Теплоотдача компактных систем охлаждения лазерных зеркал. Тепловые процессы в технике. М.: Наука и технологии. – 2015. – №4. – С. 166 – 171.

7. Singh H., Myong R.S. Critical Review of Fluid Flow Physics at Micro- to Nano-scale Porous Media Application in the Energy Sector. Advances in Materials Science and Engineering. – 2018. Volume 1. – P.1–31.

8. Dhir V.K. Boiling and two-phase flow in porous media. Annu. Rev. Heat Transfer. – 1994. – 5. – P.303–350.

9. 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.
10. Dehghan M., Valipour M.S., Saedodin S. Microchannels enhanced by porous materials: Heat transfer enhancement or pressure drop increment. Energy Conversion and Management. – 2016. – № 110. – P. 22–32.
11. 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.
12. Avrameko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P. Dean instability of nanofluids with radial temperature and concentration nonuniformity, Physic of fluids. – 2016. – Vol. 28, P. 034104-1 – 0.4104-16.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Gad-el-Hak M. The fluid mechanics of microdevices, J. Fluids Engineering. –1999. –V. 121, №1. – P.5 – 33.
19. Nield D.A. and Bejan A. Convection in Porous Media. - 4th Edition, New York: Springer. – 2013. – 640 p.
20. Tao, L.N. On combined free and forced convection in channels. J. Heat Transfer. –1960. – 82(3). –P. 233–238.

HEAT TRANSFER DURING HEAT CARRIER FLOW
IN A VERTICAL POROUS MICROCHANNELAvramenko A.A., Kovetskaya M.M., Kovetska Yu.Yu.,
Sorokina T.V.*Institute of Engineering Thermophysics, National Academy
of Sciences of Ukraine, 2a, Kapnist str., Kiev 03680,
Ukraine*<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2020.3>

Heat transfer with a steady flow of coolant in a vertical microchannel filled with a porous medium is considered. The influence of porosity, the slippage effect on the wall, and the Rayleigh number on heat transfer are analyzed.

The simulation results showed that with an increasing of the porosity parameter M (decrease permeability), the flow velocity decreases, the velocity jump on the wall also decreases, and the velocity profile becomes more filled. With an increase in the Rayleigh number, the relative flow velocity decreases, the shape of the velocity profile changes, it becomes M -shaped. At high Rayleigh numbers, the effect of free convection becomes predominant, and the shift of the maximum velocity to the channel wall is associated with a decrease in the density of the medium near the wall.

With an increase in the Rayleigh number and the parameter M , the temperature jump on the wall decreases, local temperature values tend to the wall temperature values, the shape of the temperature profile aligns.

An increase in the Knudsen number decreases the heat transfer rate. This is due to an increase in the temperature jump on the wall, which causes degradation in the conditions of thermal interaction between the liquid and the wall.

The dynamics of change of the relative Nusselt number with increasing Rayleigh number shows that there is an inversion of the influence of the porosity parameter M on the heat transfer coefficient. With small values of Ra , with an increase in the parameter M , the heat transfer coefficient increases, since the temperature jump on the wall decreases. At $Ra = 400$, the effect of porosity is not observed.

At high values of Ra , the intensity of heat transfer decreases but not so sharply as at low of Ra . That effect is caused from decreasing rate flow near the wall.

References 20, figures 3.

Key words: heat transfer, microchannel, porous medium.

1. Kononov D.A., Drozdov I.G., Shmatov D.P., Дахин С.В., Козухов Н.Н. Razrabotka i modelirovanie mikrokanalnykh sistem ohlazhdeniya [Development and modeling microchannel systems of cooling], Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennuy tekhnicheskii universitet [Voronezh: Voronezh National Technical University], 2013. (Rus)

2. Dilevskaya E.V., Kaskov S.I., Shevich Yu.A., Stankevich I.V. Teploobmen i gidrodinamika v kanalah protivotochnykh mikroteploobmennikov razlichnykh konstruytsiy. [Heat exchange and hydrodynamics in channels of counter flow microheatexchangers of different constructions], Trudy Chetvertoy Rossiyskoy Natsionalnoy Konferentsii po Teploobmeny [Works of Fourth Russian National Heat Exchange conference]. M. Izdatelsiy Dom MEI [M. Publishing house MEI], 2006, V.6, P.207–210 (Rus)

3. Kononov D.A., Lazarenko I.N., Kozuhov N.N., Drozdov I.G., Razrabotka metodov intensivifikatsii teploobmena v mikrokanalnykh teploobmennikakh gibridnykh sistem termostabilizatsii [Development of methods for intensifying heat exchange in microchannel heat exchangers of hybrid thermal stabilization systems], Vestnik Voronezhskogo universiteta [Bulletin of Voronezh State University], 2016, V.12, №3, P.21 – 30. (Rus).

4. Dzyubenko B.B., Kuzma-Kitcha Yu.A., Leontev A.I., Fedik I.I. Holpanov L.P. Intensifikatsiya teplo- i massoobmena na macro i nanomashtabah [Intensification heat and mass exchange on micro- and nanoscale] Moskva FGUP “TsNIIATOMINFORM” [Moskov FGUP “TsNIIATOMINFORM”]. 2008. (Rus)

5. Kononov D.A., Ryagshkih B.M., Lazarenko I.N., Kozuhov N.N. Model ohlaghdeniya kompaktnykh poverhnostey mikrokanalnykh rekuperativnykh teploobmennikami s matritsey iz nitevidnykh monokristalov kremnia [The model of cooling compact surfaces by macrochannels recuperators with matrix of filiform monokristals of silicon] Ingenerno-Fizicheskii zhurnal [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 2019, V.92, №2, P.371–380 (Rus)

6. Shanin Yu.I. Teplootdacha kompaktnykh sistem ohlaghdeniya lazernykh zerkal [Heat transfer of compact cooling systems of laser mirrors] M. Nauka i tekhnologii [M. Science and Technology]. 2015, №.4, P. 166 – 171. (Rus)

7. Singh H., Myong R.S. Critical Review of Fluid Flow Physics at Micro- to Nano-scale Porous Media Application in the Energy Sector. Advances in Materials Science and Engineering. 2018. V. 1, P.1–31.

8. Dhir V.K. Boiling and two-phase flow in porous media. Annu. Rev. Heat Transfer. 1994. 5. P.303–350.

9. 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.

10. Dehghan M., Valipour M.S., Saedodin S. Microchannels enhanced by porous materials: Heat transfer enhancement or pressure drop increment. Energy Conversion and Management. 2016. № 110. P. 22–32.

11. *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.
12. *Avrameko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P.* Dean instability of nanofluids with radial temperature and concentration nonuniformity, *Physic of fluids*. – 2016. – Vol. 28, P. 034104-1 – 0.4104-16.
13. *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.
14. *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.
15. *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.
16. *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.
17. *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.
18. *Gad-el-Hak M.* The fluid mechanics of microdevices, *J. Fluids Engineering*. 1999. V. 121, №1. P.5 – 33.
19. *Nield D.A. and Bejan A.* *Convection in Porous Media*. - 4th Edition, New York: Springer. 2013. 640P.
20. *Tao, L.N.* On combined free and forced convection in channels. *J. Heat Transfer*. 1960. 82(3). P. 233–238.

Отримано 21.01.2020

Received 21.01.2020