

АНОТАЦІЯ

Ковецька Ю.Ю. Тепломасообмін, гідродинаміка та нестійкість в пористих середовищах та мікроканалних пристроях. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – «Теплоенергетика». - Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню теплогідродинамічних процесів в пористих середовищах та в пористих мікроканалних системах різної геометрії.

Запропоновано аналітичні та чисельні методи моделювання теплофізичних процесів в пористих мікросистемах. Підхід суцільного середовища використано з урахуванням граничних умов проковзування першого та другого порядку, що дозволяє розширити діапазон використання числа Кнудсена. Метод ґрат Больцмана (LBM) застосований для плоских і круглих мікроканалів з урахуванням пористості та умов проковзування. Використовуючи метод ренормалізаційних груп, розвинена мікроскопічна модель турбулентності для пористих середовищ. На основі цієї моделі, виведено вираз для ефективної кінематичної в'язкості з урахуванням пористості середовища. Метод збурень використано для вивчення гідродинамічної та теплової нестійкості. Зазначену аналітичну методику адаптовано для аналізу нестійкості, які виникають при врахуванні різних фізичних та геометричних умов (пористість, проковзування, та інше).

Наведено результати дослідження гідродинамічної нестійкості течії в пористому середовищі на основі тривимірних лінійних збурень та в пористих мікроканалах на основі двовимірних лінійних збурень. Показано збільшення критичних значень числа Рейнольдса зі збільшенням проковзування та зменшенням пористості, що зумовлено зростанням ступеню заповнення профілю швидкості. Визначено критерій нестійкості течії з урахуванням нелінійних ефектів, який

дозволив знайти граничне значення пористості, при якому може розвинутих турбулентність. Досліджено гідродинамічну нестійкість потоку з проковзуванням в криволінійному пористому мікроканалі між двома нерухомими концентричними циліндрами. Розрахунки показали, що збільшення коефіцієнта проковзування, пористості середовища і ширини каналу призводить збільшення заповненості профілю швидкості незбуреного потоку. Це, в свою чергу, призводить до збільшення критичних значень числа Діна і критичної довжини хвилі збурення, які визначають критерії нестійкості для потоку.

Досліджено гідродинаміку та теплообмін при змішаній конвекції в вертикальному, пласкому та циліндричному мікроканалах з пористою структурою враховуючи граничні умови проковзування першого порядку. Вплив числа Кнудсена більш виражений в пристінній області, в центральній частині каналу переважає вплив числа Релея. При малих числах Релея зменшення пористості інтенсифікує теплопередачу, а при великих значеннях числа Релея тенденція змінюється на протилежну. Ефекти мікротечій більше виражені при вимушеній конвекції. Причому в круглому каналі ця тенденція відчутніша тому, що в круглому каналі рідина стикається зі стінкою по всьому поперечному перерізу, тоді як в пласкому каналі тільки дві стінки контактують з рідиною, що значно послаблює вплив вільної конвекції. Порівняння аналітичних результатів з чисельними результатами на основі методу ґрат Больцмана показало розбіжність менше 1%.

Проведено аналітичні та чисельні дослідження теплообміну і гідродинаміки при примусовій конвекції в вертикальному пласкому та циліндричному пористих мікроканалах с граничними умовами проковзування другого порядку. Зменшення пористості викликає посилення теплопередачі. При високих числах Прандтля стрибок температури на стінці практично вироджується, що призводить до збільшення швидкості передачі тепла зі збільшенням числа Кнудсена. При малих числах Прандтля вплив параметрів другого порядку не спостерігався.

В цілому в роботі показано, що запропоновані чисельні та аналітичні методи моделювання дозволяють враховувати та аналізувати вплив ряду фізичних та геометричних параметрів на теплообмін та гідродинаміку в мікропористих

структурах. Також вони дають змогу визначати режими течії в зазначених мікроструктурах. Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні та створенні нових мікроканалних систем, а також дають змогу оптимізувати найефективніші режимні робочі параметри вже існуючих систем.

Ключові слова: чисельне моделювання, аналітичне моделювання, теплообмін, гідродинаміка, пористість, мікроканал, проковзування.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Авраменко А. А., Дмитренко Н. П., Ковецкая Ю. Ю. Неустойчивость потока в пористом микроканале. Промислова теплотехніка. 2017. Т. 39. № 1. С. 13 – 16. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PTT_2017_39_1_3 [фахове видання].

(Вклад здобувача – постановка задачі, вибір і адаптація математичних моделей та проведення чисельних розрахунків, узагальнення та аналіз результатів).

2. Avramenko A. A., Dmitrenko N. P., Kovetskaya Y. Y. Linear and nonlinear instability of flow in channel occupied porous media. Промислова теплотехніка. 2017. Т. 39. № 3. С. 40 – 46. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/142360> [фахове видання]. *(Вклад здобувача – постановка задачі, проведення аналітичних розрахунків, вибір і адаптація математичних моделей та проведення чисельних розрахунків, узагальнення та аналіз результатів).*

3. Авраменко А.А, Ковецкая Ю.Ю. Теплообмен и гидродинамика при смешанной конвекции в пористом микроканале. Промислова теплотехніка. 2017. Т.39. №4. С.33 – 38. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/142374> [фахове видання]. *(Вклад здобувача – постановка задачі, вибір і адаптація математичних моделей та проведення аналітичних розрахунків, узагальнення та аналіз результатів).*

4. Ковецкая Ю.Ю. Эффект числа Прандтля на теплообмен в круглом пористом микроканале. Промислова теплотехніка. 2018. Т.40, №1, С. 21 – 26. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/142460> [фахове видання]. *(Вклад здобувача – постановка задачі, вибір і адаптація математичних моделей та проведення чисельних розрахунків, узагальнення та аналіз результатів).*

5. Ковецкая Ю.Ю., Скицько А.И., Сорокина Т.В. Неустойчивость проскальзывающего потока в пористом криволинейном микроканале. Промислова теплотехніка. 2018. Т.40, №3, С. 20 – 25. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PTT_2018_40_3_4 [фахове видання]. *(Вклад здобувача – постановка задачі, вибір і адаптація математичних моделей та проведення чисельних розрахунків, узагальнення та аналіз результатів).*

6. Avramenko A. A., Kovetska Yu. Yu., Shevchuk I. V., Tyrinov A. I., Shevchuk V. I. Mixed Convection in Vertical Flat and Circular Porous Microchannels. Transport in Porous Media. 2018. Volume 124, Issue 3. P. 919 – 941. DOI:[10.1007/s11242-018-1104-4](https://doi.org/10.1007/s11242-018-1104-4) (Impact factor of Clarivate analytics (Web of Science) - 2.211). [іноземне видання; **Міжнародні науко метричні бази: Scopus, ISI Web of Science**]. *(Вклад здобувача – постановка задачі, проведення аналітичних розрахунків, вибір і адаптація математичних моделей та проведення чисельних розрахунків, узагальнення та аналіз результатів).*

7. Ковецкая Ю.Ю. Оценка длины проскальзывания при течении жидкости микроканалах. Промышленная теплотехника. 2018. Т.40, №3. С. 13 – 21. <http://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/download/283/227/> [фахове видання]. *Вклад здобувача (Вклад здобувача – аналіз впливу проковзування при течії в мікроканалах).*

8. Avramenko A. A., Kovetska Yu. Yu., Shevchuk I. V., Tyrinov A. I., Shevchuk V. I. Heat Transfer in Porous Microchannels with Second-Order Slipping Boundary Conditions. Transport in Porous Media. 2019. Volume 129, Issue 3. P. 673 – 699. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09517-x>. (Impact factor of Clarivate analytics (Web of Science) - 1.997) [іноземне видання; Міжнародні наукометричні бази: **Scopus, ISI Web of Science**]. *(Вклад здобувача – постановка задачі, проведення аналітичних розрахунків, вибір і адаптація математичних моделей та проведення чисельних розрахунків, узагальнення та аналіз результатів).*

9. Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Kovetskaya M. M., Kovetska Yu. Yu. Darcy-Brinkman-Forchheimer Model for Film Boiling in Porous Media. Transport in porous media. – 2020. V. 134. – P. 503 – 536. **DOI** [10.1007/s11242-020-01452-7](https://doi.org/10.1007/s11242-020-01452-7). (Impact factor

of Clarivate analytics (Web of Science) - 2.376. [іноземне видання; Міжнародні наукометричні бази: **Scopus, ISI Web of Science**]. *(Вклад здобувача – участь в розробці математичної моделі теплообміну в пористому середовищі, аналіз результатів та висновки)*

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

10. Авраменко А. А., Ковецкая М. М., Кравчук А. В., Ковецкая Ю. Ю. Перспективные исследования инновационных технологий ядерных энергетических установок. Промислова теплотехніка. 2016. Т.38, №4. С.47 – 62. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PTT_2016_38_4_8 [фахове видання]. *(Вклад здобувача – аналіз інноваційних технологій ядерних енергетичних установок).*

11. Авраменко А. А., Ковецкая М. М., Ковецкая Ю. Ю., Кравчук А. В., Олейник Л. В. Теплообмен при течении воды сверхкритического давления в тепловыделяющей сборке в нестационарных режимах. Промислова теплотехніка. 2016. Т.38, №5. С.59 – 68. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/142306> [фахове видання]. *(Вклад здобувача – участь в розробці математичної моделі теплообміну при надкритичному тиску, аналіз чисельних розрахунків).*

12. Ковецкая М.М., Кондратьева Е.А., Ковецкая Ю.Ю., Кравчук А.В., Скицько А.И., Сорокина Т.В. Режимы ухудшенного теплообмена при течении воды сверхкритического давления в каналах с пучками стержней. Ядерная энергетика та докілья. 2016. №1(7). С.26 – 32. [фахове видання]. *(Вклад здобувача – участь в розробці математичної моделі погіршеного теплообміну, аналіз чисельних розрахунків).*

13. Авраменко А. А., Ковецкая М. М., Кравчук А. В., Ковецкая Ю. Ю. Теплофизические исследования для оценки безопасности перспективных ядерных энергетических установок. Ядерна та радіаційна безпека. 2017. № 2. С. 14 –19. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/129892>. [вітчизняне видання; Міжнародні наукометричні бази: **Scopus**]. *(Вклад здобувача – аналіз теплофізичних досліджень з безпеки ЯЕУ).*

14. Авраменко А.А., Дмитренко Н.П., Ковецкая М.М., Ковецкая Ю.Ю. Влияние проницаемости шаровой засыпки на теплообмен в активной зоне ядерного реактора с гелиевым теплоносителем. Промышленная теплотехника. 2017. Т.39. №1. С. 55 – 60. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PTT_2017_39_4_9. [фахове видання]. *(Вклад здобувача – участь в розробці математичної моделі теплообміну в пористому середовищі, аналіз результатів та висновки)*.

15. Авраменко А.А., Ковецкая М.М., Дмитренко Н.П., Ковецкая Ю.Ю. Исследование процессов теплообмена в модели активной зоны ядерного реактора с гелиевым теплоносителем. Ядерна та радіаційна безпека. 2017. № 4. С. 144 – 149. [вітчизняне видання; Міжнародні наукометричні бази: **Scopus**]. *(Вклад здобувача - участь в розробці математичної моделі та методу розрахунку теплообміну в пористому середовищі, аналіз результатів та висновки)*.

16. Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Moskalenko A. A., Lohvynenko P. N., Kovetska Yu. Yu. Instability of a vapor layer on a vertical surface at presence of nanoparticles. Applied Thermal Engineering. 2018. V.139. P. 87 – 98. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.113>. (Impact factor of Clarivate analytics (Web of Science) – 3.771). [іноземне видання; Міжнародні наукометричні бази: **Scopus, ISI Web of Science**]. *(Вклад здобувача – постановка задачі, проведення аналітичних розрахунків, вибір і адаптація математичних моделей та проведення чисельних розрахунків, узагальнення та аналіз результатів)*.

17. Авраменко А.А., Ковецкая М.М., Тыринов А.И., Ковецкая Ю.Ю. Характеристики закризисного теплообмена при пленочном кипении наножидкостей на вертикальной обогреваемой стенке. Ядерна та радіаційна безпека. 2018. №4(80). С.30 – 36. <https://nuclear-journal.com/index.php/journal/article/download/118/137/>. [вітчизняне видання; Міжнародні наукометричні бази: **Scopus**]. *(Вклад здобувача – аналіз математичних моделей закризового теплообміну, результати розрахунків, висновки)*

18. Avramenko A. A., Dmitrenko N. P., Kravchuk A. B., Kovetskaya Yu. Yu., Tyrinov A. I. Hydrodynamics of a Nonstationary Flow in a Microcylinder Beginning Sudden Rotation. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018. Vol. 91,

№.6. pp 1452 – 1462. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1880-2>. [іноземне видання; Міжнародні наукометричні бази: **Scopus**]. *(Вклад здобувача – постановка задачі, проведення аналітичних розрахунків, вибір і адаптація математичних моделей та проведення чисельних розрахунків, узагальнення та аналіз результатів)*.

19. Авраменко А.А., Дмитренко Н.П., Кравчук А. В., Ковецкая Ю.Ю., Тыринов А.И Гидродинамика нестационарного потока в микроцилиндре при внезапном начале вращения. Инженерно-физический журнал. 2018. Т.91, №.6. С.1526–1536. https://eposlink.com/ru/catalog/library/elibrary/book/inzhenerno-fizicheskiy_zhurnal-2126/publication/139353/ [іноземне видання; Міжнародні наукометричні бази: **Scopus**]. *Вклад здобувача - (Вклад здобувача – постановка задачі, проведення аналітичних розрахунків, вибір і адаптація математичних моделей та проведення чисельних розрахунків, узагальнення та аналіз результатів)*.

20. Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Dmitrenko N .P., Kovetska Yu. Yu., Tyrinov A. I. Unsteady theory of heat transfer and fluid flow during instantaneous transition to film boiling. International Journal of Thermal Sciences. 2020. V. 153. P.106345. – 10. DOI:[10.1016/j.ijthermalsci.2020.106345](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106345) [іноземне видання; Міжнародні науко метричні бази: **Scopus, ISI Web of Science**]. *(Вклад здобувача – участь у проведенні чисельних розрахунків, узагальнення та аналіз результатів)*.

ANNOTATION

Kovetska Yu.Yu. Heat transfer, hydrodynamics and instability in a porous media and microchannel devices. – Qualifying scientific work on the basis of handwriting.

Dissertation for a PhD degree on specialty 144 – «Power engineering». - Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the research of thermohydrodynamic processes in porous media and in porous microchannel systems of different configuration.

Analytical and numerical methods for modeling thermophysical processes in porous microsystems are proposed. The continuous medium approach is used taking into account the boundary conditions of slippage for the first and the second order, which allows expanding the range of use of the Knudsen number. The Boltzmann lattice method (LBM) is applied to flat and round microchannels taking into account the porosity and slip conditions. Using the method of renormalization groups, a microscopic model of turbulence for porous media was developed. Based on this model, the equation for the effective kinematic viscosity is derived, taking into account the porosity of the medium. The perturbation method was used to study hydrodynamic and thermal instability. This analytical technique is adapted for the analysis of instability, which taking into account different physical and geometric conditions (porosity, slippage, etc.).

The results of hydrodynamic instability studding flow in a porous medium based on three-dimensional linear perturbations and in porous microchannels based on two-dimensional linear perturbations are presented. Increase in the critical values of the Reynolds number with increasing slippage and decrease in porosity due to an increase in the degree of filling of the velocity profile is shown. The instability criterion is determined taking into account nonlinear effects, which allowed to find the limit value of porosity at which turbulence can develop. The hydrodynamic instability of the flow with slippage in a curved porous microchannel between two fixed concentric cylinders is investigated. Calculations have shown that increasing the slippage coefficient, the porosity of the medium and the width of the channel leads to an increase in the filling of the undisturbed of velocity profile. It leads to an increase in the critical values of the Dean number and the critical wavelength of the perturbation, which determine the instability criteria for the flow.

Fluid flow and heat transfer during mixed convection in vertical flat and cylindrical microchannels with a porous structure have been studied taking into account the boundary conditions of first - order slippage. The influence of the Knudsen number is more pronounced in the wall area, in the central part of the channel the influence of the Rayleigh number prevails. At small Rayleigh numbers, the decrease in porosity intensifies heat transfer, and at large values of the Rayleigh number, the trend changes to the

opposite. The effects of microflows are more pronounced in case of forced convection. Moreover, in the circular channel this tendency is more noticeable because in the circular channel the liquid is in contact with the wall across the entire cross section, while in the flat channel only two walls are in contact with the liquid, which significantly weakens the effect of free convection. Comparison of analytical results with numerical results based on the Boltzmann lattice method showed a discrepancy of less than 1%.

Analytical and numerical researches of heat transfer and fluid flow at forced convection in vertical flat and cylindrical porous microchannels with boundary conditions of slippage of the second order are carried out. Reducing the porosity causes increased heat transfer. At high Prandtl numbers, the temperature jump on the wall practically degenerates, which leads to an increase in the rate of heat transfer with an increase in the Knudsen number. At small Prandtl numbers, the effect of second-order parameters was not observed.

In general, the work shows that the proposed numerical and analytical modeling methods allow taking into account and analyzing the influence of a number of physical and geometric parameters on heat transfer and hydrodynamics in microporous structures. They also make it possible to determine the flow regimes in these microstructures. The research results can be used in the design and creation of new microchannel systems, as well as allow to optimize the most efficient operating parameters of existing ones.

Keywords: numerical simulating, analytical modeling, heat exchange, hydrodynamics, porosity, microchannel, slippage.