

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-269-5-69-75>

УДК 537.84

ВТРАТИ ТИСКУ ПІД ЧАС ТЕЧІЇ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОЇ РІДИНИ МІСЦЕВИМИ ОПОРАМИ ТРУБОПРОВОДУ

Чернецька-Білецька Н.Б., Роговий А.С., Мірошникова М.В.

LOSS OF PRESSURE DURING THE FLOW OF ELECTRIC CONDUCTIVE LIQUID BY LOCAL MINOR ENERGY LOSSES OF THE PIPELINE

Chernetskaya-Beletskaya N.B., Rogovyi A.S., Miroshnykova M.V.

На основі чисельного моделювання течії електропровідної рідини в трубопроводі з місцевими опорами визначено залежності коефіцієнтів втрат тиску під час течії в раптовому розширенні та раптовому звуженні. Розрахунок здійснено на основі вирішення рівнянь Нав'є-Стокса осереднених за Рейнольдсом із SST (Shear Stress Transport) моделлю турбулентності. Верифікацію програмного продукту проведено шляхом порівняння результатів експериментів з результатами чисельного моделювання. Дія магнітного поля приводить до зниження середньої та максимальної швидкостей, до збільшення швидкості в прикордонному шарі для течії електропровідної рідини в раптовому розширенні. На відміну від раптового звуження, в раптовому розширенні можна спостерігати відмінність картин течії за дії поперечного магнітного поля. Як для раптового звуження, так і для раптового розширення залежності відносних втрат повного тиску від числа Гартмана мають квадратичну залежність.

Ключові слова: електропровідна рідина, раптове розширення, раптове звуження, чисельний розрахунок, магнітна гідродинаміка

Вступ.

Використання електропровідних рідин в багатьох галузях виробництва привертає увагу великої кількості дослідників. Електропровідні рідини використовують для створення магнітогідродинамічних насосів, магнітогідродинамічної генерації енергії, очищення трубопроводів. Складність процесів, що відбуваються під час течії електропровідної рідини привів до відокремлення дисципліни – магнітної гідродинаміки. Також за допомогою магнітного поля можна впливати на течію плазми, рідких металів, солоні води та інших рідин з електропровідними властивостями [1, 2].

Складність математичних аналітичних досліджень в магнітній гідродинаміці виникає внаслідок одночасного моделювання руху рідини та рівнянь електродинаміки Максвелла [3, 4]. З іншої сторони

експериментальні дослідження коштовні та проводяться для перевірки роботи пристроїв [5]. Практичне використання електропровідних рідин у промисловості обмежується браком відомостей щодо втрат енергії під час руху в трубопроводі, що виникає внаслідок того, що аналітичним шляхом такі втрати розрахувати неможливо [6, 7].

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Багато робіт щодо руху електропровідних рідин опубліковано Гартманом [8] та Альвеном [9], але в них використовуються або експериментальні дослідження, або теоретичні з великою кількістю обмежень, що приводить до значних помилок при їх використанні.

Аналітичні розрахунки на основі сумісного вирішення приватних випадків в одномірній постановці рівнянь Нав'є-Стокса та рівнянь Максвелла не дозволяють зробити висновок про втрати енергії на місцевих опорах трубопроводу внаслідок складності відривів течії від стінок, та тривимірності відривів [10]. Аналітичне математичне моделювання ускладнюється, якщо рідини проявляють властивості не-ньютонівських рідин [11, 12]. Все це призводить до значних помилок моделювання, знизити які дослідники намагаються за рахунок експериментальних досліджень. Тому, як для звичайної рідини, так і для електропровідної розрахувати втрати енергії в місцевих опорах аналітичним шляхом неможливо [13-15].

Із появою потужних комп'ютерів з'явилася можливість математичного моделювання на основі чисельного розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса та рівнянь Максвелла, але це потребує дуже значних витрат часу на розрахунок при використанні методів прямого чисельного моделювання (DNS) та крупних вихорів (LES) [11, 12, 16, 17].

Осереднення рівнянь за Рейнольдсом дозволяє зменшити необхідний для розрахунку час при не-

значному погіршенні точності розрахунку, що пов'язано з використанням моделей турбулентності [18-22].

Тому, актуальною стає задача знаходження залежностей втрат тиску під час течії електропровідної рідини місцевими опорами шляхом математичного моделювання із використанням числового розв'язання.

Метою роботи є визначення залежностей втрат тиску під час течії електропровідної рідини місцевими опорами трубопроводу, як-от: раптове розширення та раптове звуження.

Результати досліджень.

Коректність використання числових методів для розрахунку електропровідної рідин оцінена шляхом верифікації течії 30 % водного розчину гідроксиду калію трубопроводом з числом Гартмана $Ha = BR\sqrt{\sigma/\rho\nu} = 20$. Де B – магнітна індукція; R – радіус труби; σ – електропровідність; ρ – густина; ν – кінематична в'язкість.

Основні фізичні властивості рідини [11]: густина – 1280 кг/м³; динамічна в'язкість – 0,00143 Па·с; кінематична в'язкість – $1,18 \times 10^{-6}$ м²/с; електропровідність – 73,67 См/м; теплопровідність – 0,727 Вт/(м·К); теплоємність – 3000 Дж/(кг·К). Рідина вважалася в'язкою, нестисливою. Рівняння руху рідини вирішувалися чисельно у програмному середовищі Ansys CFX (зі студентською ліцензією).

Математична модель складалася з осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стоксу, рівнянь SST (Shear Stress Transport) моделі турбулентності, рівняння нерозривності та рівнянь Максвелла для течії нестисливої рідини [23-25]:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left[\mu + \mu_t \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

$$\vec{f} = [\vec{j} \times \vec{B}], \quad (3)$$

$$\nabla(\sigma \nabla \Phi) = \nabla \cdot [\sigma \vec{u} \times \vec{B}], \quad (4)$$

$$\nabla^2 \Phi = \nabla \cdot [\vec{u} \times \vec{B}], \quad (5)$$

де x_j – декартові координати; u_j – проекції швидкості в декартовій системі координат; t – час; p – гідродинамічний тиск; f_i – проекції вектора масових сил на осі координат (сила Лоренца); μ – динамічна (молекулярна) в'язкість; μ_t – турбулентна динамічна в'язкість; $\vec{j}$ – щільність електричного струму, що виникає в електропровідній рідині, яка рухається зі швидкістю $\vec{u}$ за рахунок місцевого

електричного поля; Φ – скалярний електростатичний потенціал.

В даній роботі моделювалося два типи місцевих опорів: раптове звуження та раптове розширення потоку. Твердотільні моделі наведено на рис. 1.

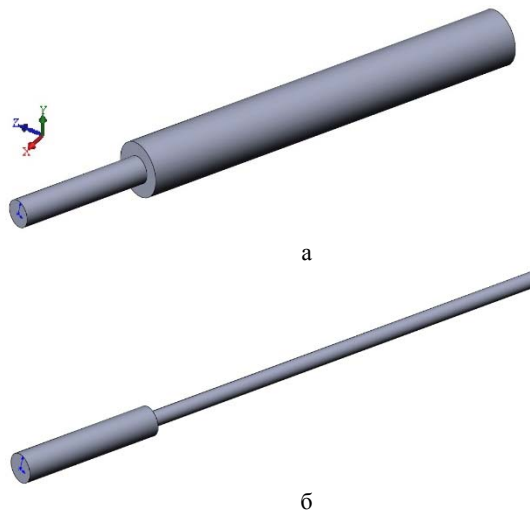


Рис. 1. Твердотільні моделі місцевих опорів: а – раптове розширення; б – раптове звуження

Сіткові моделі побудовані призматичними та тетрагональними елементами [26] та наведені на рис. 2. Програмний комплекс є валідованим для розрахунку класу течій розглянутих в даній статті [23, 27, 28].

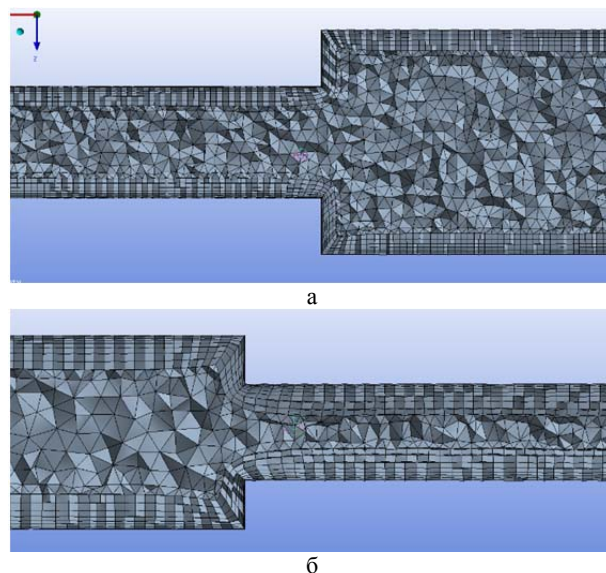


Рис. 2. Сіткові моделі місцевих опорів: а – раптове розширення; б – раптове звуження

Розрахунок завершувався при дотриманні двох умов: нев'язання всіх рівнянь менші за 10^{-5} і зміна амплітуди коливань перепаду тиску в трубопроводі за ітераціями не перевищує 1 % [29-31].

Для того щоб не створювати початкову дільницю великої довжини у вхідному перетині каналу швидкість задано на основі розрахунку за формулою:

$$V = V_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7}, \quad (6)$$

де r – радіус точки в перетині труби; $R = 0,05$ м – радіус труби. У вихідному перетині заданий нульовий статичний тиск. Для нерухомої стінки – скалярний електростатичний потенціал $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$.

Геометричні параметри досліджуваних місцевих опорів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Геометричні параметри місцевих опорів

Параметр	Раптове розширення	Раптове звуження
Діаметр труби до опору, мм	100	100
Діаметр труби після опору, мм	200	50
Довжина дільниці до опору, мм	1000	1000
Довжина дільниці після опору, мм	2000	2000

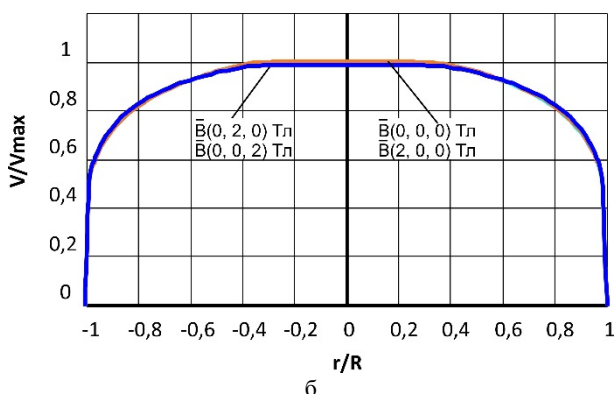
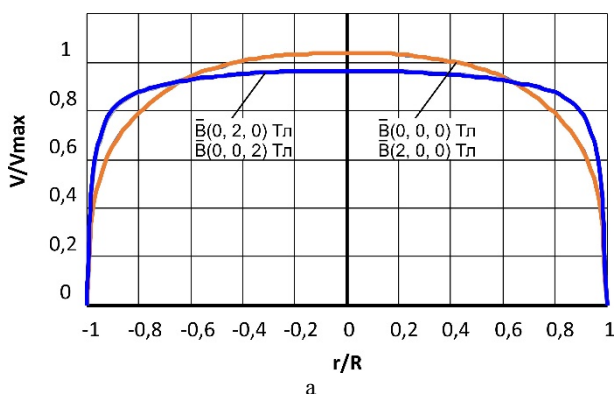


Рис. 3. Розподіл швидкості вздовж радіусу:
а – на відстані 100 мм до раптового звуження;
б – на відстані 1400 мм після раптового звуження

Аналізуючи рис. 3 можна дійти до висновку, що магнітне поле на початковій дільниці має незначний вплив, але після проходження раптового звуження

вплив магнітного поля практично нівелюється (рис. 3б). Графіки побудовані з числом Гартмана $Ha = 10$. Швидкість віднесена до максимальної швидкості $V_{\max}$ в центрі труби, у випадку течії рідини без дії магнітного поля. Магнітна індукція задавалася вектором $\vec{B}(B_x, B_y, B_z)$ Тл. Труба орієнтована вздовж осі x . Тому дія двох компонентів магнітної індукції створюють поперечне магнітне поле.

Результати розрахунку течії в раптовому звуженні наведено на рис. 4.

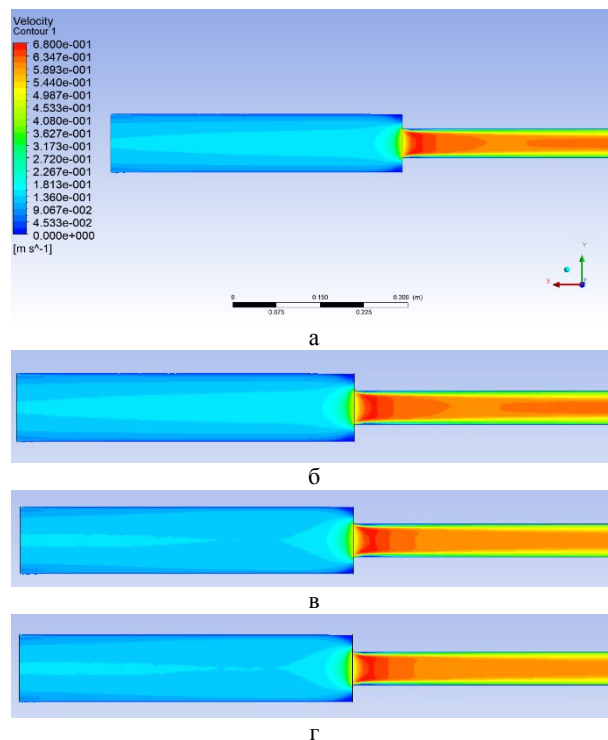


Рис. 4. Розподіл швидкості під час течії в раптовому звуженні: а – $\vec{B}(0, 0, 0)$; б – $\vec{B}(2, 0, 0)$;
в – $\vec{B}(0, 2, 0)$; г – $\vec{B}(0, 0, 2)$

Дія магнітного поля практично не впливає на картини течії в раптовому звуженні (рис. 4). Деякі відмінності можна спостерігати для поперечної дії вектора магнітної індукції (рис. 4в, г).

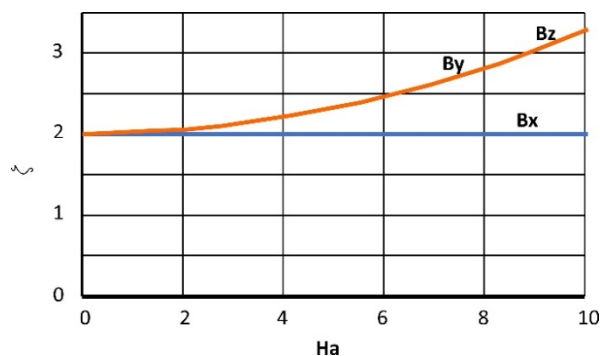


Рис. 5. Залежність коефіцієнту місцевого опору раптового звуження від числа Гартмана

На рис. 5 наведено залежність коефіцієнта місцевого опору (раптового звуження) від числа Гартмана. Спостерігається повне співпадіння кривих для поперечної дії вектора магнітної індукції. Діапазон зміни проекції магнітної індукції на кожен вісь – 0..2 Тл. Коефіцієнт місцевого опору має квадратичну залежність від числа Гартмана (коефіцієнт кореляції Пірсона дорівнює 0,999).

Магнітне поле збільшує коефіцієнт місцевого опору (раптове звуження) більше ніж в 5 разів за малих чисел Рейнольдса. Збільшення чисел Рейнольдса та перехід до розвинутої турбулентної течії приводить до асимптотичного співпадіння коефіцієнтів за різної орієнтації магнітного поля (Рис. 6). Це пояснюється збільшенням швидкості течії та зменшенням відносної дії магнітного поля на потік.

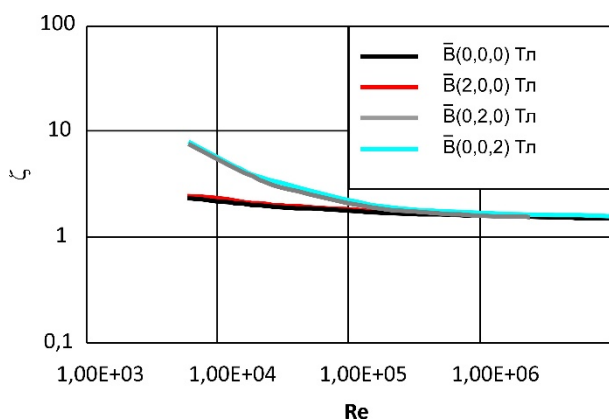


Рис. 6. Залежність коефіцієнту місцевого опору (раптове звуження) від числа Рейнольдса

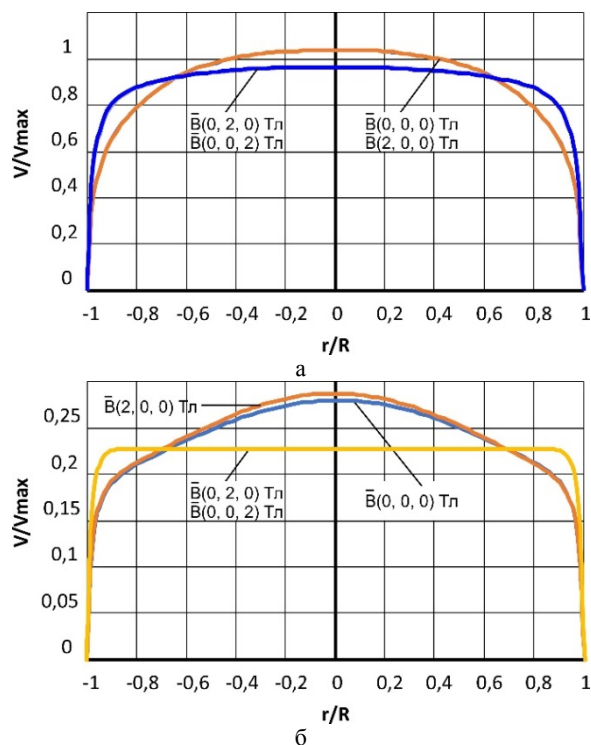


Рис. 7. Розподіл швидкості вздовж радіусу:
а – на відстані 100 мм до раптового розширення;
б – на відстані 1400 мм після раптового розширення

На рис. 7 наведено порівняння профілів швидкості під час течії в раптовому розширенні із різним напрямком магнітної індукції. Порівнюючи рис. 7а та рис. 7б зауважимо, що розподіл швидкості практично однаковий на початковій ділянці, що відповідає умовам завдання. Рис. 7б показує, що дія магнітного поля приводить до зниження середньої та максимальної швидкостей, до збільшення швидкості в прикордонному шарі. Графіки побудовані з числом Гартмана $Ha = 20$. Швидкість віднесена до максимальної швидкості на початковій ділянці V_{max} в центрі труби, у випадку течії рідини без дії магнітного поля. Труба орієнтована вздовж осі x .

Результати розрахунку течії в раптовому розширенні наведено на рис. 8.

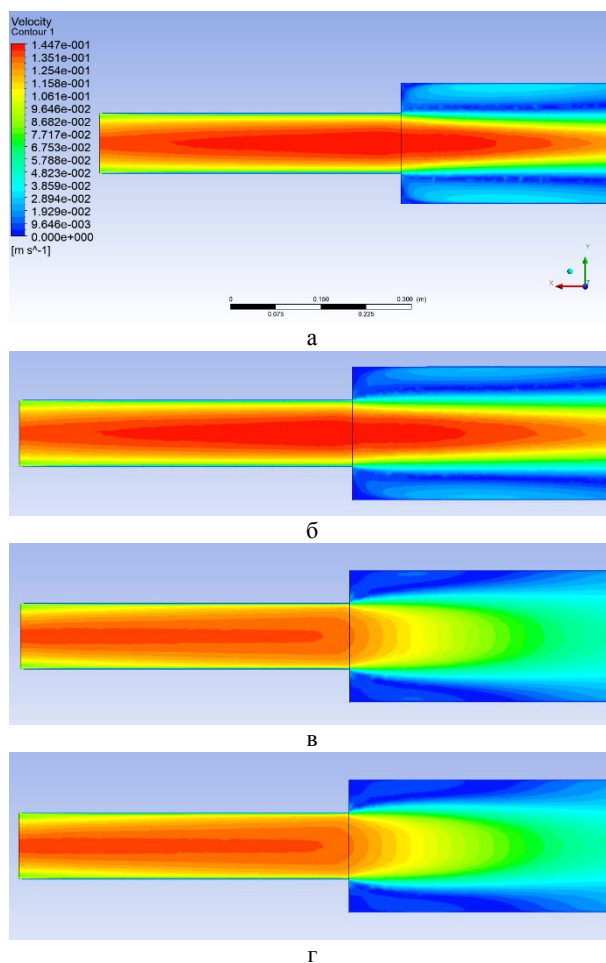


Рис. 8. Розподіл швидкості під час течії в раптовому розширенні: а – $\vec{B}(0, 0, 0)$; б – $\vec{B}(2, 0, 0)$;
в – $\vec{B}(0, 2, 0)$; г – $\vec{B}(0, 0, 2)$

На відміну від раптового звуження (Рис. 4), в раптовому розширенні (Рис. 8) можна спостерігати відмінність картин течії за дії поперечного магнітного поля. Значно зменшується область високої швидкості після проходження розширення. Змінюються параметри розширення струменя.

Як для раптового звуження, та і для раптового розширення (Рис. 9) залежності відносних втрат повного тиску від числа Гартмана мають квадратичну залежність. Спостерігається повне співпадіння кривих для поперечної дії вектора магнітної індукції.

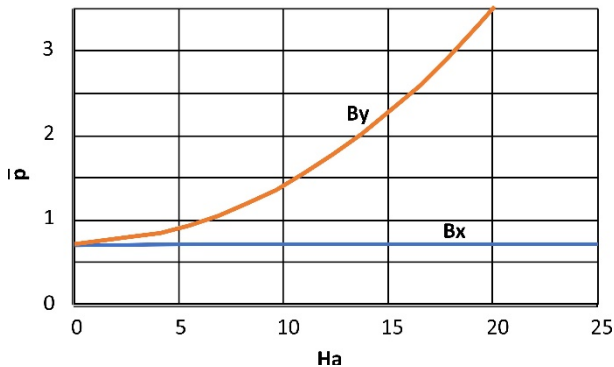


Рис. 9. Залежність коефіцієнту відносних втрат повного тиску для раптового розширення від числа Гартмана

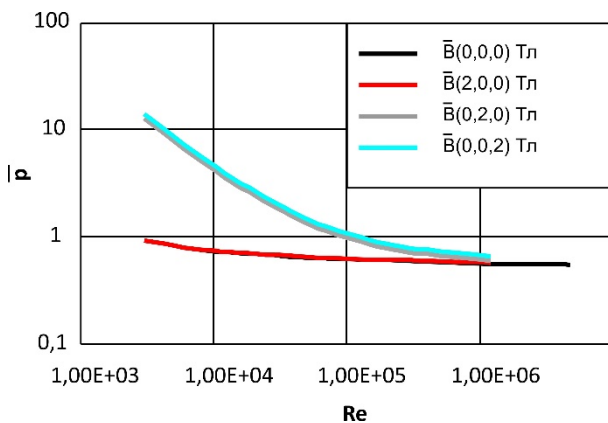


Рис. 10. Залежність коефіцієнту місцевого опору (раптове розширення) від числа Рейнольдса

Дія магнітного поля з вектором магнітної індукції, що співпадає з віссю течії електропровідної рідини практично не впливає на втрати тиску в раптовому розширенні (Рис. 10). Дія поперечного вектора магнітної індукції збільшує втрати тиску на порядок за малих чисел Рейнольдса. Збільшення чисел Рейнольдса до значень $Re > 10^6$ нівелює дію магнітного поля.

Висновки:

На основі чисельного моделювання течії електропровідної рідини в трубопроводі з місцевими опорами визначено залежності коефіцієнтів втрат тиску під час течії в раптовому розширенні та раптовому звуженні. Розрахунок здійснено на основі вирішення рівнянь Нав'є-Стоксу осереднених за Рейнольдсом із SST-моделлю турбулентності. Верифікацію програмного продукту проведено шляхом порівняння результатів експериментів [9] з результатами чисельного моделювання.

1. Магнітне поле на початковій ділянці раптового звуження має незначний вплив, але після

проходження місцевого опору вплив магнітного поля практично нівелюється. Дія магнітного поля практично не впливає на картини течії в раптовому звуженні. Магнітне поле збільшує коефіцієнт місцевого опору (раптове звуження) більше ніж в 5 разів за малих чисел Рейнольдса. Збільшення чисел Рейнольдса та перехід до розвинутої турбулентної течії приводить до асимптотичного співпадіння коефіцієнтів за різної орієнтації магнітного поля. Це пояснюється збільшенням швидкості течії та зменшенням відносної дії магнітного поля на потік.

2. Дія магнітного поля приводить до зниження середньої та максимальної швидкостей, до збільшення швидкості в прикордонному шарі для течії електропровідної рідини в раптовому розширенні. На відміну від раптового звуження, в раптовому розширенні можна спостерігати відмінність картин течії за дії поперечного магнітного поля. Значно зменшується область високої швидкості після проходження розширення. Змінюються параметри розширення струменя. Як для раптового звуження, та і для раптового розширення залежності відносних втрат повного тиску від числа Гартмана мають квадратичну залежність. Спостерігається повне співпадіння кривих для повздовжньої дії вектора магнітної індукції. Дія поперечного вектора магнітної індукції збільшує втрати тиску на порядок за малих чисел Рейнольдса. Збільшення чисел Рейнольдса до значень $Re > 10^6$ нівелює дію магнітного поля.

Література

1. Sabu A.S., Mathew A., Neethu T.S., George K.A. Statistical analysis of MHD convective ferro-nanofluid flow through an inclined channel with hall current, heat source and soot effect. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021. 22, pp. 100816.
2. Nijhawan P., Singla M.K., Gupta J. A Proposed Hybrid Model for Electric Power Generation: A Case Study of Rajasthan, India. *IETE Journal of Research*, 2021. pp. 1-11.
3. Frank M. Visual analysis of two-dimensional magnetohydrodynamics. *Phys.Fluids*, 2001. vol.13, pp. 2287-2295.
4. Gedik E., Kurt H., Recebli Z. CFD simulation of magnetohydrodynamic flow of a liquid-metal galinstan fluid in circular pipes. *Fluid Dynamics and Materials Processing*, 2013. 9(1), pp. 23-33.
5. Attia H.A., Ahmed M.E. Circular pipe MHD flow of a dusty Bingham fluid. *Journal of Applied Science and Engineering*, 2005. 8(4), pp. 257-265.
6. Семин Д.А., Роговой А.С. Влияние типа и размера расчетных сеток на точность расчета течений в вихрекамерных нагнетателях. *Вісник Національного технічного університету «ХП»*. Збірник наукових праць. Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. Харків: НТУ «ХП». 2016. № 41 (1213). С. 70-77.
7. Семин Д.А., Роговой А.С., Левашов А.Н., Левашов Я.Н. Верификация расчетов течений в вихрекамерных устройствах. *Вісник НТУУ «КП»*. Сер. Машинобудування, 2016. № 2 (77). С. 71-78.

8. Hartmann J., Lazarus F. Hg-dynamics II. Theory of laminar flow of electrically conductive Liquids in a Homogeneous Magnetic Field, 1937. 15(7).
9. Alfvén H. Magnetohydrodynamics and the thermonuclear problem. Proceedings of the Second Nations International Conference. Vol. 31. 1958.
10. Davidson P.A. Magnetohydrodynamics in materials processing. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999. 31(1), pp. 273-300.
11. Takeuchi J., Satake S.I., Morley N.B., Kunugi T., Yokomine T., Abdou M.A. Experimental study of MHD effects on turbulent flow of Flibe simulant fluid in circular pipe. Fusion Engineering and Design, 2008. 83(7-9), pp. 1082-1086.
12. Zhang X., Pan C., Xu Z. Experimental investigations on liquid metal MHD turbulent flows through a circular pipe with a conductive wall. Fusion Engineering and Design, 2017. 125, pp. 647-652.
13. Csizmadia P., Till S., Hos C. An experimental study on the jet breakup of Bingham plastic slurries in air. Exp Therm Fluid Sci, 2019, 102, pp. 271-278.
14. Liu M., Duan YF. Resistance properties of coalewater slurry flowing through local piping fittings. Exp Therm Fluid Sci, 2009, 33(5), pp. 828-837.
15. Rogovyi A., Korohodskiy V., Medvediev Ye. Influence of Bingham fluid viscosity on energy performances of a vortex chamber pump. Energy, 2021. Vol. 218. pp. 119432.
16. Meng Z., Zhang S., Jia J., Chen Z., Ni M. A $k-\epsilon$ RANS turbulence model for incompressible MHD flow at high Hartmann number in fusion liquid metal blankets. International Journal of Energy Research, 2018. Vol. 42(1), pp. 314-320.
17. Rogovyi A.S. Verification of fluid flow calculation in vortex chamber superchargers. Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. Харьков, 2016. Вып. 39. С. 39-46.
18. Tavangar S., Hashemabadi SH., Saberimoghadam A. CFD simulation for secondary breakup of coalewater slurry drops using OpenFOAM. Fuel Process Technol 2015. 132. pp. 153e63.
19. Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Baranov I., Krut A., Miroshnikova M., Bragin N. Increasing the efficiency of highly concentrated coal-water fuel based on the simulation of non-Newtonian fluid flow. In MATEC Web of Conferences 2019. Vol. 294, pp. 01009.
20. Сьомін Д.О., Роговий А.С. Вихорокамерні нагнітачі: монографія. Харків. ФОП Мезіна В.В. 2017. 204 с.
21. Роговий А. С. Розробка теорії та методів розрахунку вихорокамерних нагнітачів : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.05.17 / Харківський нац. автомобільно-дорожній ун-т. Харків, 2017. 364 с.
22. Чернецька-Білецька Н.Б., Роговий А.С., Баранов І.О., Мірошнікова М.В. Математична модель просторової тривимірної течії водовугільного палива. Вісник ЧНУ ім. В.Даля. Сєвєродонецьк: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Даля. 2018. №1 (242). С. 159-164.
23. Widlund O. Implementation of MHD model equations in CFX 4.3. 2000.
24. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа 2003. 840 с.
25. Гарбарук А.В., Стрелец М. Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений, учеб. пособие, Издательство Политехнического университета, СПб, 2012, 88 с.
26. Matyushenko A. A., Stabnikov A. S., Garbaruk A. V. Criteria of computational grid generation for turbulence models taking into account laminar-turbulent transition. In Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1400, No. 7. pp. 077047.
27. Ansys C.F.X. Solver Theory Guide. Release 2019 R3. Canonsburg: ANSYS. 2019.
28. Zhang H., Li J., Wang Z., Xu Y., Lai Y. The numerical modeling of melt flow and mhd instabilities in an aluminum reduction cell. JOM, 2010. 62(11), pp. 26-31.
29. Han X., Sagaut P., Lucor D. On sensitivity of RANS simulations to uncertain turbulent inflow conditions, Comput. Fluids. 2012. Vol. 61. pp. 2-5.
30. Сьомін Д.О., Павлюченко В.О., Мальцев Я.І., Войцеховський С.В., Роговий А.С., Дмитрієнко Л.В., Мальцева М.О. Вихрові виконавчі пристрої: В 2-х частинах: Монографія. Луганськ: вид-во ЧНУ ім. В.Даля, 2009. Ч.1 Однорідні робочі середовища. 256 с.
31. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Appl. Mech. and Eng., 1974. 3. pp. 269-289.

References

1. Sabu A.S., Mathew A., Neethu T.S., George K.A. Statistical analysis of MHD convective ferro-nanofluid flow through an inclined channel with hall current, heat source and soot effect. Thermal Science and Engineering Progress, 2021. 22, pp. 100816.
2. Nijhawan P., Singla M.K., Gupta J. A Proposed Hybrid Model for Electric Power Generation: A Case Study of Rajasthan, India. IETE Journal of Research, 2021. pp. 1-11.
3. Frank M. Visual analysis of two-dimensional magnetohydrodynamics. Phys.Fluids, 2001. vol.13, pp. 2287-2295.
4. Gedik E., Kurt H., Recebli Z. CFD simulation of magnetohydrodynamic flow of a liquid-metal galinstan fluid in circular pipes. Fluid Dynamics and Materials Processing, 2013. 9(1), pp. 23-33.
5. Attia H.A., Ahmed M.E. Circular pipe MHD flow of a dusty Bingham fluid. Journal of Applied Science and Engineering, 2005. 8(4), pp. 257-265.
6. Syomin D.A., Rogovyi A.S. Vliyanie tipa i razmera raschetnyh setok na tochnost' rascheta techenij v vihrekamernykh magnetatel'jah. Visnik Nacional'nogo tehnic'nogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: Gidravlichni mashini ta gidroagregati. Harkiv: NTU «HPI». 2016. № 41 (1213). S. 70-77.
7. Syomin D.A., Rogovyi A.S., Levashov A.N., Levashov Ja.N. Verifikacija raschetov techenij v vihrekamernykh ustroystvah. Visnik NTUU "KPI". Ser. Mashinobuduvannja, 2016. № 2 (77). S. 71-78.
8. Hartmann J., Lazarus F. Hg-dynamics II. Theory of laminar flow of electrically conductive Liquids in a Homogeneous Magnetic Field, 1937. 15(7).
9. Alfvén H. Magnetohydrodynamics and the thermonuclear problem. Proceedings of the Second Nations International Conference. Vol. 31. 1958.
10. Davidson P.A. Magnetohydrodynamics in materials processing. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999. 31(1), pp. 273-300.
11. Takeuchi J., Satake S.I., Morley N.B., Kunugi T., Yokomine T., Abdou M.A. Experimental study of MHD effects on turbulent flow of Flibe simulant fluid in circular pipe. Fusion Engineering and Design, 2008. 83(7-9), pp. 1082-1086.
12. Zhang X., Pan C., Xu Z. Experimental investigations on liquid metal MHD turbulent flows through a circular pipe with a conductive wall. Fusion Engineering and Design, 2017. 125, pp. 647-652.

13. Csizmadia P, Till S, Hos C. An experimental study on the jet breakup of Bingham plastic slurries in air. *Exp Therm Fluid Sci*, 2019, 102, pp. 271-278.
14. Liu M, Duan YF. Resistance properties of coalewater slurry flowing through local piping fittings. *Exp Therm Fluid Sci*, 2009, 33(5), pp.828-837.
15. Rogovyi A., Korohodskiy V., Medvediev Ye. Influence of Bingham fluid viscosity on energy performances of a vortex chamber pump. *Energy*, 2021. Vol. 218. pp. 119432.
16. Meng Z., Zhang S., Jia J., Chen Z., Ni M. A κ -Epsilon RANS turbulence model for incompressible MHD flow at high Hartmann number in fusion liquid metal blankets. *International Journal of Energy Research*, 2018. Vol. 42(1), pp. 314-320.
17. Rogovyi A.S. Verification of fluid flow calculation in vortex chamber superchargers. *Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. Харьков*, 2016. Вып. 39. С. 39-46.
18. Tavangar S, Hashemabadi SH, Saberimoghdam A. CFD simulation for secondary breakup of coalewater slurry drops using OpenFOAM. *Fuel Process Technol* 2015.132. pp.153e63.
19. Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Baranov I., Krut A., Miroshnikova M., Bragin N. Increasing the efficiency of highly concentrated coal-water fuel based on the simulation of non-Newtonian fluid flow. In *MATEC Web of Conferences* 2019. Vol. 294, pp. 01009.
20. Syomin D.O., Rogovyi A.S. *Vykhorkamerni nahnitachi: monohrafiya*. Kharkiv. FOP Mezina V.V. 2017. 204 s.
21. Rogovyi A. S. Rozrobka teorii ta metodiv rozrakhunku vykhorkamernykh nahnitachiv : dys. ... d-ra tekhn. nauk : spets. 05.05.17 / Kharkiv's'kyi nats. avtomobil'no-dorozhnyi un-t. Kharkiv, 2017. 364 s.
22. Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Baranov I., Miroshnikova M. Matematychna model' prostorovoyi tryvymirnoyi techiyi vodovuhil'noho palyva. *Visnyk SNU im. V.Dalya. Syevyerodonets'k: Vyd-vo Skhidnoukr. nats. un-tu im. V.Dalya*. 2018. #1 (242). S. 159-164.
23. Widlund O. Implementation of MHD model equations in CFX 4.3. 2000.
24. Lojczanskij L.G. *Mehanika zhidkosti i gaza: Ucheb. dlja vuzov*. 7-e izd., ispr. M.: Drofa 2003. 840 s.
25. Garbaruk A.V., Strelets M. Kh, Shur M.L. *Modelirovanie turbulentnosti v raschotah slozhnykh techenij*, Text-book, Publishing house of Polytechnic University, St.-Petersburg, 2012 (in Russian), 88 pp.
26. Matyushenko A. A., Stabnikov A. S., Garbaruk A. V. Criteria of computational grid generation for turbulence models taking into account laminar-turbulent transition. In *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1400, No. 7. pp. 077047.
27. Ansys C.F.X. *Solver Theory Guide*. Release 2019 R3. Canonsburg: ANSYS. 2019.
28. Zhang H., Li J., Wang Z., Xu Y., Lai Y. The numerical modeling of melt flow and mhd instabilities in an aluminum reduction cell. *JOM*, 2010. 62(11), pp. 26-31.
29. Han X., Sagaut P., Lucor D. On sensitivity of RANS simulations to uncertain turbulent inflow conditions, *Comput. Fluids*. 2012. Vol. 61. pp. 2-5.
30. Syomin D.O., Pavlyuchenko V.O., Maltsev Ya.I., Voytsekhovskiy S.V., Rogovyi A.S., Dmytriyenko L.V., Maltseva M.O. *Vykhrovi vykonavchi prystroji: V 2-kh chastynakh: Monohrafiya*. Lugansk: vyd-vo SNU im. V.Dalya, 2009. Ch.1 Odnoridni robochi seredovyshcha. 256 s.
31. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Appl. Mech. and Eng.*, 1974. 3. pp. 269-289.

Chernetskaya-Beletskaya N.B., Rogovyi A.S., Miroshnikova M.V. Loss of pressure during the flow of electric conductive liquid by local minor energy losses of the pipeline.

Today in many industries there is a need to pump electrically conductive fluids. For electrically conductive fluids, such a number of experimental studies has not yet been conducted, in addition, the dependencies are complicated by the influence of the magnetic field and the need to take into account their magnitude.

The complexity of mathematical analytical studies in magnetic hydrodynamics arises due to the simultaneous modeling of fluid motion and Maxwell's electrodynamic equations. On the other hand, experimental studies are valuable and are conducted to test the operation of devices. The practical use of conductive fluids in industry is limited by the lack of information on energy losses during the movement in the pipeline, which occurs due to the fact that such losses cannot be calculated analytically.

The aim of the paper is to determine the dependences of pressure losses during the flow of conductive fluid by local minor losses in the pipeline, such as: sudden enlargement and sudden contraction.

The mathematical model consisted of Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, SST (Shear Stress Transport) equations of the turbulence model, continuity equations and Maxwell's equations for incompressible fluid flow.

The software was verified by comparing the results of experiments with the results of numerical simulations. The action of the magnetic field leads to a decrease in the average and maximum velocities, to an increase in the velocity in the boundary layer for the flow of conductive fluid in a sudden enlargement. In contrast to sudden contraction, in sudden enlargement it is possible to observe a difference in flow patterns under the action of a transverse magnetic field. Both for the sudden contraction and for the sudden enlargement, the dependences of the relative losses of total pressure on the Hartmann number have a quadratic character.

There is a complete coincidence of the curves for the longitudinal action of the magnetic induction vector. The action of the transverse vector of magnetic induction increases the pressure loss by an order of magnitude at small Reynolds numbers. Increasing the Reynolds numbers to the values of the developed turbulent flow eliminates the effect of the magnetic field.

Keywords: electric conductive liquid, sudden enlargement, sudden contraction, numerical calculation, magnetohydrodynamics.

Чернецька-Білецька Н.Б. – д.т.н., проф., зав. кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» ЧНУ ім. В. Даля. e-mail: logistyka.snu.edu.ua@gmail.com
Роговий А.С. – д.т.н., проф., зав. кафедри гідрравлічних машин НТУ «ХП», м. Харків, Україна, e-mail: asrogovoy@ukr.net
Мірошникова М.В. – старший викладач кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» ЧНУ ім. В. Даля. e-mail: citroen4ik@gmail.com