

DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2021-1-61.1>
УДК 537.84

Н. Б. Чернецька-Білецька, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри логістичного управління та безпеки руху на транспорті Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля
А. С. Роговий, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри “Гідравлічні машини” імені академіка Г. Ф. Проскури Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”
М. В. Мірошникова, старший викладач кафедри логістичного управління та безпеки руху на транспорті Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ З ПЕРЕКАЧУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОЇ РІДИНИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У багатьох галузях промисловості нині існує потреба в перекачуванні електропровідних рідин. Актуальним завданням стає визначення залежностей втрат тиску місцевих опорів під час течії електромагнітних рідин від електромагнітних та гідродинамічних параметрів. На основі чисельного моделювання течії електропровідної рідини в коліні трубопроводу за допомогою розв’язання рівнянь Нав’є – Стокса, осереднених за Рейнольдсом, визначено залежності втрат тиску на повороті в коліні. Магнітне поле має значний вплив на епюру швидкості до повороту та після нього в коліні внаслідок того, що вектор магнітної індукції або на першій, або на другій ділянці перпендикулярний трубі. За порівняно малих значень чисел Рейнольдса вплив магнітного поля дуже великий, що збільшує коефіцієнт місцевого опору більше ніж у 15 разів порівняно з коефіцієнтом без дії магнітного поля.

Ключові слова: електропровідна рідина; коліно трубопроводу; коефіцієнт місцевого опору; чисельний розрахунок; математичне моделювання; магнітна гідродинаміка.

© Н. Б. Чернецька-Білецька, А. С. Роговий, М. В. Мірошникова, 2021

Во многих отраслях промышленности существует потребность перекачки электропроводных жидкостей. Актуальной задачей является определение зависимостей потерь давления местных сопротивлений при течении электромагнитных жидкостей от электромагнитных и гидродинамических параметров. На основе численного моделирования течения электропроводящей жидкости в колене трубопровода с помощью решения уравнений Навье – Стокса, усредненных за Рейнольдсом, определены зависимости потерь давления на повороте в колене. Магнитное поле может влиять на эпюру скорости до поворота и после него в колене вследствие того, что вектор магнитной индукции или на первом, или на втором участке перпендикулярен трубе. При сравнительно малых значениях чисел Рейнольдса влияние магнитного поля очень значительно, что увеличивает коэффициент местного сопротивления больше чем в 15 раз по сравнению с коэффициентом без воздействия магнитного поля.

Ключевые слова: электропроводящая жидкость; колено трубопровода; коэффициент местного сопротивления; численный расчет; математическое моделирование; магнитная гидродинамика.

Today in many industries there is a need to pump electrically conductive fluids. In contrast to classical hydrodynamics, MHD modeling requires the simultaneous solution of the equations of hydrodynamics and electrodynamics, which significantly complicates the modeling process. 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. An urgent task is to determine the dependences of the pressure losses of local resistances during the flow of electromagnetic fluids on electromagnetic and hydrodynamic parameters. The development of computational hydrodynamics in recent years has led to the fact that the use of CFD-calculations can practically replace valuable experimental studies of electrically conductive fluids by mathematical modeling. Experimental studies are complicated by the use of powerful electromagnets and a variety of electrically conductive fluids, which often have not only electromagnetic properties, but are often non-Newtonian. Based on the numerical simulation of the flow of conductive fluid in the pipeline elbow, the dependences of the pressure losses at the bend in the elbow were determined by solving the Navier – Stokes equations averaged according to Reynolds. The magnetic field has a significant effect on the diagram of the velocity before and after the turn in the knee due to the fact that the magnetic induction vector in either the first or second section is perpendicular to the tube. At relatively small values of Reynolds numbers, the effect of the magnetic field is very significant, which increases the local resistance coefficient by more than 15 times compared to the coefficient without the action of the magnetic field.

Key words: *conductive fluid; pipe elbow; local resistance coefficient; numerical calculation; mathematical modeling; magnetic hydrodynamics.*

Постановка проблеми. У багатьох галузях промисловості нині існує потреба перекачування електропровідних рідин. Це привело до створення окремої дисципліни – магнітної гідродинаміки (МГД), яка розглядає питання на перетинанні двох дисциплін: гідродинаміки та електродинаміки суцільного середовища. Об'єктом дослідження МГД є рух плазми, рідких металів, солоної води та будь-яких рідин, що виявляють електропровідні властивості.

На відміну від класичної гідродинаміки, моделювання МГД потребує одночасного розв'язання рівнянь гідродинаміки та електродинаміки, що значно ускладнює процес моделювання [1, 2]. Експериментальні дослідження поведінки електропровідних рідин обмежені дослідженнями спеціалізованого обладнання, такими як: МГД-насоси, МГД-генерація електроенергії тощо [3–5].

Гідрравлічний розрахунок трубопроводів для електропровідної рідини потребує використання спеціальних залежностей для визначення втрат тиску на місцевих опорах та на тертя подібно до класичної гідравліки. Звичайні для гідравліки залежності отримано переважно експериментальним шляхом протягом багатьох років досліджень. Для електропровідних рідин такої кількості експериментальних досліджень ще проведено не було, крім того, залежності ускладнюються за рахунок впливу магнітного поля та необхідності врахування в них його величини.

Розвиток обчислювальної гідродинаміки в останні роки привів до того, що використання CFD-розрахунків дозволяє практично замінити коштовні експериментальні дослідження електропровідних рідин математичним моделюванням [6, 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перші теоретичні та експериментальні роботи в галузі МГД було проведено Гартманом у 1937 р. [8] та нобелівським лауреатом Альвеном [9] у 50-х рр. ХХ ст. У праці [8] досліджено поведінку ртуті під впливом магнітного поля та зроблено висновки щодо переходу течії від ламінарного до турбулентного руху в круглій трубі. Гартман уперше помітив, що критичні значення чисел Рейнольдса, які використовують у класичній гідравліці, не можна використовувати для електропровідної рідини. Альвен в своїх працях сконцентрував увагу на таких напрямках: теорія полярного саява, геомагнітні бурі, утворення Сонячної системи, тому він не займався проблемами гідравлічного розрахунку течії рідин.

Подальший розвиток МГД частіше проводився на основі аналітичних розрахунків течії [10], що не дає можливості оцінити такі параметри як втрати тиску на місцевих опорах. Експериментальні дослідження ускладнені використанням потужних електромагнітів та різноманітністю електропровідних рідин, які часто мають не лише електромагнітні властивості, а також є неньютонівськими [11, 12]. Неньютонівські рідини теж мають дуже складні залежності втрат тиску на місцевих опорах, які досліджуються експериментально, проте нині досі не існує однозначних залежностей для будь-яких рідин [13–15].

Математичне моделювання на основі чисельного розрахунку течії дає можливість отримати точний результат, що підтверджується працями [11, 12, 16, 17]. Для електропровідних рідин часто використовують потужні методи прямого чисельного моделювання (DNS) та метод крупних вихорів (LES), але ці методи потребують великої кількості елементів сітки, а для цього необхідні дуже потужні комп'ютери й багато часу на розрахунок, що недоцільно під час інженерних розрахунків.

Нинішнього часу для гідродинамічних розрахунків створено сотні моделей турбулентності для спрощення симуляцій під час використання осереднення рівнянь Нав'є – Стокса за Рейнольдсом. Найбільш універсальними моделями є: $k-\epsilon$, (RNG) $k-\epsilon$, $k-\omega$ та SST $k-\omega$ [18–22].

Тому актуальним завданням є виявлення залежностей втрат тиску місцевих опорів під час течії електромагнітних рідин від електромагнітних та гідродинамічних параметрів за допомогою методів чисельного моделювання.

Мета статті – визначення залежностей втрат тиску на місцевих опорах у коліні для течії електропровідної рідини в круглих трубах.

Рідина вважалася в'язкою, нестисливою та електропровідною. Рівняння руху рідини розв'язувалися чисельно з використанням методу контрольних об'ємів у програмному середовищі Ansys CFX. Програмний комплекс використано на умовах студентської ліцензії з обмеженням на кількість елементів, що не перевищує 500 000.

Виклад основного матеріалу. Математичне моделювання руху електропровідної рідини проведено на основі розв'язання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є – Стокса з рівнянням SST (Shear Stress Transport) моделі турбулентності, рівняння нерозривності та рівнянь Максвелла для течії нестисливої рідини [23–25]:

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

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

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

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

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

де ρ – густина; 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 (у нашому випадку – 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; \vec{B} – вектор магнітної індукції; Φ – скалярний електростатичний потенціал; σ – електропровідність.

Твердотільну модель рідини, що рухається в коліні плавного повороту на 90° , зображено на рис. 1а.

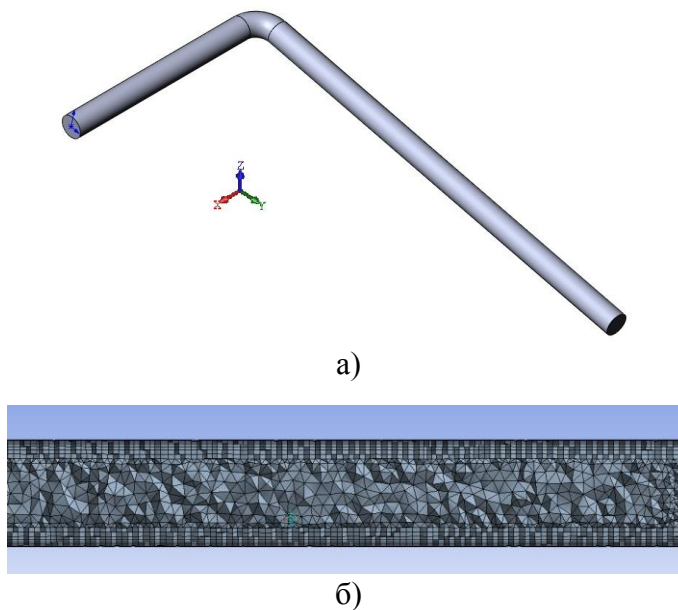


Рис. 1. Розрахункові моделі коліна трубопроводу: а) твердотільна модель; б) сіткова модель

Розрахунок виконано в програмному комплексі Ansys CFX з академічною студентською ліцензією. Студентська ліцензія обмежує кількість використаних елементів 500 000. Сіткові моделі зображено на рис. 16. Вони побудовані за допомогою призматичних та тетрагональних елементів [26]. Ansys CFX є валідованим для всіх класів течій, у тому числі для розрахунків магнітної гідродинаміки [23, 27, 28].

Критеріями завершення розрахунку є умови зменшення нев'язань усіх рівнянь до значень 10^{-5} і забезпечення постійного перепаду тиску в трубопроводі.

Граничні умови завдавалися таким чином: у вхідному перетині каналу – швидкість за розподілом $V = V(1 - r/R)^{1/7}_{max}$, де r – поточний радіус точки в перетині труби; $R = 0,05$ м – радіус труби. У вихідному перетині – відкрита границя з нульовим статичним тиском. Інтенсивність турбулентності задана величиною 5 %. Для нерухої стінки з граничною умовою відсутності ковзання – скалярний електростатичний потенціал $\partial\Phi/\partial n = 0$.

Для порівняння результатів МГД розрахунків використовувалося критеріальне число Гартмана

$$Ha = BR\sqrt{\sigma/\rho\nu}, \quad (6)$$

де ν – кінематична в'язкість.

Зважаючи на те, що для верифікації математичної моделі проводилося порівняння профілів швидкості з експериментальними профілями [29–31], наведеними в дослідженні [11], чисельні дослідження проведені для 30 % водного розчину гідроксиду калію (KOH). Основні фізичні властивості рідини: густина – 1280 кг/м^3 ; динамічна в'язкість – $0,00143 \text{ Па}\cdot\text{с}$; кінематична в'язкість – $1,18 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; електропровідність – $73,67 \text{ См/м}$; теплопровідність – $0,727 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; теплоємність – $3000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$.

Геометричні параметри досліджуваного місцевого опору в коліні подано в табл. 1.

Таблиця 1

Геометричні параметри місцевого опору

Параметр	Коліно
Діаметр труби до повороту, мм	100
Діаметр труби після повороту, мм	100
Довжина ділянки до повороту, мм	1000
Довжина ділянки після повороту, мм	2000
Радіус повороту, мм	100

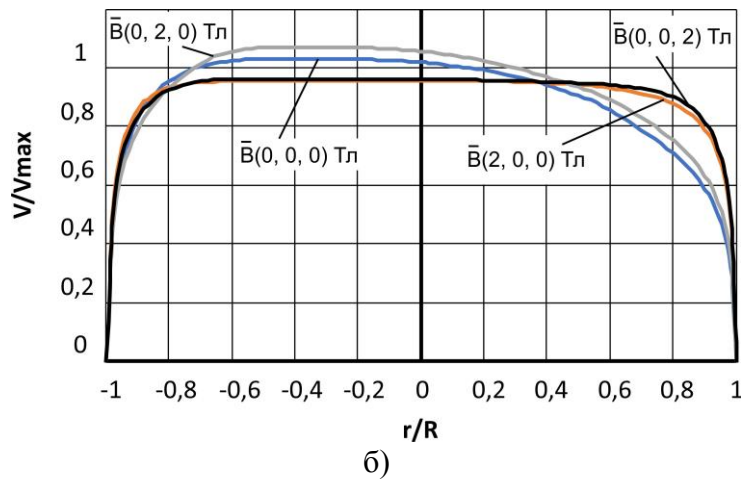
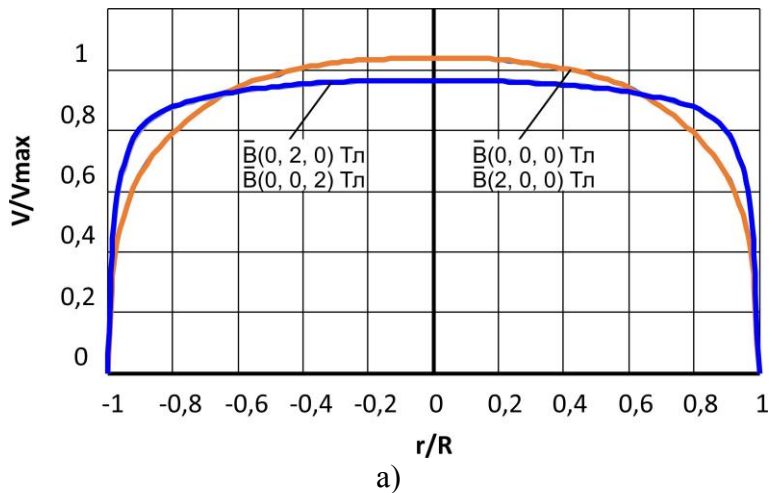


Рис. 2. Розподіл швидкості вздовж радіуса: а) на відстані 500 мм до повороту; б) на відстані 1500 мм після повороту

Магнітне поле має значний вплив на епюру швидкості до повороту та після нього в коліні (рис. 2) внаслідок того, що вектор магнітної індукції або на першій, або на другій ділянці перпендикулярний осі труби. Це призводить до деформації епюри швидкості та її витягування до стінок, тобто збільшення швидкості біля стінок, порівняно з випадком без магнітного поля. Магнітна індукція задавалася вектором $\vec{B}(B_x, B_y, B_z)$ Тл таким чином, щоб тільки одна проекція цього вектора була ненульовою для простоти порівняння впливу магнітного поля на параметри течії. Швидкість належить до максимальної швидкості V_{max} в центрі труби, що задавалася як гранична умова.

Результати розрахунку течії в коліні з поворотом на 90° зображено на рис. 3.

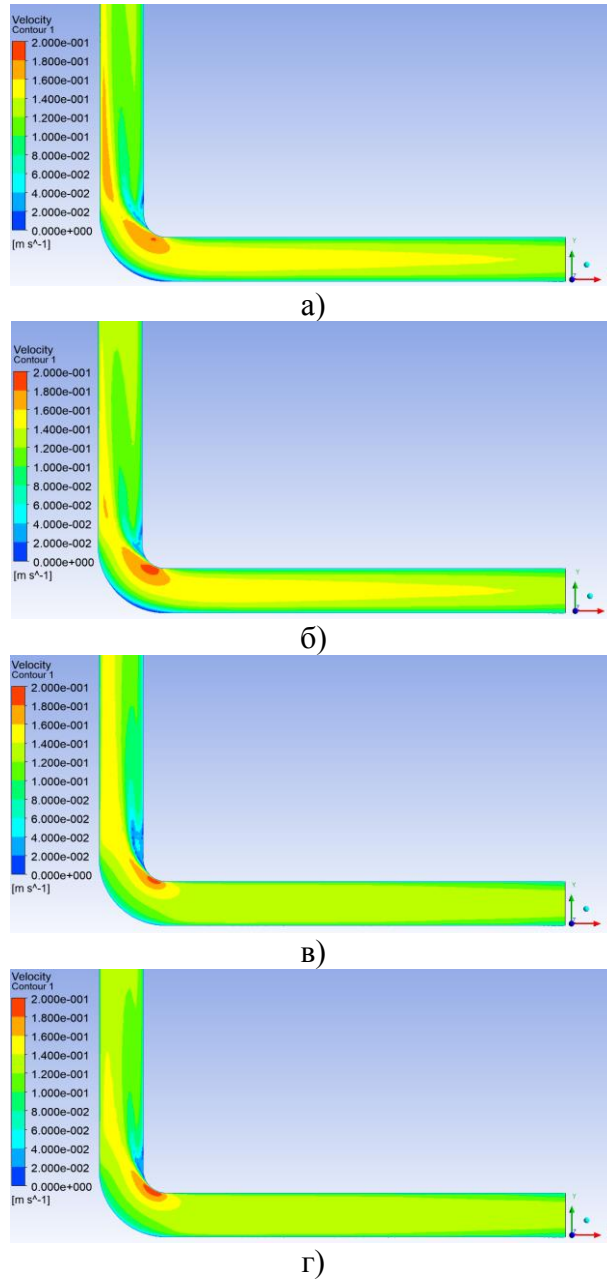


Рис. 3. Розподіл швидкості під час течії в коліні:
а) $\bar{B}(0,0,0)$ Тл; б) $\bar{B}(2,0,0)$ Тл; в) $\bar{B}(0,2,0)$ Тл; г) $\bar{B}(0,0,2)$ Тл

Дія магнітного поля практично не впливає на картини течії в плавному повороті труби (рис. 3), але магнітне поле з індукцією $\vec{B} (0, 2, 0)$ Тл збільшує область відриву, й навпаки зона відриву зменшується для випадку $\vec{B} (0, 0, 2)$ Тл.

На рис. 4 зображено залежність втрат тиску на розглянутому гідравлічному місцевому опорі від числа Гартмана. Порівнювалися випадки різної орієнтації магнітного поля за рахунок завдання вектору магнітної індукції за проекціями. Діапазон зміни проекції магнітної індукції на кожную вісь – $0 \dots 2$ Тл з інтервалом $0,5$ Тл. Можна бачити, що коефіцієнт місцевого опору має квадратичну залежність від числа Гартмана (коефіцієнт кореляції Пірсона дорівнює $0,999$).

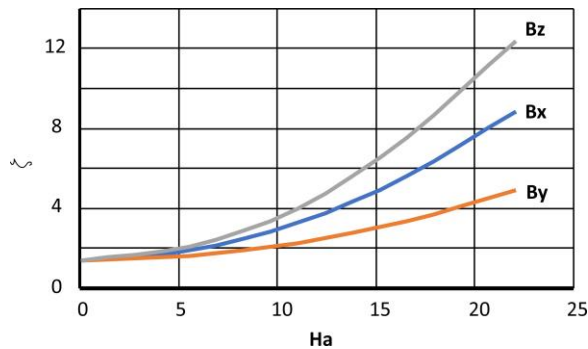


Рис. 4. Залежність коефіцієнта місцевого опору від числа Гартмана

Отже, коефіцієнт місцевих опорів для випадку течії електропровідної рідини залежить не тільки від числа Рейнольдса, як це відбувається для загальних рідин, а також від величини та напрямку вектора магнітної індукції. На рис. 5 зображено залежність коефіцієнта від чисел Рейнольдса та напрямку дії магнітної індукції. Можна бачити, що максимальні значення опору трапляються тоді, коли вектор магнітної індукції направлено перпендикулярно до обох дільниць коліна (вісь z згідно з рис. 1а).

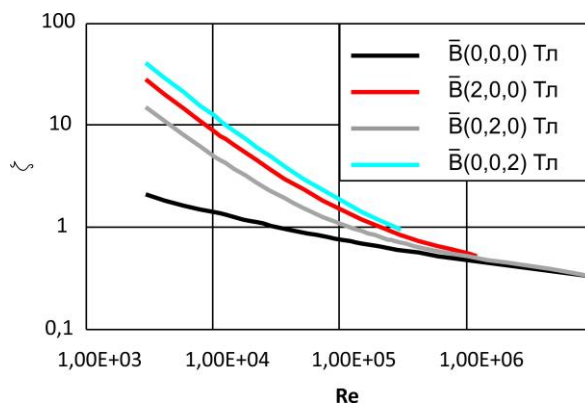
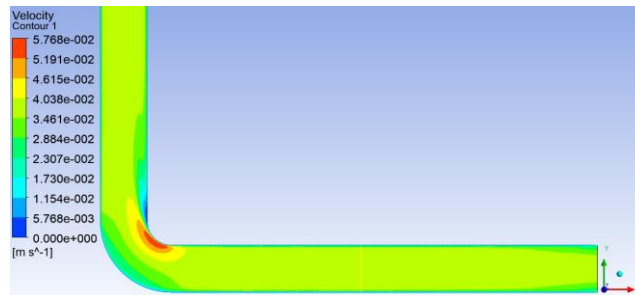
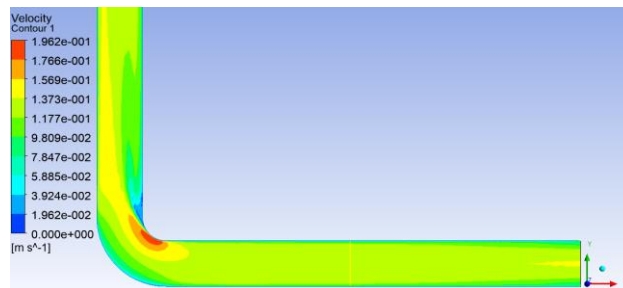


Рис. 5. Залежність коефіцієнта місцевого опору від числа Рейнольдса

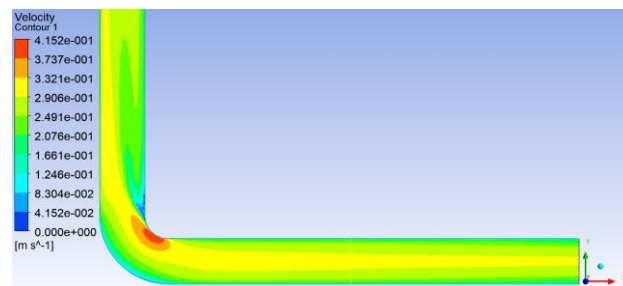
Зі збільшенням чисел Рейнольдса Re , відповідно, швидкості течії рідини коефіцієнт опору прагне до значень коефіцієнтів опору без дії магнітного поля. Асимптотичні значення коефіцієнтів опору електропровідної рідини під дією магнітного поля для абсолютно гладкої труби дорівнюють значенням коефіцієнтів місцевого опору без дії магнітного опору за значень $Re > 10^6$. Але за малих значень чисел Рейнольдса вплив магнітного поля дуже значний, що збільшує коефіцієнт ζ більше ніж у 15 разів. Рівняння для розрахунку коефіцієнтів ζ родано в табл. 2.



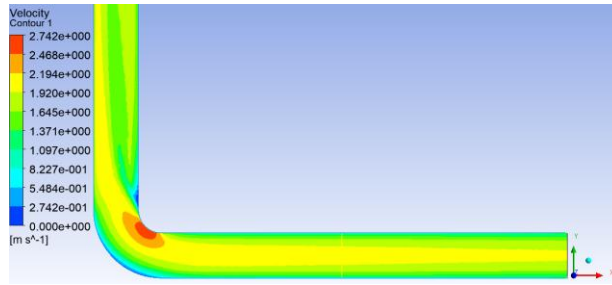
а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Розподіл швидкості під час течії в коліні:

а) $Re = 3000$; б) $Re = 15000$; в) $Re = 22000$;

г) $Re = 150000$

Коефіцієнт кореляції отриманих залежностей більше ніж 0,9, залежності степеневі. Необхідно зауважити, що отримані рівняння відповідають магнітному полю з модулем вектора магнітної індукції 2 Тл. Загалом, коефіцієнт ζ є функцією двох параметрів: число Рейнольдса та вектор магнітної індукції. Тому що напрямок значно впливає на значення опору не можливо знайти апроксимуюче рівняння для всіх випадків.

Таблиця 2

Рівняння для розрахунку коефіцієнту місцевого опору

Вектор магнітної індукції	Рівняння	Коефіцієнт кореляції
$\bar{B}(0, 0, 0)$ Тл	$11,6Re^{-0,228}$	0,983
$\bar{B}(2, 0, 0)$ Тл	$406Re^{-0,484}$	0,908
$\bar{B}(0, 2, 0)$ Тл	$4360Re^{-0,67}$	0,973
$\bar{B}(0, 0, 2)$ Тл	$25800Re^{-0,822}$	0,992

На рис. 6 зображено зміну картини течії зі збільшенням швидкості, відповідно, й числа Рейнольдса. Помітне збільшення зони відриву зі збільшенням числа Рейнольдса.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. На основі чисельного моделювання течії електропровідної рідини в коліні трубопроводу за допомогою розв'язання рівнянь Нав'є – Стокса, осереднених за Рейнольдсом, визначено залежності втрат тиску в плавному повороті.

1. Магнітне поле має значний вплив на епюру швидкості до повороту та після нього в коліні внаслідок того, що орієнтація вектора магнітної індукції або на першій, або на другій ділянці перпендикулярна трубі. Це призводить до деформації епюри швидкості та до її витягування до стінок, тобто збільшення швидкості біля стінок, у порівнянні з випадком без магнітного поля.

2. Коефіцієнт місцевих опорів для випадку течії електропровідної рідини залежить не тільки від числа Рейнольдса, як це відбувається для загальних рідин, а також від величини та напрямку вектора магнітної індукції.

3. Максимальні значення опору відбуваються тоді, коли вектор магнітної індукції направлено вздовж однієї з осей трубопроводу коліна.

4. Асимптотичне значення коефіцієнтів опору електропровідної рідини під дією магнітного поля збігаються зі значеннями коефіцієнтів місцевого опору без дії магнітного опору при значеннях $Re > 10^6$. Але за малих значень чисел Рейнольдса вплив магнітного поля дуже значний, що збільшує коефіцієнт ζ більше ніж у 15 разів.

Список використаних джерел:

1. Frank M. Visual analysis of two-dimensional magnetohydrodynamics. Phys. Fluids, 2001. Vol. 13. P. 2287–2295.

2. 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). P. 23–33.

3. 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 solet effect. Thermal Science and Engineering Progress, 2021. 22 p. 100816.

4. 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. P. 1–11.

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). P. 257–265.

6. Сёмин Д. А., Роговой А. С. Влияние типа и размера расчетных сеток на точность расчета течений в вихрекамерных нагнетателях // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Збірник наукових праць. Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. Харків: НТУ “ХПІ”. 2016. № 41 (1213). С. 70–77.

7. Сёмин Д. А., Роговой А. С., Левашов А. Н., Левашов Я. Н. Верификация расчетов течений в вихрекамерных устройствах // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія: 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). P. 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). P. 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. P. 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. P. 271–278.
 14. *Liu M., Duan Y. F.* Resistance properties of coalewater slurry flowing through local piping fittings // Exp Therm Fluid Sci, 2009, 33 (5). P. 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. P. 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). P. 314–320.
 17. *Rogovyi A. S.* Verification of fluid flow calculation in vortex chamber superchargers // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. 2016. Вып. 39. С. 39–46.
 18. *Tavangar S., Hashemabadi S. H., Saberimoghadam A.* CFD simulation for secondary breakup of coalewater slurry drops using OpenFOAM // Fuel Process Technol. 2015. 132. P. 153–163.
 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. P. 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., Мірошникова М. В.* Математична модель просторової тривимірної течії водовугільного палива // Вісник СХУ ім. В. Даля. Северодонецьк: 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. Москва: Дрофа. 2003. 840 с.
25. *Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л.* Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета. 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. P. 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). P. 26–31.
29. *Сьомін Д. О., Павлюченко В. О., Мальцев Я. І., Войцеховський С. В., Роговий А. С., Дмитрієнко Л. В., Мальцева М. О.* Вихрові виконавчі пристрої: у 2 частинах: монографія. Луганськ: Вид-во СЧУ ім. В. Даля, 2009. Ч. 1. Однорідні робочі середовища. 256 с.
30. *Rogovyi A., Khovanskyi S., Hrechka I., Gaydamaka A.* Studies of the Swirling Submerged Flow Through a Confuser. In Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, 2020. P. 85–94.
31. *Роговий А. С.* Використання методів числового вирішення задач інженерного аналізу: навчальний посібник. Харків: ХНАДУ, 2019. 112 с.

References:

1. Frank M. Visual analysis of two-dimensional magnetohydrodynamics. *Phys.Fluids*, 2001. vol.13, pp. 2287-2295.
2. 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.
3. 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 solet effect. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021. 22, pp. 100816.
4. 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.
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. Vlijanie tipa i razmera raschetnyh setok na tochnost' rascheta techenij v vihre-kamernyh nagnetateljah. 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 vihrekamernyh ustrojstvah. 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, 1958. Vol. 31.

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. Syomin D.O., Rogovyi A.S. Vykhorokamerni nahnitachi: monohrafiya. Kharkiv. FOP Mezina V.V. 2017. 204 s.
 21. Rogovyi A. S. Rozrobka teorii ta metodiv rozrakhunku vykhorokamernykh nahnitachiv : dys. ... d-ra tekhn. nauk : spets. 05.05.17 / Kharkivs'kyy nats. avtomobil'no-dorozhniy un-t. Kharkiv, 2017. 364 s.
 22. Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Baranov I., Miroshnikova M. Matematychna model' prostоровoyi 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. Lojcsjanskij 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. Syomin D.O., Pavlyuchenko V.O., Maltsev Ya.I., Voytse-khovskiy S.V., Rogovyi A.S., Dmytriyenko L.V., Maltseva M.O. Vykrovi vykonavchi prystroyi: V 2-kh chastynakh: Monohrafiya. Lugansk: vyd-vo SNU im. V.Dalya, 2009. Ch.1 Odnoridni robochi seredovyshcha. 256 s.
 30. Rogovyi A., Khovanskyi S., Hrechka I., Gaydamaka A. Studies of the Swirling Submerged Flow Through a Confuser. In Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, 2020. pp. 85-94.
 31. Rogovyi A.S. Vykorystannya metodiv chyslovoho vyri-shennya zadach inzhenerneho analizu: navchal'nyy posibnyk. Kharkiv: KhNADU, 2019. 112 s.