МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МІРОШНИКОВА МАРІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 629.45.048.3

«ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ УДОСКОНАЛЕННЯМ ОЧИЩЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ АПАРАТІВ І ТРУБОПРОВОДІВ»

Спеціальність 05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів
Галузь знань 027 – транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

М.В. Мірошникова

Науковий керівник: **Чернецька-Білецька Наталія Борисівна**
доктор технічних наук, професор

Сєвєродонецьк – 2021

АНОТАЦІЯ

Мірошникова М.В. Підвищення енергоефективності холодильного обладнання пасажирських вагонів удосконаленням очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів. – Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Сєвєродонецьк, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання підвищенню енергоефективності холодильного обладнання пасажирських вагонів удосконаленням очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів.

В роботі вперше науково обґрунтована можливість очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів холодильних машин пасажирських вагонів від залишків мінеральної оливи за рахунок використання властивостей течії електромагнітної рідини, що забезпечує взаємозамінність та можливість використання альтернативних холодоагентів в існуючих системах кондиціювання пасажирських вагонів (СКП). Набули подальшого розвитку:

- математичні моделі процесів очищення поверхонь апаратів і трубопроводів холодильних машин від залишків мінеральної оливи, які дозволяють прогнозувати можливість взаємозаміни альтернативних холодоагентів у СКП пасажирських вагонів.

- досліджені залежності для визначення гідравлічного опору електропровідної рідини, що дозволяють оцінити ступінь впливу параметрів течії на ефективність очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів СКП пасажирського вагону.

Практичне значення:

- створено стенд для дослідження процесів очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів холодильних машин, що дозволяє реєструвати ступінь очищення поверхонь від залишків мінеральної оливи;

- за результатами проведених досліджень запропоновані технічні рішення, що дозволяють досягти взаємозамінності альтернативних холодоагентів враховуючи їх функціональні властивості;

- розроблена методика очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів холодильних машин від залишків мінеральної оливи за рахунок використання течії електропровідної рідини. Прогнозоване підвищення ефективності процесу очищення холодильного обладнання пасажирських вагонів, в порівнянні з існуючою технологією, склало 34,5%. (засвідчено актами впровадження від ДП ІНСТИТУТ "УКРНДІПРОЕКТ", ППО «Маріупольське вагонне депо»);

- отримані наукові результати використовуються у навчальному процесі СНУ ім. В. Даля при підготовці здобувачів вищої освіти за напрямами 273 − «Залізничний транспорт» та 275 − «Транспортні технології (на залізничному транспорті)».

Практичне впровадження результатів роботи підтверджується відповідними документами, що наведені в додатках до дисертації.

Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 19 наукових роботах. З них 1 монографія, 3 статті у виданнях, які включені до наукометричних баз: Scopus, Web of Science, 7 статтей в спеціалізованих видавництвах, рекомендованих МОН України, 6 публікацій в матеріалах науково-практичних конференцій.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані цілі та завдання, визначені об'єкт, предмет і методи дослідження, сформульована наукова новизна й відображено практичне значення результатів, які виносяться на захист. Представлено особистий внесок здобувача, апробацію результатів досліджень, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану проблеми, визначені мета і завдання дослідження.

Показано, що електропровідні рідини (магнітні рідини) використовуються в багатьох галузях промисловості: для створення магнітогідродинамічних насосів, магнітогідродинамічної генерації енергії, очищення трубопроводів. Також за допомогою магнітного поля можна впливати на течію плазми, рідких металів, води та інших рідин з електропровідними властивостями. Складність процесів, що відбуваються під час течії електропровідної рідини привела до відокремлення наукового напрямку – магнітної гідродинаміки.

Встановлено, що головною причиною забруднення внутрішніх поверхонь трубопроводів СКП пасажирського вагона є утворення залишків мінеральної оливи в процесі функціонування системи кондиціонування. Ці забруднення можуть бути як результатом неякісного очищення внутрішньої поверхні апаратів і трубопроводів, так і можуть утворитися в результаті корозії.

У другому розділі проведено чисельне моделювання течії електропровідної рідини в трубопроводі з місцевими опорами.

Визначені залежності втрат тиску на повороті в коліні трубопроводу на основі вирішення рівнянь Нав’є-Стоксу осереднених за Рейнольдсом. Залежності коефіцієнтів втрат тиску під час течії в раптовому розширенні та раптовому звуженні визначено на основі методу чисельного моделювання течії електропровідної рідини в трубопроводі з місцевими опорами. досліджені залежності для визначення гідравлічного опору електромагнітної рідини, що дозволяють оцінити ступінь впливу параметрів течії на ефективність очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів СКП пасажирського вагону. Моделювання проведено для діапазону швидкостей (від 0,1 до 3 м/с) та чисел Рейнольдса, які відповідають можливим швидкостям руху магнітної рідини в радіаторі. Визначено втрати тиску для підбору параметрів перекачування рідини, що дозволило мінімізувати експериментальні дослідження гідравлічних параметрів перекачування рідини та сконцентруватись на дослідженнях очищення. Отримали подальший розвиток досліджені залежності для

визначення гідравлічного опору електромагнітної рідини, що дозволяють оцінити ступінь впливу параметрів течії на ефективність очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів СКП пасажирського вагону.

Математичне моделювання дозволяє визначити якість заповнення твердими частинками магнетиту поперечного перерізу, і особливо якщо є поворот потоку, як це відбувається в радіаторах. Дуже наочно це можна побачити за результатами розрахунку зносу трубопроводу при перебігу електропровідної рідини з магнітним полем і без.

У третьому розділі представлені результати експериментальних досліджень закономірностей зміни параметрів течії електропровідної рідини. Розглянуто поводження електропровідних рідин у магнітному полі та використання їх для очищення води від залишків олії. Визначені фізичні явища руху твердих частинок електропровідної рідини на основі магнетиту в різних елементах трубопроводу, що покращило параметри очищення. Магнітні частинки електропровідної рідини досить гарно заповнюють границі перетину, якщо є поворот потоку, як це відбувається у радіаторах.

На основі порівняння результатів чисельного розрахунку з експериментальними даними проведена верифікація розрахунку течії електропровідної рідини в круглих трубах та визначено оптимальну за похибкою розрахунку модель турбулентності і параметрів її використання. Порівняння профілів швидкості показало досить гарний збіг з результатами експерименту для всіх моделей.

У четвертому розділі викладені результати впровадження запропонованих заходів щодо підвищення енергоефективності холодильного обладнання пасажирських вагонів і удосконалення очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів СКП пасажирського вагону.

У розрахунках економічний ефект від використання модернізованих СКП пасажирського вагона залізничного транспорту досягається за рахунок підвищення енергоефективності виробничої діяльності. Економічний ефект розрахований на 15 років, виходячи з того, що модернізація проводиться при

виконанні капітально-відновлюваного ремонту з продовженням терміну служби. Термін окупності капіталовкладень (за всіма разом запропонованими рішеннями з вдосконалення) складає 4 роки. Сумарний економічний ефект за весь період експлуатації (15 років) за всіма разом запропонованими рішеннями вдосконалення для одного вагона становить 248,57 тис. грн, а для експлуатаційного парку, який потрібно перевести станом на 2021 рік становить 500 пасажирських вагонів – на загальну суму 5,61948 млн. грн.

За результатами теоретико-експериментальних досліджень розроблені технічні рішення і рекомендації щодо СКП вагону для підвищення екологічності, економічності , безпеки руху.

Ключові слова: система кондиціювання, енергоефективність, експериментальні виміри, математичне моделювання, пасажирський вагон, електропровідна рідина, чисельний розрахунок, магнітна гідродинаміка, очищення рідин.

Список публікацій здобувача

Основні праці:

1. Забезпечення сталого розвитку регіону: економічні, управлінські, правові та інформаційно-технічні аспекти: колективна монографія / Н. Б. Чернецька-Білецька, І. О. Баранов, М. В. Мірошникова ; за заг. ред. Ю. І. Клюс., Н. В. Швець. – Сєвєродонецьк. : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2017. – С. 193 - 212. - ISBN 978-617-11-0118-0.

2. Improving industrial pipeline transport using research regularities of flow of mixtures in material pipeline [Electronic resource] / N. Chernetskaya-Beletskaya, O. Guschin, A. Shvornikova, I. Baranov, M. Miroshnikova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4/7, Iss. 88. – P. 38 - 44. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.106790.

3. Increasing the efficiency of highly concentrated coal-water fuel based on the simulation of non-Newtonian fluid flow [Electronic resource] / N. Chernetskaya-Beletskaya, A. Rogovyi, I. Baranov, A. Krut, M. Miroshnikova, N. Bragin // MATEC

Web of Conferences. – 2019. – Vol. 294, Iss. 01009. – P.1 - 7. DOI : https://doi.org/10.1051/matecconf/201929401009.

4. Верифікація розрахунку течії електропровідної рідини в круглих трубах / Н. Б. Чернецька-Білецька, А. С. Роговий., М. В. Мірошникова, А. Р. Штиков // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2021. – № 196. – С. 87 - 98.

5. Чернецька-Білецька Н. Б. Оцінювання ефективності транспортної системи з перекачування електропровідної рідини за результатами математичного моделювання / Н. Б. Чернецька-Білецька, А. С. Роговий, М. В. Мірошникова // Системи та технології. – 2021. – №1 (61). – С. 5 - 20.

6. Чернецька-Білецька Н. Б. Втрати тиску під час течії електропровідної рідини місцевими опорами трубопроводу / Чернецька-Білецька Н. Б., Роговий А. С., Мірошникова М. В. // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2021. − № 5 (269). − С. 69 - 75.

7. Chernetskaya-Beletskaya N. Technology of breakage of coal for the coal- water fuel production / N. Chernetskaya-Beletskaya, I. Baranov, M. Miroshnykova // TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2015. – Vol. 15. – № 2. – P. 63 - 68.

8. Some aspects improvement of industrial pipeline transport / N. Chernetskaya-Beletskaya, I. Baranov, M. Miroshnykova, S. Kravchenko, M. Bragin // TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2017. – Vol. 17. – №1 – P. 33-40.

9. Study on the coal-water fuel pipeline transportation taking into account the granulometric composition parameters [Electronic resource] / N. Chernetskaya-Beletskaya, A. Rogovyi, A. Shvornikova, I. Baranov, M. Miroshnikova, N. Bragin // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, Iss.4.3. – P. 240 - 245. DOI : 10.14419/ijet.v7i4.3.19794

10. Баранов І. Дослідження показників роботи вагоноремонтного комплексу і безпеки руху / І. О. Баранов, М. В. Мірошникова // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2020. – Вип. 192. – С. 32 - 44.

11. Чернецкая-Белецкая Н. Б. Исследование влияния гранулометрического состава водоугольного топлива на его реологические и гидродинамические характеристики / Н. Б. Чернецкая-Белецкая, И. О. Баранов, В. Н. Остапенко, М. В. Мирошникова // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2017. – №3 (233). – С. 239-245.

12. Математичне моделювання руху водовугільного палива в трубопроводі / Н. Б. Чернецька-Білецька, А. С. Роговий, І. О. Баранов, М. В. Мірошникова // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2017. − № 9 (239). − С. 85 - 90.

13. Математична модель просторової тривимірної течії водовугільного палива / Н. Б. Чернецька-Білецька, А. С. Роговий, І. О. Баранов, М. В. Мірошникова // Вісник СНУ ім. В.Даля. – 2018. – № 1 (242). – С. 159-164.

Праці апробаційного характеру:

14. Mathematical model flow coal-water fuel / N. Cherneckaya-Beleckaya, A. Rogovyi, I. Baranov, M. Miroshnykova // Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport. Problems, experience, prospects: thesis, May 2018, Italy. – Severodonetsk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. – 2018. – P. 126 – 127.

15. Чернецкая-Белецкая Н. Б. Основные уравнения механики магнитной жидкости и их использование в разработке трубопроводной транспортной установки /Н. Б. Чернецкая-Белецкая, М. В. Мирошникова // Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи : зб. тез наук. практ. конф.,11-17 квітня 2016р., м. Трускавець / відп. ред. Н. Б. Чернецька-Білецька. – Сєвєродонецьк : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. – С. 209 – 212.

16. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В. Влияние гранулометрического состава водоугольного топлива на его реологические характеристики. Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми економіки транспорту» (20.04-21.04.2017). – Д.: ДНУЗТ, м. Дніпро, 2017, С. 63-64.

17. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В., Баранова В.Н. Исследование влияния характеристик водоугольного топлива на удельные потери давления. Матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». 23-26 травня 2017р. м. Черкаси, 2017. С. 53-56.

18. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В. Повышение эффективности гидротранспортирования водоугольного топлива. Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції «Людина, суспільство, комунікативні технології», 22-23 вересня 2017р., м. Лиман, 2017, С. 299-302. 20

19. Experimental research of refrigeration equipment energy efficiency for passenger railway carriages / N. Chernetskaya-Beletskaya, A. Rogovyi, M. Miroshnykova // Theses of XIII international scientific and practical conference “Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport. Problems, experience, prospects”. – The Ministry of education and science of Ukraine, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. – Severodonetsk. – 2021. – P. 94–96.

ABSTRACT

Miroshnykova M.V. Increasing Energy Efficiency of the Cooling Systems for Passenger Cars by Improved Cleaning of Inner Surfaces of Devices and Pipelines. – Manuscript.

Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Science (Ph.D.) in specialty 05.22.07 – Railway rolling stock and traction trains. – Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, 2021.

The dissertation solves a topical research problem of increasing the energy efficiency of the cooling systems for passenger cars by improved cleaning of inner surfaces of devices and pipelines.

For the first time, the paper scientifically substantiates the possibility of cleaning inner surfaces of devices and pipelines of cooling systems for passenger cars from mineral oil residues by using the electromagnetic liquid flow parameters that provides interchangeability and the possibility of using alternative refrigerants in the existing air conditioning systems (ACS) of passenger cars.

There have been further developed

- mathematical models of cleaning of surfaces of devices and pipelines of cooling systems from mineral oil residues, thus allowing to predict the possibility of interchangeability of alternative refrigerants in the ACS of passenger cars.

- dependences for determining hydraulic resistance of conducting liquid, thus allowing to estimate the degree of influence of the flow parameters on the efficiency of cleaning of inner surfaces of devices and pipelines of the ACS of passenger cars.

Practical importance:

- the stand for research of cleaning of inner surfaces of devices and pipelines of cooling systems is created that allows to monitor the degree of cleaning of surfaces from mineral oil residues;

- based on the research results, technical solutions are proposed allowing to achieve interchangeability of alternative refrigerants taking into account their functional properties;

- the method of cleaning of inner surfaces of devices and pipelines of cooling systems from mineral oil residues by using the conducting liquid flow is developed. The estimated increase in the efficiency of cleaning of cooling systems of passenger cars compared to the existing technology amounted to 34.5% (certified by the implementation act of SE INSTITUTE “UKRNDIPROEKT”, PTUO “Mariupol Wagon Depot”);

- the obtained research results are used in the educational process of V. Dahl EUNU while training students in specialties 273 – “Railway Transport” and 275 – “Transport Technology (in Railway Transport)”.

The implementation of the research results is confirmed by the relevant documents listed in the supplements to the dissertation.

The main points of the dissertation are highlighted in 19 research papers with one monograph, three articles in editions included in scientometric databases Scopus, Web of Science, 7 articles in specialized editions recommended by the Ministry of Education and Science of Ukraine, 6 publications in scientific and practical conferences.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, states goals and objectives, describes the object, subject, and research methods, presents scientific novelty, and reflects the practical importance of the research results. It presents the author's personal contribution, the approbation of the research results, structure, and the paper scope.

The first chapter analyses the current state of the presented issue, and states the study purpose and objectives.

The paper shows that conducting liquids (magnetic liquids) are used in many industries, namely for magnetohydrodynamic pumps, magnetohydrodynamic energy generation, pipeline cleaning. Besides, a magnetic field can influence the flow of plasma, liquid metals, water, and other liquids with conducting properties. The complexity of the processes occurring during the conducting liquid flow has led to determining the scientific direction, i.e., magnetic hydrodynamics.

The chapter determines that the main cause of contamination of inner surfaces of the ACS pipelines of passenger cars is mineral oil residues formed during the operation of the air conditioning system. These contaminants can result from poor cleaning of the inner surface of devices and pipelines, or as a result of corrosion.

The second chapter provides a numerical simulation of the conducting liquid flow in the pipeline with local resistance. The paper determines the dependences of the pressure loss in the pipe bend based on solving the Navier-Stokes equations averaged by Reynolds. The research determines the dependences of the pressure loss coefficients during the flow in sudden expansion and sudden narrowing based on the method of numerical modeling of the conducting liquid flow in the pipeline with local resistance. The paper studies the dependences for determining hydraulic resistance of electromagnetic liquid, thus making it possible to estimate the degree of influence of

the flow parameters on the efficiency of cleaning of inner surfaces of devices and pipelines of the ACS of passenger cars. The modeling is performed for a speed range (from 0.1 to 3 m/s) and Reynolds numbers, which correspond to the possible speed of the magnetic liquid flow in the radiator. The paper determines the pressure loss for the selection of the liquid pumping parameters that has allowed minimizing experimental studies of the hydraulic fluid pumping parameters and focusing on cleaning studies. The studied dependences for determining hydraulic resistance of electromagnetic liquid have made it possible to estimate the degree of influence of the flow parameters on the efficiency of cleaning of inner surfaces of devices and pipelines of the ACS of passenger cars.

Mathematical modelling allows determining the quality of filling the magnetite cross-section with solid particles, and especially with the flow rotation as is the case in radiators. This can be seen clearly from the results of estimating the pipeline wear during the conducting liquid flow with and without a magnetic field.

The third chapter presents the results of experimental studies of the patterns of changes in the parameters of the conducting liquid flow. It considers the behaviour of conducting liquids in a magnetic field and its use for water purification from oil residues. The chapter determines the physical phenomena of motion of solid particles of conducting liquid based on magnetite in various parts of the pipeline that has improved the cleaning parameters. The magnetic particles of the conducting liquid fill the boundaries of the section quite with the flow rotation, as is the case in radiators.

Based on the comparison of the results of numerical calculations with experimental data, the author performs the verification of the calculation of the conducting liquid flow in round pipes and determines the optimal model of turbulence and parameters of its use according to the calculation error. The comparison of the velocity profiles has shown a fairly good coincidence with the results of the experiment for all models.

The fourth chapter presents the results of the implementation of the proposed measures to improve the energy efficiency of cooling systems for passenger cars and

improve the cleaning of inner surfaces of devices and pipelines of the ACS of passenger cars.

In the calculations, the economic effect of using the improved ACS of passenger cars of railway transport is achieved by increasing the energy efficiency of production activities. The economic effect is calculated for 15 years based on the fact that modernization is carried out during the overhaul with the extension of service life. The payback period of investments (for all proposed improvement solutions) is 4 years. The total economic effect for the entire period of operation (15 years) for all the proposed improvement solutions for one car is 248.57 thousand UAH, and for the fleet to be updated as of 2021 is 500 passenger cars with a total amount of 5.61948 million UAH.

Based on the results of theoretical and experimental research, the paper presents technical solutions and recommendations for the ACS of passenger cars to improve environmental friendliness, efficiency, and traffic safety.

Key words: air conditioning system, energy efficiency, experimental measurements, mathematical modeling, passenger car, conducting liquid, numerical calculation, magnetic hydrodynamics, liquid purification.

List of candidate's publicatuons

References:

1. Zabezpechennia staloho rozvytku rehionu: ekonomichni, upravlinski, pravovi ta informatsiino-tekhnichni aspekty: kolektyvna monohrafiia / N. B. Chernetska-Biletska, I. O. Baranov, M. V. Miroshnykova ; za zah. red. Yu. I. Klius., N. V. Shvets. – Sievierodonetsk. : Vyd-vo SNU im. V. Dalia, 2017. – S. 193 - 212. - ISBN 978-617-11-0118-0.

2. Improving industrial pipeline transport using research regularities of flow of mixtures in material pipeline [Electronic resource] / N. Chernetskaya-Beletskaya, O. Guschin, A. Shvornikova, I. Baranov, M. Miroshnikova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4/7, Iss. 88. – P. 38 - 44. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.106790.

3. Increasing the efficiency of highly concentrated coal-water fuel based on the simulation of non-Newtonian fluid flow [Electronic resource] / N. Chernetskaya-Beletskaya, A. Rogovyi, I. Baranov, A. Krut, M. Miroshnikova, N. Bragin // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 294, Iss. 01009. – R.1 - 7. DOI : https://doi.org/10.1051/matecconf/201929401009.

4. Veryfikatsiia rozrakhunku techii elektroprovidnoi ridyny v kruhlykh trubakh / N. B. Chernetskaia-Beletskaia, A. S. Rohovoi., M. V. Myroshnykova, A. R. Shtykov // Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT. – 2021. – № 196. – S. 87 - 98.

5. Chernetska-Biletska N. B. Otsiniuvannia efektyvnosti transportnoi systemy z perekachuvannia elektroprovidnoi ridyny za rezultatamy matematychnoho modeliuvannia / N. B. Chernetska-Biletska, A. S. Rohovyi, M. V. Miroshnykova // Systemy ta tekhnolohii. – 2021. – №1 (61). – S. 5 - 20.

6. Chernetska-Biletska N. B. Vtraty tysku pid chas techii elektroprovidnoi ridyny mistsevymy oporamy truboprovodu / Chernetska-Biletska N. B., Rohovyi A. S., Miroshnykova M. V. // Visnyk SNU im. V. Dalia. – 2021. − № 5 (269). − S. 69 - 75.

7. Chernetskaya-Beletskaya N. Technology of breakage of coal for the coal-water fuel production / N. Chernetskaya-Beletskaya, I. Baranov, M. Miroshnykova // TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2015. – Vol. 15. – № 2. – P. 63 - 68.

8. Some aspects improvement of industrial pipeline transport / N. Chernetskaya-Beletskaya, I. Baranov, M. Miroshnykova, S. Kravchenko, M. Bragin // TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2017. – Vol. 17. – №1 – R. 33-40.

9. Study on the coal-water fuel pipeline transportation taking into account the granulometric composition parameters [Electronic resource] / N. Chernetskaya-Beletskaya, A. Rogovyi, A. Shvornikova, I. Baranov, M. Miroshnikova, N. Bragin // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, Iss.4.3. – P. 240 - 245. DOI : 10.14419/ijet.v7i4.3.19794

10. Baranov I. Doslidzhennia pokaznykiv roboty vahonoremontnoho kompleksu i bezpeky rukhu / I. O. Baranov, M. V. Miroshnykova // Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu. – 2020. – Vyp. 192. – S. 32 - 44.

11. Chernetskaia-Beletskaia N. B. Yssledovanye vlyianyia hranulometrycheskoho sostava vodouholnoho toplyva na eho reolohycheskye y hydrodynamycheskye kharakterystyky / N. B. Chernetskaia-Beletskaia, Y. O. Baranov, V. N. Ostapenko, M. V. Myroshnykova // Visnyk SNU im. V. Dalia. – 2017. – №3 (233). – S. 239-245.

12. Matematychne modeliuvannia rukhu vodovuhilnoho palyva v truboprovodi / N. B. Chernetska-Biletska, A. S. Rohovyi, I. O. Baranov, M. V. Miroshnykova // Visnyk SNU im. V. Dalia. – 2017. − № 9 (239). − S. 85 - 90.

13. Matematychna model prostorovoi tryvymirnoi techii vodovuhilnoho palyva / N. B. Chernetska-Biletska, A. S. Rohovyi, I. O. Baranov, M. V. Miroshnykova // Visnyk SNU im. V.Dalia. – 2018. – № 1 (242). – S. 159-164.

Articles which demonsrtate approval of the thesis materials:

14. Mathematical model flow coal-water fuel / N. Cherneckaya-Veleckaya, A. Rogovyi, I. Baranov, M. Miroshnykova // Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport. Problems, experience, prospects: thesis, May 2018, Italy. – Severodonetsk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. – 2018. – P. 126 – 127.

15. Chernetskaia-Beletskaia N. B. Osnovnыe uravnenyia mekhanyky mahnytnoi zhydkosty y ykh yspolzovanye v razrabotke truboprovodnoi transportnoi ustanovky /N. B. Chernetskaia-Beletskaia, M. V. Myroshnykova // Innovatsii infrastruktury transportno-lohistychnykh system. Problemy, dosvid, perspektyvy : zb. tez nauk. prakt. konf.,11-17 kvitnia 2016r., m. Truskavets / vidp. red. N. B. Chernetska-Biletska. – Sievierodonetsk : Vyd-vo SNU im. V. Dalia, 2016. – S. 209 – 212.

16. Chernetskaia-Beletskaia N.B., Baranov Y.O., Myroshnykova M.V. Vlyianye hranulometrycheskoho sostava vodouholnoho toplyva na eho reolohycheskye kharakterystyky. Materialy XV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii

«Problemy ekonomiky transportu» (20.04-21.04.2017). – D.: DNUZT, m. Dnipro, 2017, S. 63-64.

17. Chernetskaia-Beletskaia N.B., Baranov Y.O., Myroshnykova M.V., Baranova V.N. Yssledovanye vlyianyia kharakterystyk vodouholnoho toplyva na udelnыe potery davlenyia. Materialy XXII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Hidroaeromekhanika v inzhenernii praktytsi». 23-26 travnia 2017r. m. Cherkasy, 2017. S. 53-56.

18. Chernetskaia-Beletskaia N.B., Baranov Y.O., Myroshnykova M.V. Povыshenye эffektyvnosty hydrotransportyrovanyia vodouholnoho toplyva. Materialy V mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Liudyna, suspilstvo, komunikatyvni tekhnolohii», 22-23 veresnia 2017r., m. Lyman, 2017, S. 299-302. 20

19. Experimental research of refrigeration equipment energy efficiency for passenger railway carriages / N. Chernetskaya-Beletskaya, A. Rogovyi, M. Miroshnykova // Theses of XIII international scientific and practical conference “Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport. Problems, experience, prospects”. – The Ministry of education and science of Ukraine, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. – Severodonetsk. – 2021. – P. 94–96.

ЗМІСТ

	ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....……..……..	19
	ВСТУП……	20
	РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ І ВИВЧЕНОСТІ ПИТАННЯ ОЧИЩЕННЯ СИСТЕМ КОНДИЦІЮВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ.....……..…….. ..……..	27
1.1	Системи кондиціювання повітря (СКП) пасажирського вагона.....	27
1.2	Аналіз причин забруднення внутрішніх поверхонь трубопроводів кондиціонера пасажирського вагона. .....……	33
1.3	Аналіз способів очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів систем кондиціювання повітря пасажирських вагонів від залишків мінеральної оливи.....……	36
1.4	Сфера застосування електромагнітної (електропровідної) рідини....	39
1.5	Вплив магнітного поля на параметри течії електропровідної рідини та характеристики очищення.....……	44
1.6	Висновки по розділу 1……	48
	РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОЧИЩЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ СИСТЕМ КОНДИЦІЮВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ ВІД ЗАЛИШОК МІНЕРАЛЬНОЇ ОЛИВИ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ МАГНІТНОЇ РІДИНИ	50
2.1	Верифікація розрахунку течії електропровідної рідини в круглих трубах	50
2.2	Розрахунок течії електропровідної рідини в коліні трубопроводу	63
2.3	Втрати тиску під час течії електропровідної рідини місцевими опорами трубопроводу	73
2.4	Висновки по розділу 2……..	84
	РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОЧИЩЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ СИСТЕМ КОНДИЦІЮВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ	87
3.1	Методика проведення експериментальних досліджень	87

3.2	Опис та принцип роботи експериментальної установки	102
3.3	Робота експериментального стенду	103
3.4	Висновки по розділу 3……..	105
	РОЗДІЛ 4. ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ СИСТЕМ КОНДИЦІЮВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ	106
4.1	Розрахунок собівартості робіт з очищення внутрішніх поверхонь апаратів та трубопроводів СКП пасажирського вагона	106
4.2	Розрахунок сумарного економічного ефекту	112
4.3	Висновки по розділу 4……..	115
	ВИСНОВКИ	117
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	120
	ДОДАТКИ	133
	ДОДАТОК Акти реалізації результатів досліджень	

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

МР – магнітна рідина;

МРС – магнітно-реологічна суспензія;

МГД – магнітогідродинаміка;

ПАР – поверхнево-активна речовина;

СКП – система кондиціювання повітря;

ХА – холодильний агент;

ГДК – гранично допустима концентрація;

НП – нафтопродукти;

МРСО – магніторідинний спосіб очищення;

СМЗ – синтетично миючи засоби;

ПТО – пункт технічного обслуговування;

DNS – Direct Numerical Simulation (пряме чисельне моделювання);

CFD – (Computational Fluid Dynamics) розрахунки

ВСТУП

Більша частина пасажирських вагонів, що експлуатуються на українських залізницях, побудована у 70-80 рр. минулого століття і термін їх служби закінчується. Збереження чисельності пасажирського вагонного парку досягається шляхом проведення капітального ремонту старих вагонів з продовженням терміну їх служби чи закупівлі нових. За умови обмеженого фінансування виконання відновлювальних ремонтів вагоноремонтними заводами й залізницями залишається основним засобом підтримання парку вагонів у потрібній кількості. Багато країн вважають за доцільне проводити модернізацію старих вагонів, що перевозять основну масу пасажирів. Витрати на модернізацію одного старого вагона виявляються приблизно втричі нижчими, ніж на будівництво нового. Але при цьому не враховуються конструктивні особливості установки холодильної машини. Дослідження системи кондиціонування повітря (СКП) вагона повинно бути спрямоване не тільки на забезпечення нормативів мікроклімату, але і передбачати оперативну методику функціонування основних вузлів холодильної машини.

Актуальність теми. Незважаючи на те, що в останні роки збільшується конкуренція між видами транспорту у пасажирських перевезеннях, Укрзалізниця продовжує залишатися одним з основних перевізників. Для забезпечення конкурентоспроможності залізничних пасажирських перевезень необхідно підвищити якість послуг, що в свою чергу збільшить кількість користувачів. Одним із найважливіших завдань при цьому є створення комфортних мікрокліматичних умов у вагонах. Тому необхідно широке впровадження у пасажирських вагонах нових та вдосконалення існуючих систем кондиціонування повітря, що призначені для подачі й обробки свіжого повітря, його знезаражування з метою запобігання поширенню інфекцій та хвороботворних бактерій і забезпечення заданого рівня температури та вологості у пасажирських приміщеннях. Основна вимога до СКП пасажирських вагонів − стабільність підтримки заданих параметрів мікроклімату у вагоні незалежно від

метеорологічних умов зовнішнього середовища. Важливими характеристиками їх роботи є забезпечення надійності та енергоефективність функціонування, мінімізація витрат при технічному обслуговуванні та ремонті.

З експлуатацією СКП у теперішній час пов’язано декілька технічних складнощів. Так, у процесі експлуатації кондиціонерів, відбувається забруднення внутрішніх поверхонь їх трубопроводів (в першу чергу – через накопичення на них залишків оливи), внаслідок чого зменшується продуктивність кондиціонера з подальшим його виходом із ладу.

Крім того, у пасажирському вагонному парку є вагони з СКП, що оснащенні холодильним обладнанням, яке розраховане на використання холодоагентів фреон-12 (R12), фреон-22 (R22). Відповідно до рішень Монреальського протоколу та інших міжнародних домовленостей, що до речовин, які руйнують озоновий шар, холодоагенти R12, R22 визнані озоноруйнуючими речовинами, їх виробництво і застосування в теперішній час заборонено. Тому, необхідне очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів та холодильного обладнання СКП від залишків мінеральних олив та забруднень при заміні (ретрофіті) R12, R22 на озонобезпечні альтернативні холодоагенти.

Таким чином, підвищення енергоефективності холодильного обладнання пасажирських вагонів удосконаленням очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів при використанні озонозберігаючих альтернативних холодоагентів є актуальним науково-прикладним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності до пріоритетних напрямків розвитку залізничної галузі та Концепції розвитку транспортно-дорожнього комплексу України до 2020 року та Транспортної стратегії України на період до 2030 року, згідно з науковими планами кафедри логістичного управління та безпеки руху на транспорті СНУ ім. В. Даля, є частиною держбюджетних тем СНУ ім. В. Даля: «Підвищення енерго- та ресурсозбереження на залізничному транспорті застосуванням магнітної рідини» (№ держреєстрації 0120U100688), ДН-03-15 «Розробка теорії і підвищення ефективності енергетичних процесів у

системах приготування, транспортування і спалювання водовугільного палива» (№ держреєстрації U0115U000646), за якими авторка є відповідальною співвиконавицею.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є підвищення енергоефективності холодильного обладнання пасажирських вагонів шляхом забезпечення використання альтернативних холодоагентів за рахунок удосконалення очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні завдання:

- проаналізувати вітчизняний та зарубіжний практичний досвід використання технологій очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів холодильних машин від залишків мінеральної оливи, визначити їх переваги і недоліки, та доцільність застосування для ефективного очищення;

- теоретично обґрунтувати вибір раціональних технологій для очищення внутрішніх поверхонь обладнання холодильних машин від залишків оливи при переводі холодильного обладнання на альтернативні холодоагенти;

- виконати математичне моделювання процесів очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів холодильної машини від залишків мінеральної оливи;

- створити стендове обладнання для дослідження процесів очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів від залишків мінеральної оливи та виконати експериментальні дослідження щодо оцінки ступеня впливу на них застосованих технологій та конструкції апаратів. Розробити методику проведення експериментальних досліджень;

- виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності використання обраних технологій очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів холодильної машини; розробити рекомендації та технічні рішення щодо ефективного очищення внутрішніх поверхонь обладнання холодильних машин.

Об'єкт дослідження – процеси очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів холодильного обладнання СКП пасажирських вагонів для застосування альтернативних холодоагентів.

Предмет дослідження – закономірності впливу параметрів течії електропровідної рідини в круглих трубах на ефективність очищення їх внутрішніх поверхонь від залишків мінеральної оливи та забруднень.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань використані методи загальної та магнітної гідродинаміки. Дослідження математичних моделей руху електропровідної рідини виконувалися чисельними методами із використанням сучасної комп'ютерної техніки та програмного забезпечення. Дослідження проводилося на основі порівняння експериментальних досліджень за PIV-методом велосиметрії. Керуючі нелінійні рівняння імпульсу вирішувалися чисельно, використовуючи метод контрольних об'ємів. Визначені залежності втрат тиску на повороті в коліні трубопроводу на основі вирішення рівнянь Нав'є-Стоксу осереднених за Рейнольдсом. Залежності коефіцієнтів втрат тиску під час течії в раптовому розширенні та раптовому звуженні визначено на основі методу чисельного моделювання течії електропровідної рідини в трубопроводі з місцевими опорами. Розрахунок здійснено на основі вирішення рівнянь Нав'є-Стоксу осереднених за Рейнольдсом із SST (ShearStressTransport) моделлю турбулентності. Верифікацію програмного продукту проведено шляхом порівняння результатів експериментів з результатами чисельного моделювання. Закономірності зміни параметрів течії рідини та енерговитрат від основних факторів впливу отримані в результаті проведення планованого експерименту за методикою Е.Е. Рафалеса-Ламарка.

Достовірність отриманих у дисертаційній роботі наукових результатів підтверджується задовільною збіжністю отриманих теоретичних і експериментальних даних, коректністю та правильним вибором побудованих моделей, способів і технічних засобів експериментальних випробувань, вимірювальної апаратури, програмою проведення та методами збору й обробки результатів експериментів.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

- науково обґрунтована можливість очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів холодильних машин пасажирських вагонів від залишків мінеральної оливи за рахунок використання властивостей течії електропровідної рідини, що забезпечує взаємозамінність та можливість використання альтернативних холодоагентів в існуючих СКП.

Набули подальшого розвитку:

- математичні моделі процесів очищення поверхонь апаратів і трубопроводів холодильних машин від залишків мінеральної оливи, які дозволяють прогнозувати можливість взаємозаміни альтернативних холодоагентів у СКП пасажирських вагонів.

- досліджені залежності для визначення гідравлічного опору електропровідної рідини, що дозволяють оцінити ступінь впливу параметрів течії на ефективність очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів СКП пасажирського вагону.

Практичне значення:

- створено стенд для дослідження процесів очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів холодильних машин, що дозволяє реєструвати ступінь очищення поверхонь від залишків мінеральної оливи;

- за результатами проведених досліджень запропоновані технічні рішення, що дозволяють досягти взаємозамінності альтернативних холодоагентів враховуючи їх функціональні властивості;

- розроблена методика очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів холодильних машин від залишків мінеральної оливи за рахунок використання течії електропровідної рідини. Прогнозоване підвищення ефективності процесу очищення холодильного обладнання пасажирських вагонів, в порівнянні з існуючою технологією, склало 34,5%. (засвідчено актами впровадження від ДП ІНСТИТУТ "УКРНДІПРОЕКТ", ППО «Маріупольське вагонне депо»);

- отримані наукові результати використовуються у навчальному процесі СНУ ім. В. Даля при підготовці здобувачів вищої освіти за напрямами 273 − «Залізничний транспорт» та 275 − «Транспортні технології (на залізничному транспорті)».

Особистий внесок здобувача

Основні положення і результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором особисто. У спільних наукових роботах особистий внесок автора полягає в такому: [1 ,3, 4, 9, 10, 14, 16, 18] – проведені теоретичні дослідження процесів очищення внутрішніх поверхонь систем кондиціонування пасажирських вагонів від залишків мінеральної оливи; [2, 7, 8, 15, 17] – проведені експериментальні дослідження закономірностей зміни параметрів течії та енерговитрат на його транспортування від основних факторів впливу; [6, 11] – досліджений вплив магнітного поля на коефіцієнт очищення внутрішніх поверхонь СКП; [5, 12, 13] – розроблені математичні моделі процесів очищення поверхонь апаратів і трубопроводів холодильних машин від залишків мінеральної оливи; [19]- проведені експериментальні дослідження енергоефективності холодильного обладнання пасажирських залізничних вагонів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на:

– VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи» (Україна, м. Трускавець, 2016);

– XV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми економіки транспорту» (Україна, м. Дніпро, 2017);

– XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (Україна, м. Черкаси, 2017);

– Міжнародній науково-практичній конференції «Людина, суспільство, комунікативні технології», (Україна, м. Лиман, 2017);

– X, XII Міжнародних науково-практичних конференціях Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport. Problems, experience, prospect (Italy, 2018; Albania, Vlora, 2021).

Дисертацію в повному обсязі розглянуто та схвалено на розширеному засіданні кафедри логістичного управління та безпеки руху на транспорті Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (2021 р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 19 наукових роботах. З них [1] монографія, [3] статті у виданнях, які включені до наукометричних баз: Scopus, Web of Science, [7] статей в спеціалізованих видавництвах, рекомендованих МОН України, [6] публікацій в матеріалах науково-практичних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 142 сторінки, у тому числі: 63 рисунка за текстом, 20 таблиць за текстом, список використаних джерел із 127 найменувань та 4 додатків.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ І ВИВЧЕНОСТІ ПИТАННЯ ОЧИЩЕННЯ СИСТЕМ КОНДИЦІЮВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

1.1 Системи кондиціювання повітря (СКП) пасажирського вагона

Система вентиляції повітря призначена для видалення забрудненого повітря з приміщень вагона і заміни його чистим зовнішнім. Існує два види вентиляції: природна і примусова. У пасажирських вагонах застосовується як природна, так і примусова (механічна) вентиляція. Природна вентиляція здійснюється через відкриті вікна і за допомогою дефлекторів, встановлених на даху вагона, і не вимагає витрат енергії. А примусова вентиляція здійснюється за допомогою відцентрових або осьових вентиляторів і вимагає постійної витрати енергії, в основному електричної.

За принципом роботи примусову вентиляцію поділяють на припливну, витяжну і припливно-витяжну.

Сучасні пасажирські вагони оснащені припливною вентиляцією з використанням відцентрових вентиляторів. Механічна вентиляція в залежності від способу припливу повітря в вагон поділяється на дві системи: без використання рециркуляції і з рециркуляцією повітря.

У пасажирських вагонах застосовується часткова рециркуляція повітря. До вагону подається суміш зовнішнього і взятого з вагона повітря і повертається назад. Використання рециркуляційного повітря потрібно в процесі охолодження і в опалювальний сезон.

Система кондиціювання повітря у пасажирських вагонах служить для додання повітрю необхідних фізико-хімічних властивостей: температури і вологості, вмісту кисню і вуглекислого газу, ступеня запиленості і т. ін. Ця система за допомогою мікропроцесорного пристрою в теплий період в сталому режимі здійснює автоматичне регулювання температури в вагоні в межах +22 ... 26 ° С.

Мінімальна подача зовнішнього повітря 25 м^3/ год. на одного пасажира. Холодильне обладнання установок кондиціонування повітря дозволяє підтримувати в вагоні необхідні умови температури та вологості.

Кондиціонер, вбудований в пасажирський вагон, повинний на протязі всього року забезпечувати необхідні параметри повітря, сприяти гарному самопочуттю пасажирів. Літом кондиціонер забезпечує охолодження вагона згідно заданим температурам. Взимку температура в ресторанах та в підсобних приміщеннях регулюється водяним опаленням в залежності від температури припливного повітря.

Таблиця 1.1 – Техніко-експлуатаційні показники установки кондиціонування повітря МАБ-ІІ [1]

Найменування характеристики	Величина
1. Струм і номінальна напруга електрозабезпечення, В	Постійний, 110
2. Потужність генератора, кВт	28
3. Кількість повітря яке подається в вагон, м^3/год	4000, 5000
4. Тип і марка компресора	"V"
5. Холодопродуктивність, кВт	31,4
6. Холодопродуктивність при t з =+40°С і фз =30%, ккал/год	27000
7. Площа поверхні повітроохолоджувача, м^2	100
8. Площа поверхні конденсатора, м^2	185

На залізницях України в пасажирських вагонах застосовується неповне кондиціонування повітря (неповне, тому що немає системи зволоження повітря).

Основна частина купейних вагонів та вагонів-ресторанів обладнана установками кондиціювання повітря типу МАВ-ІІ. Серійному випуску цих

вагонів передував випуск дослідних партій із менш потужними кондиціонерами МАВ-0 та МАВ-І.

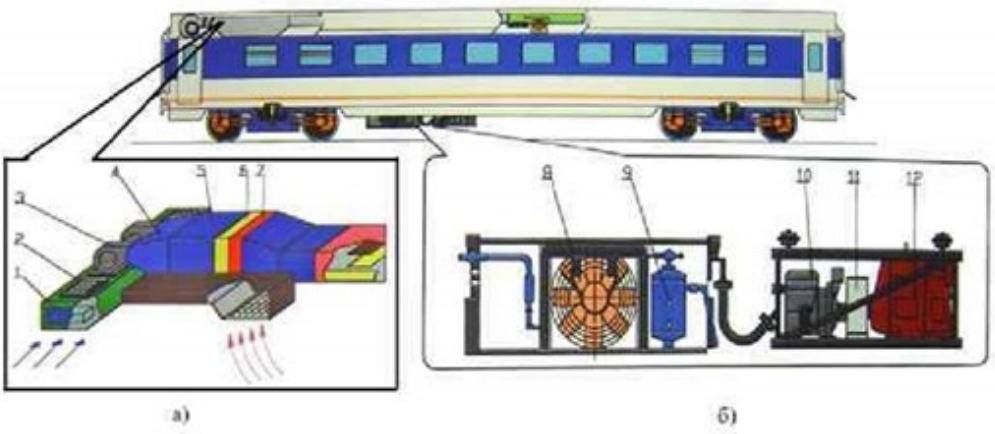


Рис.1.1. Схема розташування агрегатів установки кондиціювання повітря типу МАБ -ІІ 1 - Повітрозабірник; 2 – фільтр; 3 – вентилятор; 4 – дифузор; 5 – повітроохолоджувач; 6 – повітропідігрівачі; 7 – конфузор; 8 – вентилятор; 9 – ресивер; 10 – компресор; 11 - еластична муфта; 12 – двигун компресора.

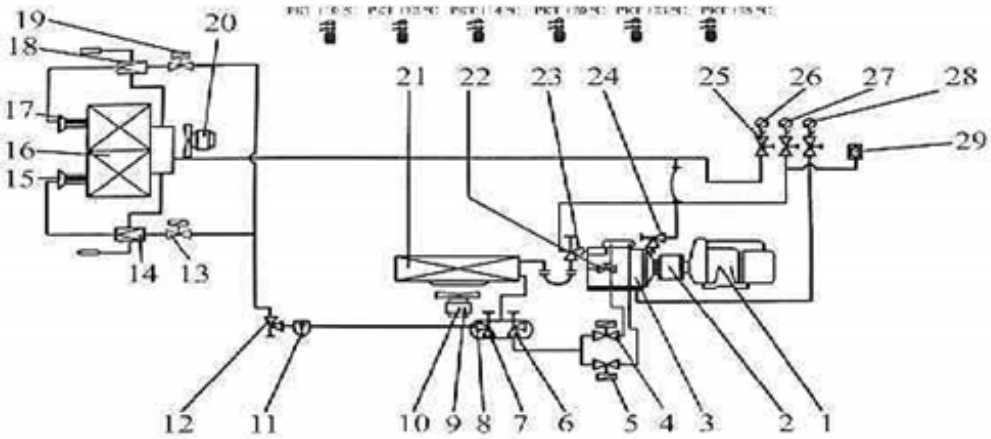


Рис.1.2 Принципова схема роботи холодильної установки типу МАБ-ІІ 1 - електродвигун; 2 – гнучка кулачкова муфта; 3 – компресор; 4, 5, 13, 19 – електромагнітний клапан; 9, 10 – електродвигун із вентилятором конденсатора; 11 – фільтр осушувач; електромагнітні клапани; 14, 18 – терморегулюючий вентиль; 15, 17 – розподільники рідини; 16 - випарник; 6, 7, 12, 23, 24 - запірний вентиль; 21 – конденсатор; 8 – ресивер; 12, 23, 24, 25 - кутовий вентиль; 20

електродвигун з вентилятором випарника; 29 – датчик максимального тиску; 25, 26, 27 – манометри для реєстрації тиску нагнітання, всмоктування та тиску олії в картері компресора відповідно.

Крім того, у пасажирському вагонному парку є вагони з СКП, що оснащенні холодильним обладнанням, яке розраховане на використання холодоагентів (ХА) фреон-12 (R12), фреон-22 (R22). Відповідно до рішень Монреальського протоколу та інших міжнародних домовленостей, що до речовин, які руйнують озоновий шар холодоагенти R12, R22 визнані озоноруйнуючими речовинами, їх виробництво і застосування в теперішній час заборонено.

У розробку альтернативних ХА низкою держав вкладені значні фінансові кошти, і вони, за деякими оцінками фахівців, за останні кілька років становили 2,4 млрд $. Тільки витрати на вивчення токсичності R134a, за даними Міжнародного інституту холоду, становили близько 4,5 млн $ за тривалості досліджень 7 років [2].

Вимоги до ХА поділяються на такі групи:

Екологічні – озонобезпека, низький потенціал глобального потепління, негорючість та нетоксичність.

Термодинамічні – велика об'ємна холодопродуктивність; низька температура кипіння при атмосферному тиску; невисокий тиск конденсації; висока теплопровідність; малі щільність і в'язкість холодоагенту, що забезпечують скорочення гідравлічних втрат на тертя та місцеві опори при його циркуляції у холодильному контурі; максимальна наближеність до замінних ХА (для альтернативних озонобезпечних ХА) за тисками, температурами, питомою об'ємною холодопродуктивністю та холодильним коефіцієнтом;

Експлуатаційні - термохімічна стабільність, хімічна сумісність з матеріалами та холодильними оліями, достатня взаємна розчинність з олією для забезпечення його циркуляції; негорючість і невибухонебезпечність і т. ін.;

Економічні – можливість товарного виробництва, доступні (низькі) ціни.

ХА, що задовольняють переліченим вимогам, знайти практично неможливо, тому в кожному окремому випадку вибирають ХА з урахуванням конкретних умов роботи холодильної машини.

Холодоагенти R401A, R401B - Перехідні (сервісні) суміші середнього тиску R401 A, торгова марка SUVA MP39, і R401B - SUVA MP66 (Du Pont) - призначені для заміни холодоагенту R12 в діючому обладнанні. Являють собою трикомпонентні суміші холодоагентів R22, R152A і R124.

Склад кожної суміші підібраний таким чином, щоб були поліпшені початкові експлуатаційні характеристики холодильної установки. R401A ефективний в системах, що працюють при температурі кипіння -20 ° С і вище. Застосовується в прилавках-вітринах продуктових магазинів, побутових холодильниках в ряді випадків призводить до збільшення холодопродуктивності до 10 %. На відміну від інших холодоагентів, що використовують поліефірні оливи, для їх роботи потрібні алкілбензольні оливи. Основна особливість сервісних озонобезпечних сумішей пов'язана з їх неізотермічністю. R401B застосовується для холодильних систем, що працюють при температурі кипіння нижче -23°С (до -30°С). Охолодження установок при роботі на цій суміші залишається порівнянної з холодопродуктивністю установок, що працюють на R12, а в деяких випадках збільшується до 15%. Дана суміш застосовується для роботи транспортного холодильного обладнання, а також побутових і торгових морозильних камер. R401B також працює на алкілбензольній оливі і відноситься до озонотропних сумішей.

Холодоагент R409A (FORANE FX56) - трикомпонентний сервісний холодоагент, призначений для заміни R12 в перехідний період. Теплофізичні і експлуатаційні характеристики у R409A і R12 в робочій області температур еквівалентні. Практично негорючий. Для роботи потрібно мінеральна або алкілбензольна олива. З R409 більш ефективний теплообмін в апаратах, що призводить до зниження експлуатаційних витрат в холодильній системі.

Для R409A характерна велика гігроскопічність порівняно з R12. Тому при заміні слід враховувати здатність R409A активно поглинати вологу з повітря.

При заміні рекомендується заправляти R409 в малих холодильних машинах на 20% менше, ніж R12, тому що надмірна кількість холодоагенту в системі призводить до підвищення тиску нагнітання. У великих холодильних системах доцільно зменшувати дозу заправки холодоагенту R409A в порівнянні з R12 на 10%, тому що теплопритоки по відношенню до холодопродуктивності незначні і не можуть, з огляду на інертність системи, помітно вплинути на її роботу.

Всі розглянуті сервісні суміші розраховані на використання в перехідний період протягом 20 - 30 років.

Холодоагент R134a (SUVA 134a). Хімічна формула CF3CFH2 (тетрафторетан). Молекула R134a має менші розміри, ніж молекула R12, що підвищує небезпеку витоків. Холодоагент R134a нетоксичний і не запалюється у всьому діапазоні температур експлуатації. Однак при попаданні повітря в систему і подальшому стисненні можуть утворюватися горючі суміші. Не слід змішувати R134a з R12, тому що утворюється азеотропна суміш високого тиску з однаковими масовими частками компонентів 50% і 50%. Тиск насиченої пари цього холодоагенту трохи вище, ніж у R12 (відповідно 1,16 і 1,08 МПа при 45°С). Пар R134a розкладається під впливом полум'я з утворенням отруйних і дратівливих сполук, таких як фторводород.

У среднетемпературном обладнанні (температура кипіння -7°С і вище) R134a має експлуатаційні характеристики, близькі до R12.

У холодильних установках, що працюють при температурах кипіння нижче -15 ° С, холодильний коефіцієнт R134a гірше, ніж у R12 (на 6 % менше питома об'ємна холодопродуктивність при -18 ° С). Через значного потенціалу глобального потепління GWP, рекомендується застосовувати R134a в герметичних холодильних системах. R134a широко використовується у всьому світі в якості основної заміни R12 для холодильного обладнання, що працює в среднетемпературном діапазоні. Його застосовують в автомобільних кондиціонерах, побутових холодильниках, торговому холодильному среднетемпературном обладнанні, промислових установках, системах

кондиціонування повітря в будівлях і промислових приміщеннях, а також на холодильному транспорті.

Особливістю альтернативних озонобезпечних холодоагентів, зокрема R134a, є їх погана взаємна розчинність з існуючими мінеральними, алкілбензольні і вуглеводневими оливами. Для холодильних машин на цих холодоагентах розроблені нові синтетичні поліолефірні оливи різної в'язкості, що відрізняються хімічної сумісністю з холодоагентами.

Аналізуючи найвідоміші, розроблені в нашій країні і за кордоном холодоагенти — замінники R12, можна переконатися, що кожен з них має вразливі місця з точки зору виконання перелічених вище вимог.

Огляд літературних джерел показав, що рівноцінної заміни R12 у холодильній техніці для умов нашої країни поки що не знайдено, особливо для ретрофіту холодильного обладнання, що діє. Використання численних альтернативних холодоагентів, таких як R134a, R401A, R401B, R401C, R409A та ін. [3], пропонованих закордонними компаніями, стикається з певними труднощами. Пропоновані холодоагенти запатентовані компаніями-виробниками та мають високу вартість. Найчастіше до складу холодоагентів-сумішей входять рідкісні і, отже, дорогі компоненти, що суттєво збільшує витрати на сервісне обслуговування холодильних систем. Застосування більшості нових холодоагентів потребує зміни умов роботи системи (заміни олії, заміни деяких агрегатів та апаратів холодильної машини).

Тому, необхідне очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів та холодильного обладнання СКП від залишків мінеральних олив та забруднень при заміні (ретрофіті) R12, R22 на озонобезпечні альтернативні холодоагенти.

1.2 Аналіз причин забруднення внутрішніх поверхонь трубопроводів кондиціонера пасажирського вагона.

Під час експлуатації пасажирських вагонів у роботі системи кондиціонування повітря холодильної машини можуть виникати несправності,

що спричиняють часткове або повне порушення всієї роботи холодильної машини. Це може стати актуальною проблемою у забезпеченні комфортності перебування пасажирів у пасажирських вагонах залізничного транспорту.

Кожна холодильна установка системи кондиціонування повітря є герметичною заповненою хладоном-12 системою, тому технічне обслуговування її, що виконується на ПТО, полягає в оцінці стану апаратів за рядом зовнішніх ознак без їх розкриття і розбирання. При цьому не потрібне застосування будь-яких складних приладів і пристроїв. Огляд починається в неробочому стані. Звертають увагу на наявність вм'ятин на апаратах і з'єднуючих їх трубопроводів. Зім'яті трубопроводи мають звужений прохідний переріз, який може чинити опір потоку холодильного агента і порушувати режим роботи установки. Крім того, вм'ятини на трубопроводах сприяють розвитку тріщин у трубах внаслідок вібрації при русі вагона або роботі установки. Дефекти крильчаток вентиляторів конденсатора порушують їх динамічне балансування, що може призвести до аварії зі зруйнуванням конденсатора. Особливо контролюють різьбові кріплення компресорного та конденсаторного агрегатів до кузова вагона та кріплення, наприклад, компресора або конденсатора до своїх рам.

Найбільш відповідальною операцією при огляді холодильного обладнання є виявлення місць витоку холодоагенту. Існує два способи виявлення місць нещільності, через які можливе просмоктування хладону, що має дуже високу текучість. Перший з них заснований на тому, що по трубопроводу холодильної установки хладон-12 циркулює в розчині з холодильним мастилом, залитим у картер компресора.

Утворена емульсія має таку саму текучість, що і хладон-12, тому через мікроскопічні нещільності металу просмоктується розчин хладону в мастилі і на зовнішній поверхні вузла навколо місця розташування нещільності обов'язково утворюється розпливчаста пляма, за якою можна виявити місце витоку. Тому забороняється обтирати компресор та інші апарати маслянистими ганчірками. Другий спосіб заснований на використанні мильної води. Його застосовують для уточнення місця витоку, виявленого першим способом.

Холодильна установка висуває специфічні вимоги до змащення. Наприклад, при низькій температурі мастило не повинно виділяти тугоплавкий парафін і залишатися достатньо текучим, а при високій – не повинне коксуватися й утворювати смоли, що забруднюють маслопровідні канали і труби. Циркулюючи у розчині з холодоагентом при різному тиску і температурі, олива повинна мати незмінну характеристику протягом усього часу роботи установки. Цим потребам найповніше відповідають мінеральні оливи, що отримані шляхом переробки нафти. У компресорах установок кондиціювання повітря пасажирських вагонів, охолоджувачів питної води, шаф-холодильників і вагонів-ресторанів застосовується тільки олива марки ХФ 12-18 (Х – холодильне, Ф – хладонове, 12 – для хладону-12, 18 – в'язкість при температурі 50°С). При експлуатації холодильних установок забороняється довільно замінювати один сорт оливи на інший, хоч і близький за якістю, а також не можна змішувати оливи різних сортів.

У холодильних установках недопустима наявність вологи навіть у дуже малих кількостях. Волога сприяє утворенню активних кислот, які викликають хімічний розпад мастила та корозію металу. Тому утримання вологи не тільки в холодоагенті, але і в мастилі допускається не більше 20 частин на 1 млн частин мастила.

У зв'язку з тим, що діелектрична міцність залежить ще від електропровідності забруднень, а також від розмірів і розподілу в ньому мікроскопічних частинок води, цей спосіб менш точно характеризує ступінь зволоження, ніж лабораторний аналіз. Не допускається використання не тільки зволоженого мастила, але і забрудненого. Забруднюється мастило внаслідок потрапляння дрібних частинок металу внаслідок тертя деталей. Крім того, на якість оливи згубно впливає взаємодія хладону з водою. Вступаючи в реакцію з водою, хладон утворює агресивну соляну кислоту, що руйнує не тільки метал, але і мастило. При цьому утворюється осад, погіршуються властивості мастила і скорочується строк служби деталей компресора.

Також потрібно звернути увагу на взаємодію сумішевих холодоагентів з компресорною оливи марки ХФ12-16. Сумісність альтернативних холодоагентів з оливою ХФ12-16 потребує особливої уваги.

При обмеженій розчинності оливи в холодоагенті, після досягнення певної концентрації в розчині холодоагент-олива, воно перестає розчинятися і починає спливати, або тонути в шарі холодоагенту. Шар оливи, насичений холодоагентом, може накопичуватися в нижній частині ресивера. Частина оливи осідатиме на теплопередаючій поверхні теплообмінників, не повертаючись при цьому в картер компресора. Все це незабаром може призвести: по-перше, до різкого зниження холодопродуктивності установки і, по-друге, до швидкого зношування кривошипно-шатунового механізму компресора та циліндро-поршневої групи [4].

1.3 Аналіз способів очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів систем кондиціювання повітря пасажирських вагонів від залишків мінеральної оливи

Механічні забруднення в системі холодильної установки можуть бути результатом неякісної очищення внутрішньої поверхні апаратів і трубопроводів. Крім того, забруднення в системі можуть утворитися в результаті корозії. Деякі робочі речовини, зокрема всі фреони в суміші з оливою, мають властивість змивати різні забруднення з поверхні труб і апаратів. Найбільшу небезпеку механічні забруднення створюють в компресорі і регулюючих пристроях.

При очищенні поверхонь та при їх підготовці під захисні покриття (знежирення) використовують лужні сполуки, кислоти та поверхнево-активні речовини (ПАР) зазвичай у складі водних розчинів, а також органічні розчинники.

З лужних сполук застосовують каустичну соду (їдкий натр, каустик), кальциновану соду (вуглекислий натрій, карбонат натрію), силікат натрію (рідке скло) та метасилікат натрію, фосфати (тринатрійфосфат та триполіфосфат

натрію), а також господарське мило. Найбільш поширеними миючими розчинами, які використовуються при очищенні систем кондиціонування, є водні розчини каустичної та кальцинованої соди.

Жири (рослинні та тварини) під впливом лугів омиляються і перетворюються на розчинні у воді мило та гліцерин. Мінеральні оливи в лужних розчинах не розчиняються. Дрібні частинки їх, відриваючись від поверхні, опиняються в розчині у зваженому стані і утворюють стабільні водні емульсії, які легко змиваються водою. Інгібуючу дію надають силікати, фосфати. Більш активну роль грають хромати двохромовокислий калій (хромпік), нітрити (нітрит натрію), різні органічні присадки (уротропін, дифеніламін, бензот натрію, полімери бутиламіну, їх суміші). При очищенні алюмінієвих сплавів використовують буру - натрієву сіль борної кислоти.

Вплив лужних та кислотних миючих розчинів, а також розчинів з використанням синтетичних миючих засобів (СМЗ) значно підвищується при їх нагріванні. Температура розчинів повинна бути в межах 70-95°С. При температурі вище 95°С збільшується пароутворення, а нижче 70°С СМЗ стають менш ефективними - різко знижується миюча здатність і збільшується піноутворення.

Сьогодні, в системі технічного обслуговування систем кондиціонування пасажирських вагонів перед промиванням внутрішніх порожнин теплообмінних апаратів проводиться продування їх стисненим повітрям до тих пір, поки повітря на виході не буде чистим. Далі апарати піддаються промиванню на спеціальному стенді шляхом неодноразового похитування фреону або миючого розчину наступного складу: кальцинована сода-10%; тринатрій фосфат -2,75%; рідке скло - 0,75%, вода - інше.

Температура миючого розчину повинна бути не менше 60 - 70°С. Після промивання необхідно через внутрішні порожнини апаратів прокачати 8-10% розчин соляної кислоти або розчин ортофосфорної кислоти, потім внутрішні порожнини промивають гарячою водою з додаванням 1% хромпіку та 3-5% нітрату натрію і продувають стисненим повітрям. Підготовлені таким чином

теплообмінні апарати направляють на ділянку перевірки та ремонту. Недоліком існуючої технології є неповне очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів системи кондиціонування від залишків мінеральної оливи та, як наслідок, недостатньо висока ефективність технічного обслуговування систем кондиціонування пасажирських вагонів, неможливість переведення систем кондиціонування на інші сучасні холодоагенти, що потребують використання синтетичних олив.

Зовнішнє обмивання демонтованих компресорів проводиться таким же миючим розчином, який використовується для зовнішнього обмивання агрегатів.

Розбирання обмитих компресорів провадиться на спеціальних стендах. Після розбирання деталі та вузли компресора завантажують у кошики та в машині (ванні) при температурі не менше 60-70°С обмивають розчином наступного складу: кальцинована сода -10%; тринатрій фосфат - 2,75%; хромпік - 0,5%; рідке скло - 0,75%; вода - інше.

Потім деталі промивають гарячою водою з додаванням 1% хромпіку з подальшим стисненим обдуванням повітрям до повного видалення вологи. Демонтовані електродвигуни компресорів направляють для перевірки та ремонту до електроцеху. Інші вузли та деталі компресорів після обмивки надходять на ділянку дефектування та комплектування.

Залежно від взаємної розчинності оливи і холодоагенту визначається вплив оливи на роботу холодильної установки. В установках, що працюють на хладоне R12, у випарнику затопленого типу олива накопичується, і збільшується концентрація його в розчині. В результаті підвищується температура кипіння і збільшується в'язкість розчину (в порівнянні з температурою кипіння і в'язкістю чистого фреону), що погіршує теплообмін.

Останнім часом з'явилася інформація про використання в Європі та США гранул діоксиду вуглецю, так званого кріогенного бластингу для очищення [5]. У рекламних проспектах наголошується, що технології «кріогенного бластингу» є найкращою альтернативою піскоструминним, дробоструминним, водяним та хімічним методам очищення. У той же час ця інформація носить рекламний

характер, в ній відсутні відомості про особливості зміни тепло-масових характеристик дисперсного потоку (повітря-гранули діоксиду вуглецю) при його русі магістралями системи очищення. Відсутні також рекомендації щодо порядку вибору оптимальних розмірів гранул та їх концентрації задля забезпечення ефективної очистки внутрішніх поверхонь СКП пасажирських вагонів.

Аналізуючи методи очищення поверхонь від різних видів забруднень (дробеструменевий, піскоструминний та ін.), що широко використовуються у вітчизняній та зарубіжній практиці, було висловлено припущення про їх ідентичність методу очищення із застосуванням гранул діоксиду вуглецю. Це підтверджується тим, що у всіх цих методах для переміщення твердих частинок (дріб, пісок, гранули діоксиду вуглецю) по магістралях системи очищення використовується енергія стисненого повітря.

Комплексна ефективність технології очищення сухим льодом забезпечується в основному такими трьома ефектами [6]:

- очищення механічним впливом - гранули сухого льоду бомбардують поверхню об'єкта, що підлягає очищенню, з високою швидкістю;

- очищення за рахунок теплової енергії - різке охолодження поверхні призводить до утворення у шарі забруднення дрібних тріщин через великий перепад температур;

- очищення за рахунок сублімації - через тріщини, що формуються, гранули сухого льоду проникають всередину шару бруду і сублімуються в ньому з більш ніж 400-кратним розширенням обсягу. Завдяки такому ефекту вибуху бруд відривається від поверхні об'єкта.

1.4 Сфера застосування електромагнітної (електропровідної) рідини

Термін «магнітні рідини» був запропонований Пейпеллом, який розробив і запатентував [7] принципово нове середовище, яке назвав магнітною рідиною. Відомий своїми властивостями магнетит протягом тривалого часу піддавали

подрібненню до частинок субмікроскопічних розмірів, до них додавали поверхнево-активну речовину (ПАР), потім диспергували в рідкій основі і отримували в результаті дисперсні системи з високою стійкістю, тобто магнітну рідину.

Магнітні рідини мають незвичайне поєднання властивостей магнетиків, рідин та колоїдних розчинів, що дає підставу вважати їх перспективним матеріалом. Вони практично не старіють, не розкладаються, залишаються рідкими в магнітному полі та повністю відновлюють свої показники після зняття поля[24].

Дещо раніше Сімоіідзака і співробітники [8] з університету Тохоку (Японія) повідомили на конференції про створення рідини, яка притягується магнітом, але сам принцип приготування колоїдних розчинів, що містять ультрамікроскопічні магнітні частинки, був відомий хімікам ще на початку 1930-х років [9]. Приблизно тоді ж Кемош і Тіссен [10] використовували колоїдні розчини з такими частками для виявлення однойменних структур в феромагнетиках. Були також опубліковані результати досліджень Елмора [11], Вільямса [12], Кайя [13], Тікадзумі [14], пов'язаних з вивченням однодоменних структур за допомогою магнітних колоїдних розчинів.

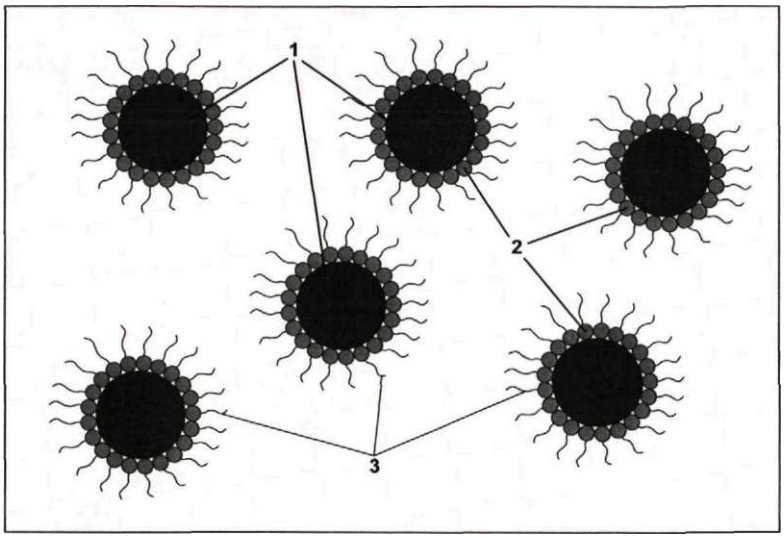
Щоб магнітна рідина досить сильно притягалася магнітом (з таким розрахунком виробляються сучасні колоїдні розчини), число магнітних частинок в ній повинно бути значним.

Роботи групи Розенцвейга [15, 16] відносяться до стійкості дисперсних систем і до динаміки рідких тіл, а також зачіпають багато інших аспектів цього напрямку і являють собою досить істотний внесок в розробку проблематики магнітних рідин. Вони також [17] здійснили ряд розробок в області магніторідинних герметизаторів, які сьогодні знаходять все більш широке застосування.

Магнітні рідини (МР) знайшли застосування в промисловому виробництві. Вони мають незвичайні фізичні властивості і від відомих дисперсних систем відрізняються винятково високою стабільністю. Найбільша кількість робіт про

виготовлення і застосування МР опублікували японські дослідники [19, 20, 21, 22-26]. У 1987 р Накатані та ін. повідомили про отримання магнітних рідин з колоїдними частинками з кобальту і нікелю. Виробництво останніх здійснювалося спеціально розробленим способом [27].

Вибір дисперсійного середовища, на основі якого готують магнітну рідину, визначається її призначенням та методом використання. Залежно від розв'язуваної задачі можуть знадобитися магнітні рідини на водній або водорозчинній основі, на основі вуглеводнів, кремнійорганічних або фторорганічних сполук. Отримання стійкого колоїду в кожному випадку має особливості, пов'язані з вибором стабілізатора, оптимізацією співвідношення "ферофаза: стабілізатор: основа", переведенням дисперсної ферофази з одного типу середовища до іншого. Особливості технологічних процесів виробництва таких магнітних систем розглянуто у літературі [28, 29].



1 - магнітна колоїдна частка; 2 – полярна група молекули ПАР;

3 - ланцюжкова частина молекули ПАР

Рис 1.3 - Модель структури магнітної рідини

Використання магнітних рідин у системах мастила [30] і в герметизаторах [31, 32] вимагає їх працездатності при підвищених температурах, але олеїнова кислота, котра найчастіше застосовується як стабілізатор, при цьому окислюється, що може призвести до коагуляції колоїдної системи. Було

розроблено магнітні рідини з антиокислювальними присадками, які знайшли широке застосування у промисловості [33].

Магнітні рідини на основі вуглеводнів знайшли застосування як герметизатори для валів, що обертаються, як демпфуючий пристрій в радіотехніці, як хороші мастильно-охолоджувальні матеріали і теплоносії, а також в апаратах для очищення води від нафтопродуктів [34-43].

На підставі багаточисельного експериментального матеріалу можна стверджувати, що стійкі високомагнітні колоїди вдається отримати, використовуючи як стабілізатори натрію лаурилсульфат або олеат натрію в поєднанні з додециламіном і ундециламінохлоридом. Намагніченість таких зразків становила 10-15 кА/м при об'ємній частці магнітної фази 2-3%. Застосування методу заміни несучого середовища із запровадженням додаткових водорозчинних коротколанцюгових стабілізаторів [44] дозволило довести намагніченість зразків МР до 25-30 кА/м при об'ємній частці магнітної фази близько 3-5%.

Застосування водних МР велике: це сепарація немагнітних матеріалів, використання фарб на основі МР в принтерах друку, контроль якості поверхні магнітних дисків, обробка поверхні виробів шліфуванням і поліруванням [45, 46].

Магнітні рідини застосовують у промисловій екології. Води, забруднені нафтопродуктами (НП), становлять особливу небезпеку для водойм, по-перше, це найпоширеніший багатьох підприємств стік і, по-друге, з малої гранично допустимої концентрації (ГДК) для нафтопродуктів у водоймах.

Для очищення води від нафтопродуктів використовуються майже всі відомі методи очищення в залежності від стану забрудненої води. Щільність НП може бути більше щільності води, тоді вони осідають на дно. Крім того, на дно можуть осідати і легкі НП, якщо вони покривають важкі мінерали, які часто є складовими суспензій промислових і зливових стоків. Емульговані НП і краплі легких олив з дрібними мінеральними включеннями розподіляються в товщі води, де знаходяться також колоїдні і розчинені оливи.

Зазвичай найбільшу частку НП складають їх легкі фракції, які спливають на поверхню води і там можуть бути від неї відділені [47-49].

Широко застосовується флотація з використанням ПАР і аерація повітрям. При цьому утворюється пінний продукт, що спливає на поверхню води. Ці методи часто поєднують з коагуляцією, електрокоагуляцією, руйнуванням стабільності емульсій електролітами, екстракцією в інших розчинниках і т. ін.

Результатом всіх цих методів є сплив на поверхню води продукту, який необхідно прибрати. Більш тонке очищення пов'язане з фільтрацією води через зернисті фільтри, різні фільтруючі завантаження і сорбенти, мембранні фільтри, а також застосування більш складних фізико-хімічних методів.

Основними факторами, що визначають вибір способу видалення НП з поверхні води, є товщина шару, що видаляється, час перебування шару у відстійнику, температура і pH води, розтікання НП і відстань їх пересування, концентрація мінеральних солей і ряд інших.

У всьому світі ведуться роботи зі створення нових методів очищення вод від НП і, зокрема, збору їх з поверхні води, що особливо важливо при їх розливах в разі аварій з нафтоналивними судами і нафтопроводами.

Відомий спосіб очищення води від нафтопродуктів за допомогою магнітних рідин - магніторідинний спосіб очищення (МРСО). Він полягає в попередньому омагнічуванні нафтопродуктів шляхом введення в них магнітної рідини і в подальшому зборі "магнітних" НП за допомогою спеціального магнітозбірника. При поверхневому очищенні омагнічування проводять подачею МР безпосередньо на забруднення. Для успішного омагнічування рідина-носій повинна бути добре розчиненою в НП і не розчинятися у воді. Для цієї мети придатна МР на гасі, яка має відпрацьовану технологію приготування і найменшу вартість у порівнянні з іншими МР. Вона є колоїдним розчином частинок магнетиту з середнім діаметром 10 нм в гасі. Як поверхнево-активна речовина вона містить олеїнову кислоту або олеат натрію.

Ідея збору НП з поверхні води шляхом їх омагнічування з подальшим використанням магнітних пристроїв не є новою [50-54]. При цьому для

омагнічування нафтової плівки застосовуються порошки феромагнітних матеріалів. Використання МР як засіб омагнічування в порівнянні з порошками дає переваги. Істотно спрощується процес омагнічування. МР з підвищеною концентрацією магнітних частинок розбризкується звичайним насосом-дозатором, відпадає необхідність попереднього розмагнічування частинок магнітного порошку і приготування з них суспензії. Частинки в суспензіях внаслідок взаємодії одна з одною можуть утворювати великі агломерати, що випадають в осад. МР самі по собі є стійкими колоїдними розчинами. МР швидко і рівномірно розподіляються в нафтовому шарі. При цьому виключається втрата феромагнітного матеріалу при його нанесенні на поверхневу плівку через можливе випадання якоїсь його частини в осад на дно водойми, а також захоплення порошками води разом з НП, що видаляються. Крім того, внесення в забруднення значної кількості твердих частинок підвищує його в'язкість. Додавання ж невеликої кількості МР сильно розріджує важкі НП (мазут, оливу і т. ін.), що полегшує їх видалення[24].

З чого можна висунути гіпотезу, що ця система може підійти до вирішення нашої проблеми.

1.5 Вплив магнітного поля на параметри течії електропровідної рідини та характеристики очищення

Магнітна гідродинаміка розвивалася паралельно зі становленням теорії магнетизму та електрики. Основоположні дослідження в магнітній гідродинаміці виконали такі вчені: Л.Д. Ландау, Я.І. Френкель, А. Б. Вантажін, Г.А. Любимов, А.Г. Куликовський, Дж. Гартман, Т. Каулінг, Дж. Шекліф, Дж. Хант.

При поміщенні магнітної рідини у змінне магнітне поле кінетика намагніченості істотно залежить від релаксаційних процесів, які відбуваються лише на рівні індивідуальних частинок. Опис тимчасових залежностей намагніченості для магнітних колоїдів ускладнюється необхідністю визначення додаткових параметрів.

Загальний підхід для побудови моделей тимчасових залежностей намагніченості та інших параметрів магнітної рідини у зовнішніх змінних полях описані Шліомісом [55]. На сьогодні відома значна кількість моделей, які докладно описані у [56,57,58].

Робота Шліоміса [55] виявилася історично першою і до теперішнього часу є однією з найбільш цитованих публікацій у галузі фізики магнітних колоїдів. У ній рівняння релаксації намагніченості наведено у вигляді:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{M} - \frac{1}{\tau^*}\left(\vec{M} - M_0 \frac{\vec{H}}{H}\right) \tag{1.1}$$

де ω – усереднена кутова швидкість, $M_0 = nV_m M_s L(\xi)$, V_m–об'єм магнітного ядра частинки, n – числова концентрація, M_s – намагніченість насичення матеріалу частинок.

Аналогічні за змістом вирази були отримані також термодинамічними методами Суязовим [62]. Релаксаційні процеси автором розглядалися лише для магнітожорстких – броунівських частинок.

Отримане ним рівняння дещо відрізняється на вигляд від (1.1):

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{M} - \frac{1}{\tau}\left(\vec{M} - \chi\vec{H}\right) + \chi\frac{\tau_1}{\tau}\left(\frac{d\vec{H}}{dt} - \vec{\omega} \times \vec{H}\right) \tag{1.2}$$

Зазначимо, що автор не розглядає фізичний механізм цього явища, а також не вказує на значення коефіцієнта τ_1 .

Надалі розпочалася активна робота з побудови моделей кінетики намагнічування. Баштовий та Кашевський отримали рівняння намагніченості колоїду ґрунтуючись на індивідуальних магнітних властивостях наночастинок, які мають магнітний момент [59]. Одним із найважливіших питань застосування описаних кінетичних моделей є визначення характерних часів, що описують релаксаційні процеси намагніченості. Їхній аналіз представлений у роботі [60].

У ній автори приходять до висновку, що релаксаційні процеси у колоїді пов'язані з дисипаційними процесами внутрішніх обертань та згасанням прецесії магнітного моменту. Величина дисипації, що пов'язана з останнім фактором, зневажливо мала. Наприклад, у [61] зазначено, що його величина на 4 порядки менша, порівняно з першим процесом.

Проведемо короткий аналіз кількох наближень, що описують релаксаційні процеси намагнічування Активний тепловий рух дозволяє описати кінетику омагнічування з застосуванням наступної моделі [61]:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{M} - \frac{\vec{M} - \chi(\vec{H} + \vec{H}_a)}{\tau_M} + \vec{M} div\vec{v},$$
$$\frac{d\overrightarrow{H_a}}{dt} = \vec{\omega} \times \overrightarrow{H_a} - \frac{\overrightarrow{H_a} - \alpha\vec{M}}{\tau_a} - \overrightarrow{H_a} d\, iv\vec{v},$$
$$\frac{d\vec{K}}{dt} = \vec{M} \times \vec{H} - \frac{\vec{K} - \vec{I}\Omega}{\tau} + \beta\nabla^2\vec{K} - \vec{K} div\vec{v}, \qquad (1.3)$$

де $\vec{K}$ - внутрішній момент кількості руху наночастинки.

Безпосереднє визначення дисперсійної магнітної кривої сприйнятливості є досить цікавим експериментальним завданням.

Одним із перших її рішення запропоновано Майоровим [62]. У роботі автор описує метод визначення величини комплексної динамічної магнітної сприйнятливості шляхом аналізу зміни імпедансу порожньою та заповненою магнітним колоїдом котушки. У дещо зміненому вигляді отримані ним результати можуть бути представлені у формі:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{M} - \frac{1}{\tau}\left(\vec{M} - \chi\vec{H}\right) + \chi\frac{\tau_1}{\tau}\left(\frac{d\vec{\vec{H}}}{dt} - \vec{\omega} \times \vec{H}\right) \qquad (1.4)$$

Майоровим вказано на монотонне спадання дійсної частини магнітної сприйнятливості зі збільшенням частоти вимірювального поля, а також виникнення максимуму уявної частини комплексної магнітної сприйнятливості. Цей максимум автор пов'язує із величиною броунівського часу релаксації

наночастинок, оскільки його положення визначається в'язкістю дисперсійного середовища. Істотним недоліком методу є необхідність урахування полів, що розмагнічують. Обійти проблеми розмагнічування вдалося Фаніну та ін. [63]. Магнітна сприйнятливість також визначалася за імпадансом котушки, проте має тороїдальний сердечник, виконаний з μ-металу, що має магнітну проникність понад 20 000 од. СІ.

Автори Агабекян Е.М. та Іванов А.Г. розв'язання задачі про визначення часів релаксації провели досить формально та конкретний механізм релаксації не виявили [64]. Натомість, автори Блум М.А., і Майоров М.М. у своїх роботах розглядають релаксацію з погляду броунівського обертання, говорячи про броунівський механізм релаксації, а в роботі [63] вказується на переважання неєлевського механізму.

У роботі [65] проведено моделювання руху магнітної наночастинки у наближенні твердої сфери із жорстко закріпленим дипольним моментом. У результаті було встановлено, що отримані дані порівняні з наведеними у [61].

Блум, Майоров, Нікоару, Цеберс представили роботу, що містить експериментально отримані дані про дисперсію динамічної магнітної сприйнятливості та їх аналіз проведений шляхом апроксимації отриманих даних залежностями Коул-Коула із застосуванням спеціальних функцій розподілу за часом релаксації [66]. У роботі визначено спектр часів релаксації, та визначено конкретний механізм релаксації магнітного моменту наночастинок. У своїй роботі [63] Фаннін, Скайф і Чарльз описують схожий по суті на [67] метод аналізу даних частотних магнітних залежностей сприйнятливості з використанням моделі Дебая, модифікованої Фреліхом. У [66] наведено результати експериментального дослідження магнітного колоїду, що містить як броунівські, так і Неєлевські частинки. Дані про дисперсію магнітної сприйнятливості дозволили встановити, що в такому середовищі є два суттєво розділеного спектра часів релаксації.

У [67] Пшеничників свідчить про значне зростання дійсної частини динамічної магнітної сприйнятливості при зменшенні частоти вимірювального

магнітного поля нижче 10 Гц. В цих частотах сприйнятливість магнітного колоїду має величину порядку кількох десятків од. СІ. Очевидно, що така значна величина магнітної сприйнятливості вказує на великий час релаксації наночастинок, і, відповідно, їх великий розмір.

1.6 Висновки по розділу 1

Аналіз експлуатації систем кондиціонування пасажирських вагонів показує, що головним недоліком існуючої технології обслуговування системи кондиціонування є неповне очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів від залишків мінеральної оливи та, неможливість переведення систем кондиціонування на інші сучасні холодоагенти, що потребують використання синтетичних олив. Крім того, у пасажирському вагонному парку є вагони з СКП, що оснащенні холодильним обладнанням, яке розраховане на використання холодоагентів фреон-12 (R12), фреон-22 (R22). Відповідно до рішень Монреальського протоколу та інших міжнародних домовленостей, що до речовин, які руйнують озоновий шар холодоагенти R12, R22 визнані озоноруйнуючими речовинами, їх виробництво і застосування в теперішній час заборонено. Тому, необхідне очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів та холодильного обладнання СКП від залишків мінеральних олив та забруднень при заміні (ретрофіті) R12, R22 на озонобезпечні альтернативні холодоагенти. В установках, що працюють на хладоні R12, R22, у випарнику затопленого типу олива накопичується, і збільшується концентрація її в розчині. В результаті підвищується температура кипіння і збільшується в'язкість розчину (в порівнянні з температурою кипіння і в'язкістю чистого фреону), що погіршує теплообмін.

Проведений огляд теоретичних та експериментальних робіт, присвячених дослідженню процесів намагнічування магнітних рідин та пов'язаних з ним структурних змін, а також впливу цих процесів на магнітні властивості магнітних рідин, показав, що ці питання неодноразово розглядалися в роботах

магнітних дослідників колоїдних систем. Інтерес до цих проблем обумовлений новими фізичними ефектами, котрі виникають у внаслідок таких процесів, що мають, як фундаментальне наукове, так і прикладне значення.

Унікальні властивості магнітних рідин викликають величезний інтерес дослідників та споживачів. Магнітні рідини є перспективним матеріалом для застосування у різних галузях промисловості, техніки, біології та медицини.

Виконаний аналіз отриманих раніше результатів магнітнорідинного способу очищення поверхні води від нафтопродуктів на наш погляд дозволяє говорити про ефективність даного методу в порівнянні з іншими способами очищення, і дозволяє висунути гіпотезу, що магнітне поле може суттєво впливати на параметри течії електропровідної рідини та характеристики очищення в системах кондиціювання повітря пасажирських вагонів від залишків мінеральної оливи.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОЧИЩЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ СИСТЕМ КОНДИЦІЮВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ ВІД ЗАЛИШОК МІНЕРАЛЬНОЇ ОЛИВИ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ МАГНІТНОЇ РІДИНИ

2.1 Верифікація розрахунку течії електропровідної рідини в круглих трубах

Магнітогідродинаміка (МГД) розглядає явища, що виникають під час руху електропровідної рідини внаслідок взаємодії рідини з електромагнітним полем [68, 69]. Вивчення руху електропровідних розплавів металів під поперечно прикладеним магнітним полем стало основою багатьох наукових та інженерних застосувань, та багатьох пристроїв, а саме: МГД-насоси, МГД-генерація електроенергії тощо [70, 71]. З іншої сторони, потік пилоподібної електропровідної рідини через трубу в присутності поперечного магнітного поля має такі ж самі особливості, що й потік рідин у генераторах та плазмових прискорювачах [72].

В останні тридцять років дослідження будь-яких течій рідини щільно пов’язане з використанням чисельних методів розрахунку [73]. На сьогоднішній день існує досить багато програмних продуктів для CFD (Computational Fluid Dynamics) -розрахунків. Практично всі вони є валідованими для різних типів течій, але для інженерних розрахунків необхідно проводити верифікацію програмного продукту для розрахунків нових типів задач з метою пошуку оптимальних моделей турбулентності, якості сіткового розбиття та інших параметрів розрахунку [74].

Змішані гідродинамічні та електромагнітні проблеми хоча й входять у достатньо нову область механіки рідини та газу, але все більше привертають увагу багатьох дослідників. Перша робота щодо руху електропровідної рідини опублікована Гартманом в 1937 році [75], в ній, на основі аналітичних розрахунків та експериментальним шляхом, досліджувалось поводження ртуті. Протягом п’ятдесяти років дослідження руху електропровідних рідин

проводилося аналітичним шляхом із використанням великої кількості спрощень, що приводило до значних похибок у визначенні гідравлічних параметрів, а саме: втрати тиску, швидкість рідини [77]. На відміну від досліджень загальних рідин, експериментальні дослідження електропровідних дещо ускладнені внаслідок використання потужних електромагнітів для досліджень та створення однорідних чи неоднорідних магнітних полів [76, 78, 79]. Експериментальні дослідження потребують коштовної сучасної техніки на основі PIV-велосіметрії (оптичний метод візуалізації потоку по зображенню частинок) та значних витрат часу на аналіз результатів внаслідок впливу турбулентності [80].

Розвиток обчислювальної гідродинаміки дозволив значно підвищити точність розрахунків за математичними моделями [80], але все ще залишається складним вибір оптимальних моделей турбулентності, якості сітки, параметрів моделі для вирішення конкретного завдання. Так, в роботі [79] використано метод прямого чисельного моделювання (DNS), що дозволяє дуже точно описати параметри течії, але цей метод практично неможливо використовувати в інженерних розрахунках, внаслідок дуже великих витрат часу на розрахунок та на аналіз результатів.

В роботі [82] використано декілька моделей турбулентності, а саме: k-ε, (RNG) k-ε, k-ω та SST k-ω, зроблено висновок, що найкраще описує рух рідини (RNG) k-ε модель, але, як показує досвід розрахунків течії неньютонівських рідин [80], практично для кожного виду рідин необхідно підбирати свою модель турбулентності [81, 82].

Дослідження проводилося на основі порівняння експериментальних досліджень за PIV-методом велосіметрії, що наведено в роботі [77] з результатами чисельного розрахунку. Рідина вважалася в’язкою, нестисливою та електропровідною. Керуючі нелінійні рівняння імпульсу вирішувалися чисельно, використовуючи метод контрольних об’ємів у програмному середовищі Ansys CFX. Програмний комплекс використано на умовах студентської ліцензії з обмеженням на кількість елементів, що не перевищує 500000.

Для проведення верифікації результатів розрахунку необхідно мати надійні експериментальні результати [16], тому вирішено обрати результати велосіметрії електропровідної рідини, що наведені в роботі [10]. Експериментальні дослідження проведені для 30 % водного розчину гідроксиду калію (KOH). Основні фізичні властивості рідини наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Фізичні властивості 30 % водного розчину гідроксиду калію

		KOH
ρ	Густина, кг/м^3	1280
μ	Динамічна в'язкість, Па с	0,00143
ν	Кінематична в'язкість, м^2/с	$1{,}18\times10^{-6}$
σ	Електропровідність, См/м	73,67
λ	Теплопровідність, Вт/(м К)	0,727
C_p	Теплоємність, Дж/(кг К)	3000

Верифікацію проведено на основі порівняння профілів швидкості рідини під впливом поперечного магнітного поля та без нього.

Під час математичного моделювання розглянуто випадок стаціонарного руху нестисливої рідини, що має постійну електропровідність і знаходиться під дією зовнішнього стаціонарного однорідного магнітного поля.

Математична модель складається з рівнянь Нав'є-Стоксу для нестисливої рідини (2.1) та рівняння нерозривності (2.2) [84]:

$$\rho\frac{\partial u_i}{\partial t}+\rho u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)+f_i, \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \tag{2.2}$$

де p – гідродинамічний тиск; ρ – густина; x_j – декартові координати; u_j – проекції швидкості в декартовій системі координат; t – час; f_i – проекції вектора масових сил на осі координат; μ – динамічна (молекулярна) в'язкість.

У розглянутій задачі течії електропровідної рідини, в якості масової сили f_i необхідно врахувати силу Лоренца [85].

Рідина піддається впливу зовнішнього магнітного поля з вектором магнітної індукції $\bar{B}$. Потік рідини буде індукувати електричні струми в рідині, а вони, в свою чергу, породжують індуковане магнітне поле, яке можна розглядати як збурення зовнішнього поля. Відносний розмір цього збурення регулюється безрозмірним магнітним числом Рейнольдса

$$Rm_L = \eta\sigma u L, \tag{2.3}$$

де η – магнітна проникність, σ – електропровідність, L – характерний розмір. У більшості промислових та лабораторних течій магнітне число Рейнольдса дуже низьке, $Rm_L \ll 1$. Збурення магнітного поля, спричинені течією рідини незначні у порівнянні з зовнішнім полем. Використовуючи це «квазістатичне наближення», нерелятивістські рівняння Максвелла дають визначення сили Лоренца

$$\bar{f} = [\bar{j} \times \bar{B}], \tag{2.4}$$

де $\bar{j}$ – щільність електричного струму, що виникає в електропровідній рідині, яка рухається зі швидкістю $\bar{u}$ за рахунок місцевого електричного поля з напругою $\bar{E}$ і магнітного поля, що визначається узагальненим законом Ома [86]:

$$\bar{j} = \sigma[\bar{E} + \bar{u} \times \bar{B}]. \tag{2.5}$$

Скалярний електростатичний потенціал φ визначається за формулою

$$\bar{E} = -\nabla\varphi. \tag{2.6}$$

де ∇ – оператор Гамільтона – векторний диференціальний оператор першого порядку, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$.

За відсутності вільних зарядів:

$$\nabla^2\varphi = \nabla \cdot [\bar{u} \times \bar{B}]. \tag{2.7}$$

Рішення отриманої системи диференційних рівнянь в часткових похідних (2.1)-(2.7) можливе чисельними методами, але, внаслідок того, що для їх вирішення необхідно використати надзвичайно великі комп'ютерні потужності із великими витратами часу на обробку результатів, оптимальним є осереднення рівнянь Нав'є-Стоксу за Рейнольдсом [87]. Цей підхід заснований на осереднені рівнянь, а потім на їх інтегруванні. При цьому, з'являється додатковий тензор напруг, але, у випадку стаціонарної осередненої турбулентної течії, звертаються в нуль локальні прискорення. Розрахунок таких рівнянь значно спрощується у порівнянні з рівняннями Нав'є-Стоксу.

Осереднення Рейнольдсу застосовується шляхом розділення миттєвих змінних на середню та пульсаційну частини. Середнє значення величини v визначається як середнє значення ансамблю за нескінченною кількістю реалізацій v_n [85],

$$\langle v \rangle = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} v_n. \tag{2.8}$$

Будемо використовувати великі літери для середніх значень, а малі – для позначення пульсаційних. Швидкість, наприклад, виражається як сума $U_i + u_i'$, де U_i – середня швидкість, а u_i' – пульсаційна складова швидкості. За визначенням середнє значення пульсаційних складових дорівнює нулю.

Осереднення описаним способом рівнянь (2.1) і (2.2) дає осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса (RANS) та рівняння нерозривності,

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \rho\langle u_i' u_j' \rangle\right) + F_i, \tag{2.9}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, \tag{2.10}$$

де F_i – сила Лоренца.

Після осереднення Рейнольдса рівняння транспорту величини Q через поверхню, що обмежує контрольний об'єм, враховуючи, що $q = Q + q'$:

$$\rho \frac{\partial Q}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial Q}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_Q \frac{\partial Q}{\partial x_j} + \rho\langle u_i' q' \rangle\right) + S_Q \tag{2.11}$$

де S_Q – джерело; Γ_Q – дифузійна складова потоку величини Q.

У рівняннях руху члени виду $\rho\langle u_i' u_j' \rangle$ є напругами Рейнольдса. Для визначення зв'язку між напругами Рейнольдсу та іншими параметрами потоку необхідно використовувати додаткові залежності – модель турбулентності [86, 87]. В даний час розроблені сотні моделей турбулентності, але жодна з них не є універсальною, тобто підходящою для будь-яких течій [88].

Осереднення Рейнольдса необхідно здійснити також для рівнянь Максвелла (2.4) - (2.7). Таким чином, середня сила Лоренца F_i у (2.9) визначається наступним чином:

$$\bar{F} = [\bar{J} \times \bar{B}]. \tag{2.12}$$

Середня щільність електричного струму:

$$\bar{J} = \sigma[-\nabla\Phi + \bar{U} \times \bar{B}]. \tag{2.13}$$

Використовуючи рівняння $\nabla \cdot \bar{J} = 0$ отримуємо:

$$\nabla(\sigma\nabla\Phi) = \nabla \cdot [\sigma\bar{U} \times \bar{B}]. \tag{2.14}$$

Для постійної електропровідності σ:

$$\nabla^2\Phi = \nabla \cdot [\bar{U} \times \bar{B}]. \tag{2.15}$$

Силу Лоренца можна обчислити, якщо спочатку розв'язати (2.14) з відповідними граничними умовами. Якщо n – орт внутрішньої нормалі, то рівняння (2.13) вирішують з граничною умовою Неймана:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n} = -\frac{J_n}{\sigma} + \bar{n} \cdot [\bar{U} \times \bar{B}], \tag{2.16}$$

де $J_n = \bar{J} \cdot \bar{n}$ – струм на вході в домен. Непровідна стінка має нульовий струм за нормаллю $J_n = 0$. Для нерухомої стінки з граничною умовою відсутності ковзання, гранична умова для Φ тоді просто

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n} = 0. \tag{2.17}$$

Формальне вирішення рівняння (2.14) лише з граничними умовами Неймана містить невизначений постійний член. Для завдання граничних умов електричний потенціал повинен бути чітко вказаний принаймні в одній точці області. В якості альтернативи, фіксований електричний потенціал може бути заданий на одній або декількох стінках.

У моделях турбулентної в'язкості напруги Рейнольдса моделюються з використанням гіпотези Бусінеска [86, 90], яка зв'язує анізотропію напруг Рейнольдса з турбулентною в'язкістю:

$$\rho\langle u_i' u_j' \rangle = -\frac{2}{3}\rho K \delta_{ij} + \mu_T S_{ij}, \tag{2.18}$$

де μ_T – турбулентна в'язкість; K – кінетична енергія турбулентності та осереднений тензор відносних швидкостей деформацій S:

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right). \tag{2.19}$$

Під час даного дослідження виявлено, що раціональні результати за часом розрахунку та якістю співпадіння результатів розрахунку та експерименту показала модель турбулентності k-ε. Тому математична модель, яка для цієї моделі складається з двох рівнянь переносу характеристик турбулентності наведена саме для цієї моделі турбулентності. Математичне формулювання інших використаних моделей турбулентності можливо знайти в наступних джерелах: [84, 89, 91].

Модель турбулентності k-ε містить два диференціальних рівняння для переносу характеристик турбулентності: кінетичної енергії турбулентності K й швидкості її дисипації ε.

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{K^2}{\varepsilon}, \tag{2.20}$$

де C_μ – емпіричний коефіцієнт моделі.

Якщо напруги Рейнольдса в рівнянні (2.9) замінити записом (2.18) отримаємо:

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left([\mu + \mu_T]\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right) + F_i, \tag{2.21}$$

За аналогією з (2.18) маємо гіпотезу, що

$$\rho\langle u_i' q'\rangle = \frac{\mu_T}{\sigma_Q}\frac{\partial Q}{\partial x_i}, \tag{2.22}$$

де σ_Q – турбулентне число Прандтля. Тоді осереднене рівняння переносу величини Q набуває вигляду:

$$\rho\frac{\partial Q}{\partial t}+\rho U_j\frac{\partial Q}{\partial x_j}-\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left[\Gamma_Q+\frac{\mu_T}{\sigma_Q}\right]\frac{\partial Q}{\partial x_j}\right)=S_Q. \tag{2.23}$$

Нехтуючи молекулярною дифузією [92]:

$$\rho\frac{\partial K}{\partial t}+\rho U_j\frac{\partial K}{\partial x_j}-\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_T}{\sigma_K}\frac{\partial K}{\partial x_j}\right)=\rho(P_K-\varepsilon)+S_K, \tag{2.24}$$

$$\rho\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\rho U_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}-\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)=\rho\left(C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{K}P_K-C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{K}\right)+S_\varepsilon. \tag{2.25}$$

Тут P_K – генераційний член, який моделюється з використанням гіпотези турбулентної в’язкості (2.18)

$$P_K=\frac{P_{ii}}{2}=\frac{\mu_T}{\rho}S_{ij}S_{ji}. \tag{2.26}$$

S_K, S_ε – джерельні члени, зумовлені масовими силами в рівняннях Нав'є-Стокса (2.1). $C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_K, \sigma_\varepsilon$ – емпіричні константи моделі [89, 91].

Таким чином, математична модель, що вирішується програмним комплексом чисельним способом за допомогою методу контрольних об’ємів складається з рівнянь (2.12)-(2.26).

Для розрахунку використано програмний продукт Ansys CFX. Цей програмний комплекс є валідованим для усіх класів течій, у тому числі для розрахунків магнітної гідродинаміки [85, 91, 93].

Сітки побудовані на основі призматичних та тетрагональних елементів [94]. Розрахунки завершувалися при виконанні двох умов: зменшення нев'язань вирішення всіх рівнянь до значень 10^{-5} і забезпечення постійного за ітераціями

перепаду тиску в трубопроводі. Тобто, перепад тиску повинен змінюватися не більше, ніж на 0,1% за 10 ітерацій, коли визначено, що зміна перепаду має коливальний характер. Використовувалися чисельні схеми другого порядку.

У вхідному перетині каналу трубопроводу задавалася максимальна швидкість величиною V_{max} м/с. Для моделювання повністю розвинутого примежового шару біля твердих стінок профіль швидкості на вході задавався за залежністю:

$$V = V\left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7}_{max}, \qquad (2.27)$$

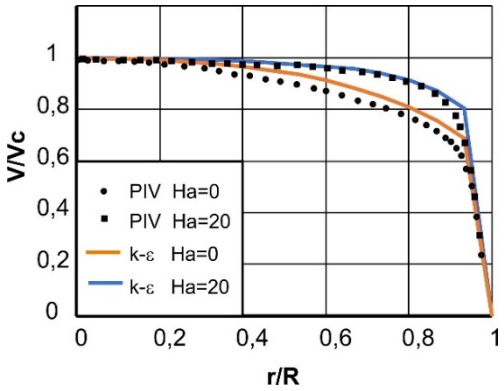
де r – поточний радіус точки в перетині труби; $R = 0{,}0445$ м – радіус труби.

У вихідному перетині труби задавалася відкрита границя з нульовим статичним тиском. Інтенсивність турбулентності задана величиною 5% згідно роботи [69,95]. Моделювалися турбулентні режими течії з числами Рейнольдса $Re = 11300$, тобто геометричні параметри та числа Рейнольдса були такі, як й в експерименті.

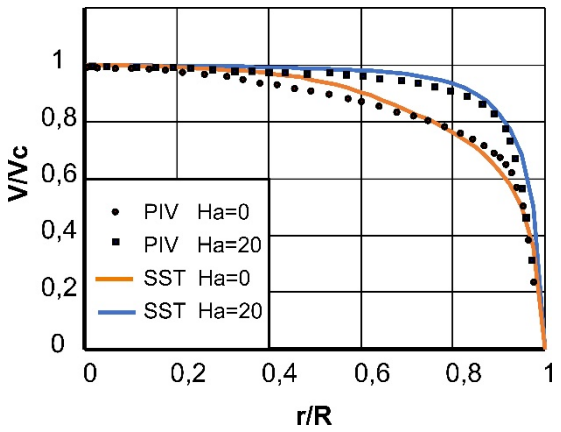
Вибір найкращої моделі турбулентності здійснено на основі порівняння профілів швидкості в трубі. Загалом порівнювалися чотири моделі турбулентності. Графіки розподілу швидкості наведено на рис. 1.

Для порівняння результатів МГД розрахунків використовують критеріальне число Гартмана

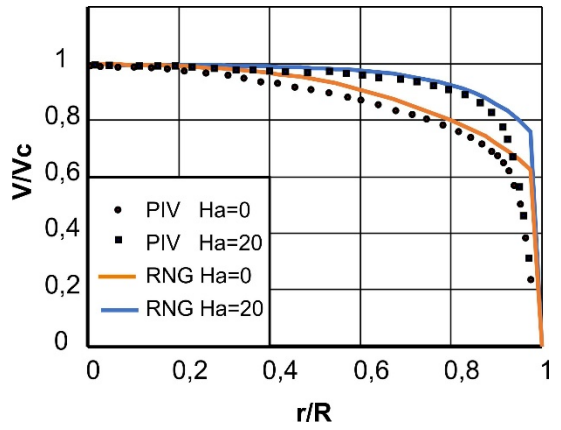
$$Ha = BR\sqrt{\sigma/\rho\nu}. \qquad (2.28)$$



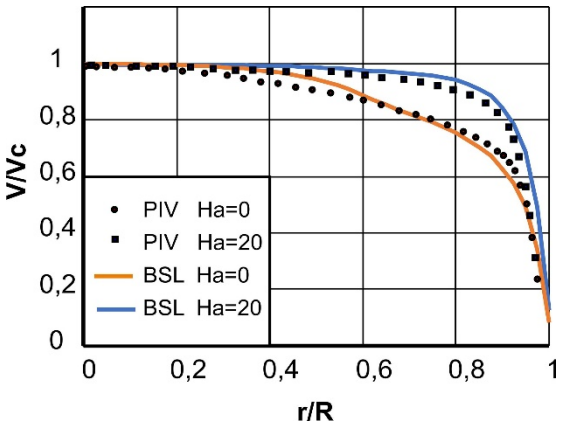
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.1. Порівняння розподілу швидкості в трубі із використанням різних моделей турбулентності:

а) k-ε; б) SST k-ω; в) (RNG) k-ε; г) BSL Reynolds Stress

Практично всі моделі демонструють досить гарний збіг з результатами експерименту. Для обґрунтування вибору моделі визначено суму квадратів

відхилень розрахункових точок від експериментальних. Результати щодо суми квадратів наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Сума квадратів відхилень розрахункових точок від експериментальних для різних моделей турбулентності

Модель турбулентності	Число Гартмана, Ha	Сума квадратів відхилень
k-ε	0	0,0469
	20	0,0208
SST k-ω	0	0,0377
	20	0,0471
(RNG) k-ε	0	0,0836
	20	0,246
BSL Reynolds Stress	0	0,0228
	20	0,0537

Аналіз даних табл. 2.2 показує, що для течії без впливу магнітного поля найкращою є модель турбулентності BSL Reynolds Stress, при наявності магнітного поля – k-ε модель. SST k-ω модель має досить гарні показники без залежності від числа Гартмана. SST k-ω модель турбулентності демонструє досить посередні показники внаслідок малої кількості використаних елементів у сітковому розбитті. Збільшення елементів у прикордонному шарі та відповідне зменшення показника y^+ повинне покращити якість розрахунку за цією моделлю [31], але це збільшить час розрахунку, що є небажаним під час пошуку оптимальних параметрів розрахунку електропровідної рідини для інженерної мети створення установки для очищення конденсаторних труб.

Порівняння контурів розподілу швидкості течії електропровідної рідини з числом Гартмана (Ha=20) для різних моделей турбулентності наведено на

рис. 2.2. Тут можна бачити, що, за кольором розподілу швидкості практично не можливо розрізнити моделі турбулентності, тому за усіма критеріями раціонально для подальших розрахунків обрати k-ε модель турбулентності. Ця модель має деякі недоліки щодо розрахунку пристінних шарів, але дозволяє отримати якісні та адекватні результати для течії електропровідної рідини із обмеженням на кількість елементів розрахункової сітки.

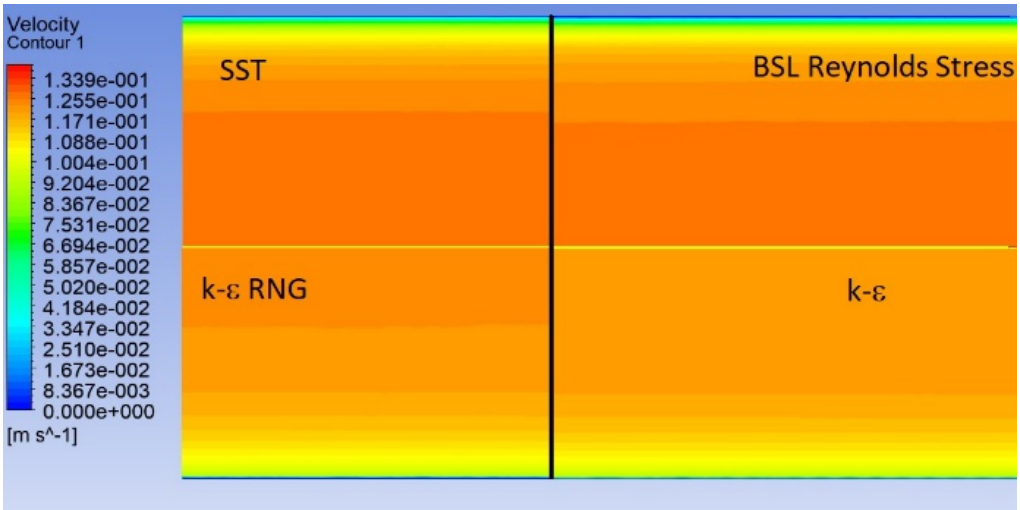


Рис. 2.2. Порівняння контурів швидкості течії рідини з числом Гартмана (Ha=20)

На рис. 2.3 наведено аналіз вибору сіткового розбиття. Аналіз проведено для двох моделей турбулентності k-ε та SST.

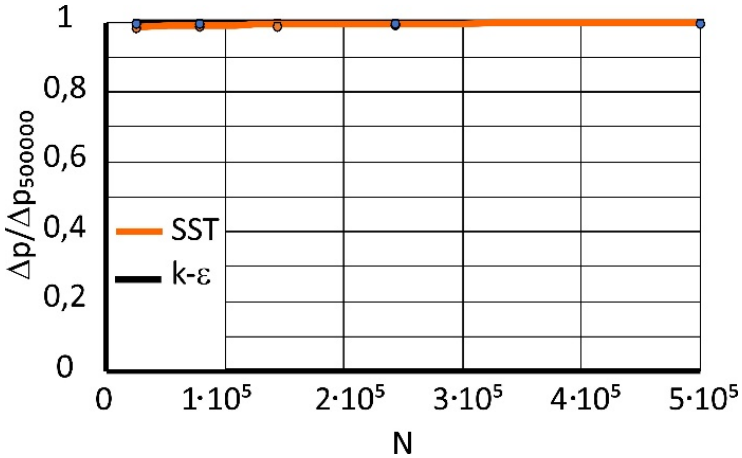


Рис. 2.3. Залежність результатів розрахунку перепаду тиску в трубопроводі від кількості елементів сітки

Отримано, що кількість елементів сітки практично не впливає на точність розрахунку перепаду тиску. Перепад тиску віднесено до перепаду тиску, який отримано для сіток з числом елементів 500000. Це означає, що незалежно від моделі турбулентності для простих геометрій достатньо використовувати сіткові розбиття з кількістю елементів, що не перевищує параметри академічної ліцензії Ansys CFX.

2.2. Розрахунок течії електропровідної рідини в коліні трубопроводу

На сьогоднішній день в багатьох галузях промисловості 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 проявляють електропровідні властивості.

На відміну від класичної гідродинаміки, моделювання МГД потребує одночасного вирішення рівнянь гідродинаміки та електродинаміки, що значно ускладнює процес моделювання [68, 69]. Експериментальні дослідження поводження електропровідних рідин обмежені дослідженнями спеціалізованого обладнання, а саме: МГД-насоси, МГД-генерація електроенергії тощо [70-72].

Гідравлічний 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 [73, 74].

Перші теоретичні та експериментальні роботі в галузі МГД було проведено Гартманом в 1937 році [75] та нобелівським лауреатом Альвеном [96] в 50-х роках 20 сторіччя. В роботі [75] досліджено поводження ртуті під впливом магнітного поля та зроблено висновки щодо переходу течії від ламінарного до турбулентного руху в круглій трубі. Гартман вперше помітив, що критичні значення чисел Рейнольдса, що використовують в класичній гідравліці не можливо використовувати для електропровідної рідини. Альвен в своїх працях сконцентрував увагу на таких напрямках як: теорія полярного сяйва, геомагнітні бурі, утворення Сонячної системи, тому він не займався проблемами гідравлічного розрахунку течії рідин.

Подальший розвиток МГД частіше проводився на основі аналітичних розрахунків течії [76], 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, але й часто є неньютонівськими [78, 97]. Неньютонівські рідини теж мають дуже складні залежності втрат тиску на місцевих опорах, які досліджуються експериментально та аналітично сьогодні й ще не має однозначних залежностей для будь-яких рідин [82, 98, 99].

Математичне моделювання на основі чисельного розрахунку течії дає можливість отримати точний результат, що підтверджується роботами [78, 79, 97, 100]. Для електропровідних рідин часто використовують потужні методи прямого чисельного моделювання (DNS) та метод крупних вихорів (LES), але ці методи потребують великої кількості елементів сітки, що вимагає дуже

потужних комп'ютерів та великого часу на розрахунок, що є недоцільним під час інженерних розрахунків.

На сьогоднішній день для гідродинамічних розрахунків створено сотні моделей турбулентності для спрощення симуляцій під час використання осереднення рівнянь Нав'є-Стоксу за Рейнольдсом. Найбільш універсальними моделями є: k-ε, (RNG) k-ε, k-ω та SST k-ω [80, 81, 84, 87, 88].

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

Рідина вважалася в'язкою, нестисливою та електропровідною. Рівняння руху рідини вирішувалися чисельно використовуючи метод контрольних об'ємів у програмному середовищі Ansys CFX.

Математичне моделювання руху електропровідної рідини проведено на основі вирішення осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стоксу із рівнянням SST(Shear Stress Transport) моделі турбулентності, рівняння нерозривності та рівнянь Максвелла для течії нестисливої рідини [85, 86, 89]:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left([\mu + \mu_T]\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) + f_i, \tag{2.29}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \tag{2.30}$$

$$\bar{f} = [\bar{j} \times \bar{B}], \tag{2.31}$$

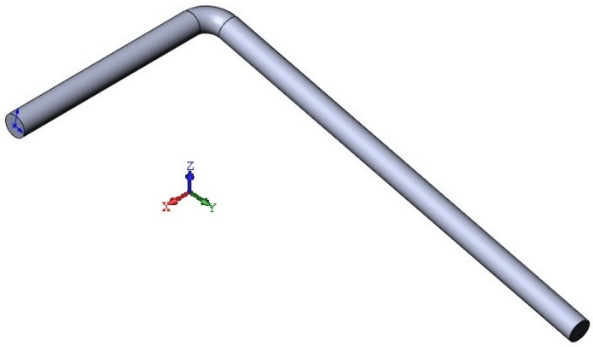
$$\nabla(\sigma \nabla \Phi) = \nabla \cdot [\sigma \bar{u} \times \bar{B}], \tag{2.32}$$

$$\nabla^2 \Phi = \nabla \cdot [\bar{u} \times \bar{B}], \tag{2.33}$$

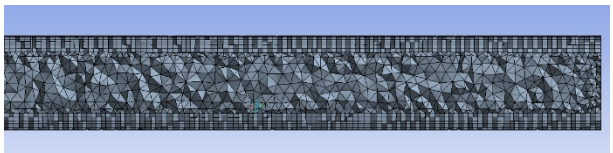
де ρ – густина; x_j – декартові координати; u_j – проекції швидкості в декартовій системі координат;t – час; p – гідродинамічний тиск; f_i – проекції вектора масових сил на осі координат (в нашому випадку – сила Лоренца); μ – динамічна (молекулярна) в'язкість; μ_T – турбулентна динамічна в'язкість; $\bar{j}$ – щільність електричного струму, що виникає в електропровідній рідині, яка рухається зі

швидкістю $\bar{u}$ за рахунок місцевого електричного поля; $\bar{B}$ – вектор магнітної індукції; Φ – скалярний електростатичний потенціал; σ – електропровідність.

Твердотільна модель рідини, що рухається в коліні плавного повороту на 90° наведено на рис. 2.4 а.



а)



б)

Рис. 2.4. Розрахункові моделі коліна трубопроводу: а) твердо тільна модель; б) сіткова модель

Розрахунок виконано в програмному комплексі Ansys CFX. Сіткові моделі наведено на рис. 2.4 б. Вони побудовані за допомогою призматичних та тетрагональних елементів [94]. Ansys CFX є валідованим для усіх класів течій, у тому числі для розрахунків магнітної гідродинаміки [85, 91, 100].

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

Граничні умови завдавалися наступним 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 нерухомої стінки з граничною умовою відсутності ковзання – скалярний електростатичний потенціал $\partial\Phi/\partial n = 0$.

Для порівняння результатів МГД розрахунків використовувалося критеріальне число Гартмана

$$Ha = BR\sqrt{\sigma/\rho\nu}.$$

де ν – кінематична в'язкість.

Тому що для верифікації математичної моделі проводилося порівняння профілів швидкості з експериментальними профілями [90, 102, 103], наведеними в роботі [77], то чисельні дослідження проведені для 30 % водного розчину гідроксиду калію (KOH). Основні фізичні властивості рідини: густина – 1280 кг/м^3; динамічна в'язкість – 0,00143 Па×с; кінематична в'язкість – 1,18×10^{-6} м^2/с; електропровідність – 73,67 См/м; теплопровідність – 0,727 Вт/(м К); теплоємність – 3000 Дж/(кг К).

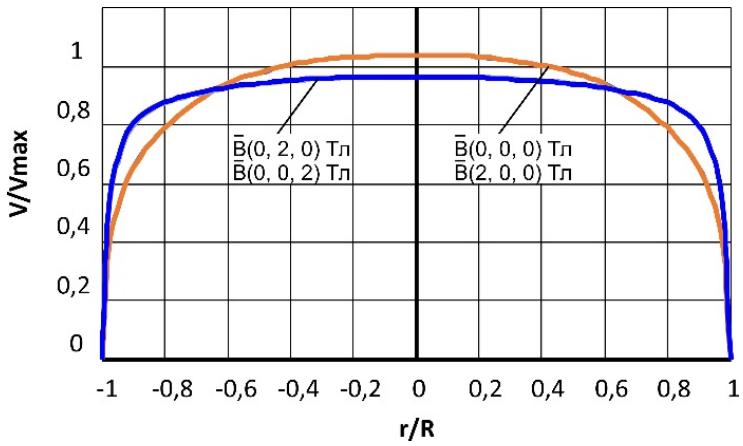
Геометричні параметри досліджуваного місцевого опору в коліні наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

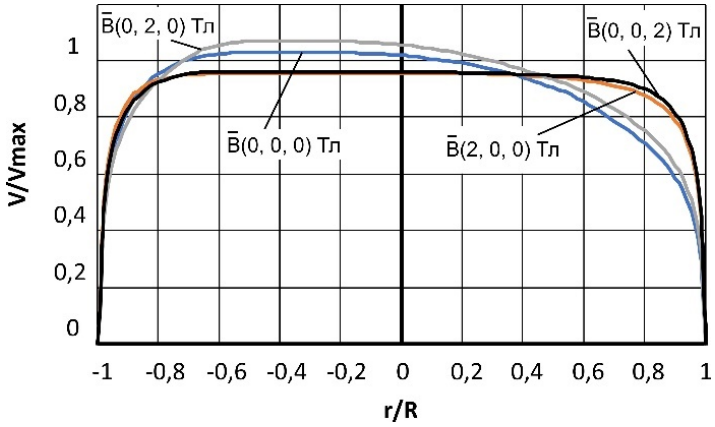
Геометричні параметри місцевого опору

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

Радіус повороту, мм	100



а)

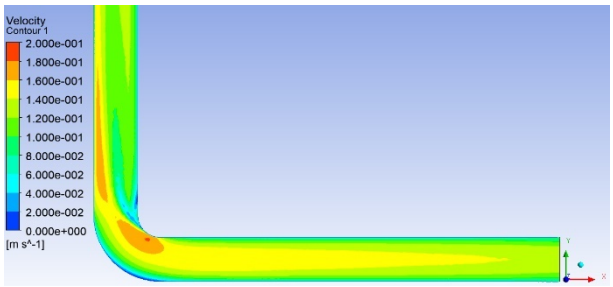


б)

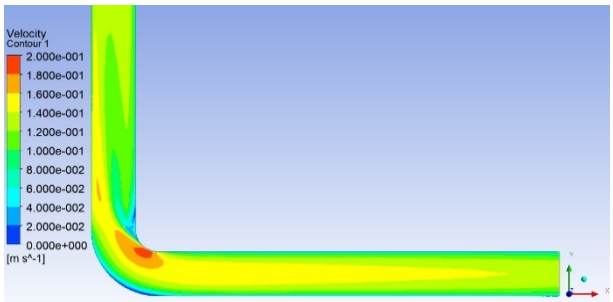
Рис. 2.5 Розподіл швидкості вздовж радіусу: а) на відстані 500 мм до повороту; б) на відстані 1500 мм після повороту

Магнітне поле має значний вплив на епюру швидкості до повороту та після нього в коліні (рис. 2.5) 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, у порівнянні з випадком без магнітного поля. Магнітна індукція задавалася вектором $\bar{B}(B_x, B_y, B_z)$ Тл таким чином, щоб тільки одна проекція цього вектора була ненульовою для простоти порівняння впливу магнітного поля на параметри течії. Швидкість віднесена до максимальної швидкості V_{max} в центрі труби, що завдавалася в якості граничної умови.

Результати розрахунку течії в коліні з поворотом на 90° наведено на рис. 2.6

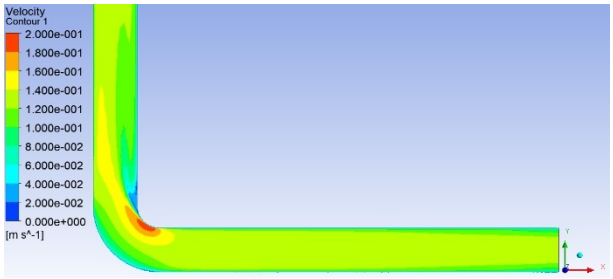


а)



б)

в)



г)

Рис. 2.6. 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. 2.6), але магнітне поле з індукцією $\bar{B}(0,2,0)$ Тл збільшує область відриву, й навпаки зона відриву зменшується для випадку $\bar{B}(0,0,2)$ Тл.

На рис. 2.7 наведено 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 кожну вісь – 0..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).

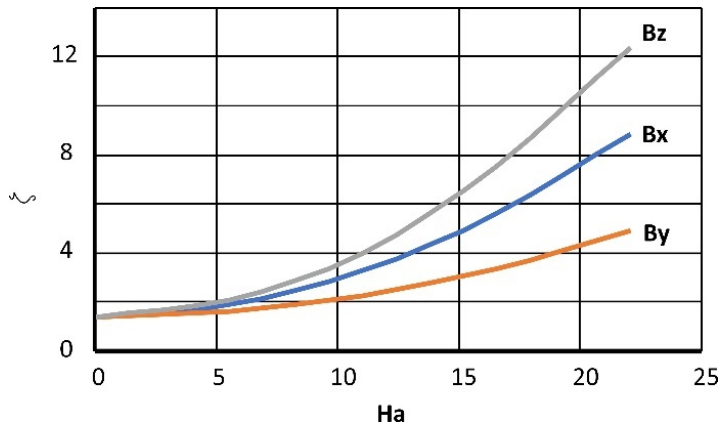


Рис. 2.7. Залежність коефіцієнту місцевого опору від числа Гартмана

Загалом кажучи, 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 вектору магнітної індукції. На рис. 2.8 наведено залежність коефіцієнту від чисел Рейнольдсу та напрямку дії магнітної індукції. Можна бачити, що максимальні значення опору мають місце коли вектор магнітної індукції направлено перпендикулярно до обох дільниць коліна (вісь z згідно рис. 2.4а).

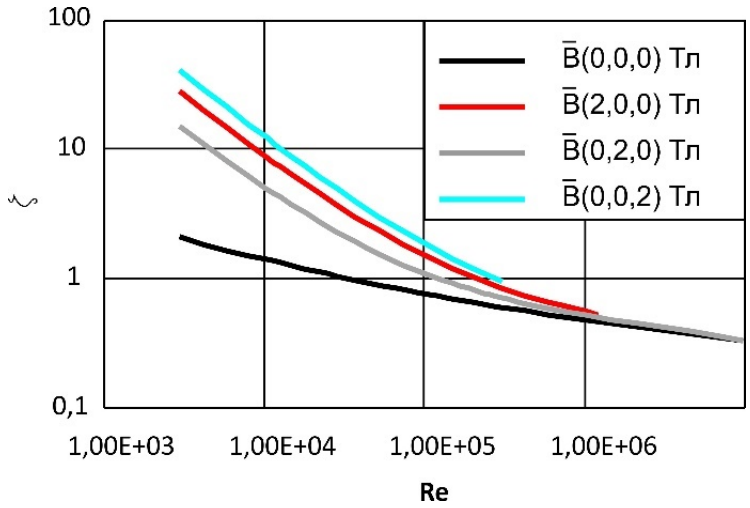
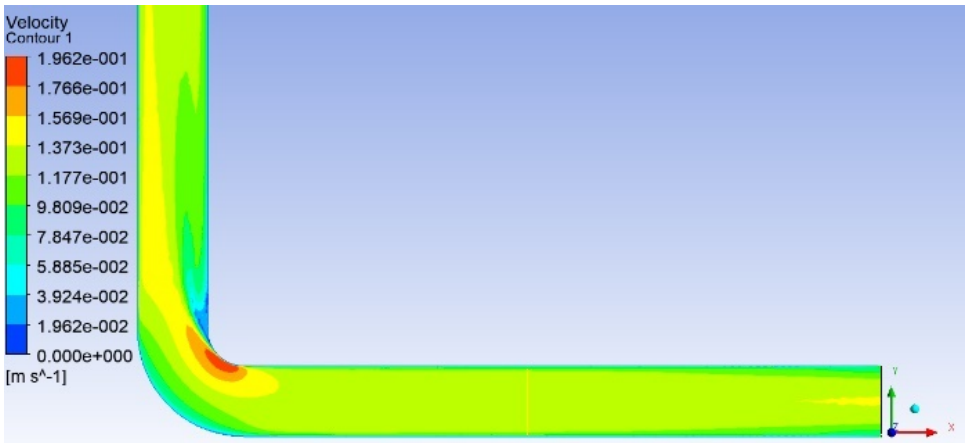


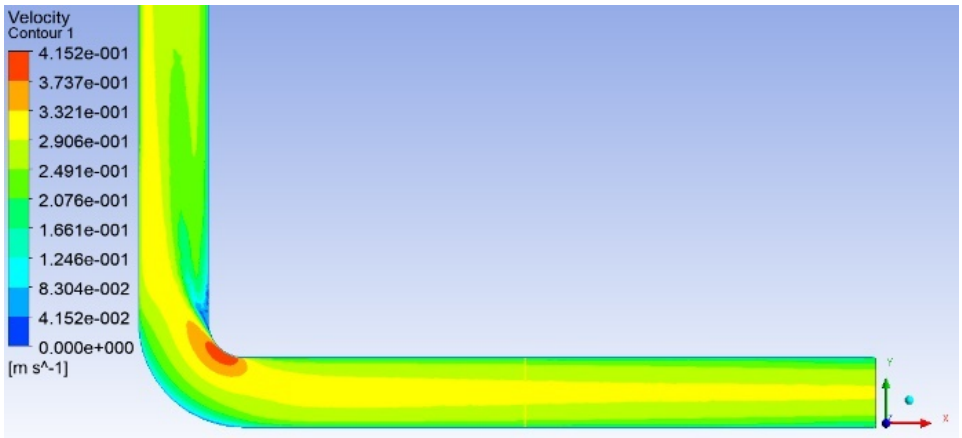
Рис. 2.8 Залежність коефіцієнту місцевого опору від числа Рейнольдса

Зі збільшенням чисел Рейнольдса й, відповідно, швидкості течії рідини, коефіцієнт опору прагне до значень коефіцієнтів опору без дії магнітного поля. Асимптотичне значення коефіцієнтів опору електропровідної рідини під дією магнітного поля для абсолютно гладкої труби співпадають зі значеннями коефіцієнтів місцевого опору без дії магнітного опору при значеннях $Re > 10^6$. Але, при малих значеннях чисел Рейнольдса, вплив магнітного поля дуже значний, що збільшує коефіцієнт ζ більше ніж в 15 разів. Рівняння для розрахунку коефіцієнтів ζ наведено в табл. 2.4

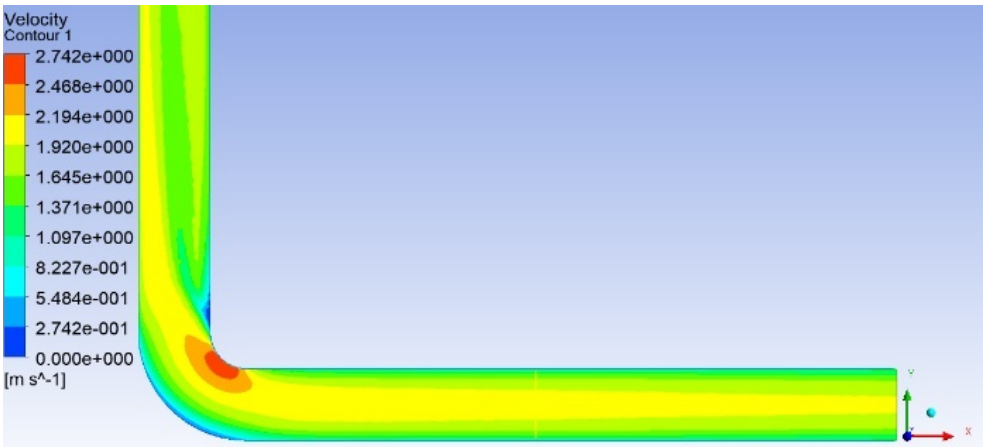
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.9. 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 вектору 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 усіх випадків.

Таблиця 2.4

Рівняння для розрахунку коефіцієнту місцевого опору

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

На рис. 2.9 наведено зміну картини течії зі збільшенням швидкості та, відповідно, й числа Рейнольдса. Помітне збільшення зони відриву зі збільшенням числа Рейнольдса.

2.3. Втрати тиску під час течії електропровідної рідини місцевими опорами трубопроводу

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, солоної води та інших рідин з електропровідними властивостями [70, 71].

Складність математичних аналітичних досліджень в магнітній гідродинаміці виникає внаслідок одночасного моделювання руху рідини та рівнянь електродинаміки Максвелла [69, 104]. З іншої сторони експериментальні дослідження коштовні та проводяться для перевірки роботи пристроїв [72]. 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 [73, 74].

Багато робіт щодо руху електропровідних рідин опубліковано Гартманом [75] та Альвеном [96], 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 Максвела не дозволяють зробити висновок про втрати енергії на місцевих опорах трубопроводу внаслідок складності відривів течії від стінок, та тривимірності відривів [105]. Аналітичне математичне моделювання ускладнюється, якщо рідини проявляють властивості неньютонівських рідин [77, 78]. 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 [82, 98, 99].

Із появою потужних комп’ютерів з’явилася можливість математичного моделювання на основі чисельного розв’язку рівнянь Нав’є-Стокса та рівнянь Максвела, але це потребує дуже значних витрат часу на розрахунок при

використанні методів прямого чисельного моделювання (DNS) та крупних вихорів (LES) [78, 79, 97, 100].

Осереднення рівнянь за Рейнольдсом дозволяє зменшити необхідний для розрахунку час при незначному погіршенні точності розрахунку, що пов'язано з використанням моделей турбулентності [80,81,84,87,88].

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

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/м^3; динамічна в'язкість – 0,00143 Па с; кінематична в'язкість – 1,18×10^{-6} м^2/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 .

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 [85, 86, 89]:

$$\rho\frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left([\mu + \mu_T]\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) + f_i, \tag{2.34}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \tag{2.35}$$

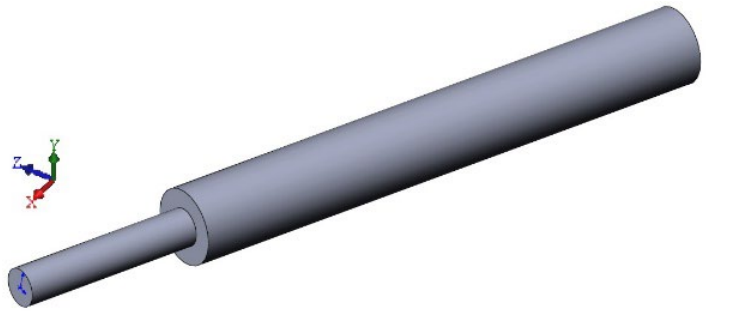
$$\bar{f} = [\bar{\jmath} \times \bar{B}], \tag{2.36}$$

$$\nabla(\sigma\nabla\Phi) = \nabla \cdot [\sigma\bar{u} \times \bar{B}], \tag{2.37}$$

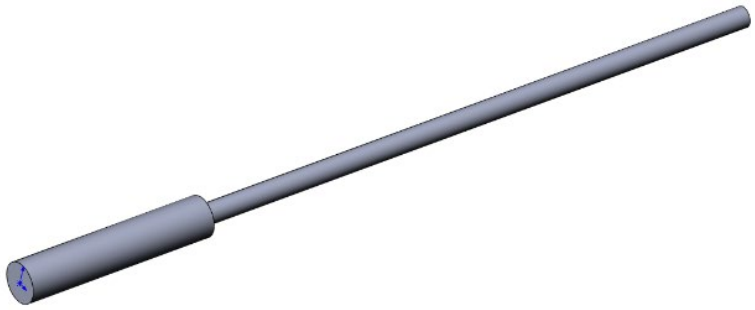
$$\nabla^2 \Phi = \nabla \cdot [\bar{u} \times \bar{B}], \tag{2.38}$$

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; $\bar{j}$ – щільність електричного струму, що виникає в електропровідній рідині, яка рухається зі швидкістю $\bar{u}$ 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. 2.10



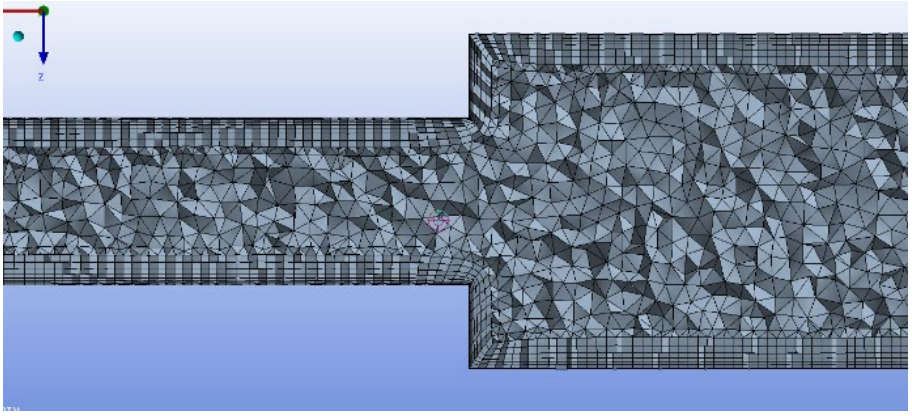
а)



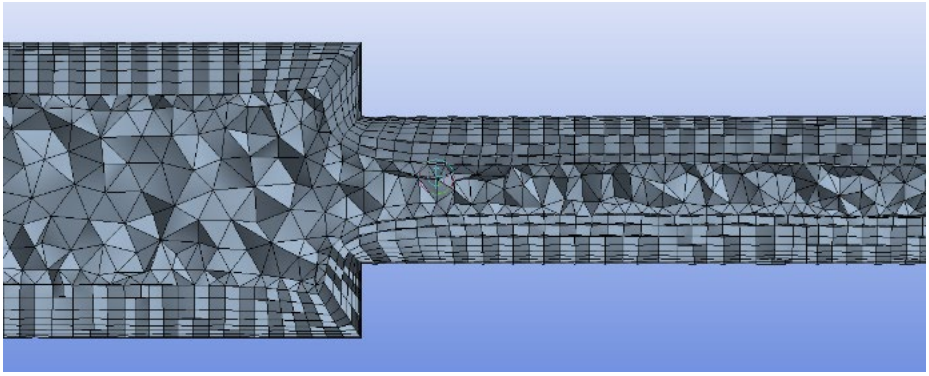
б)

Рис. 2.10 Твердотільні моделі місцевих опорів: а) раптове розширення; б) раптове звуження

Сіткові моделі побудовані призматичними та тетрагональними елементами [94] та наведені на рис. 2.11. Програмний комплекс є валідованим для розрахунку класу течій розглянутих в даній статті [85, 91, 93].



а)



б)

Рис. 2.11 Сіткові моделі місцевих опорів: а) раптове розширення; в) 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 % [90, 92, 95].

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

$$V = V\left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7}_{max}, \tag{2.39}$$

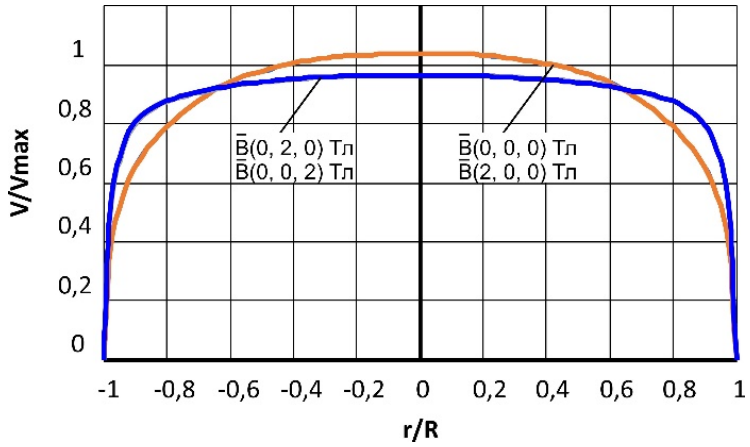
де r – радіус точки в перетині труби; $R = 0{,}05$ м – радіус труби. У вихідному перетині заданий нульовий статичний тиск. Для нерухомої стінки – скалярний електростатичний потенціал $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$.

Геометричні параметри досліджуваних місцевих опорів наведено в табл. 2.5.

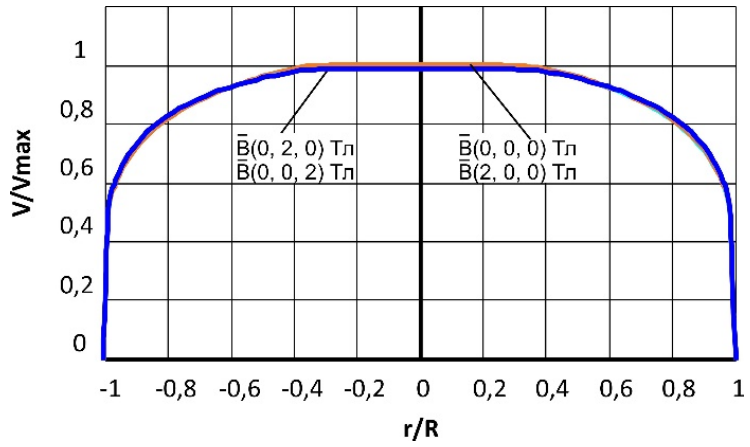
Таблиця 2.5

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



а)

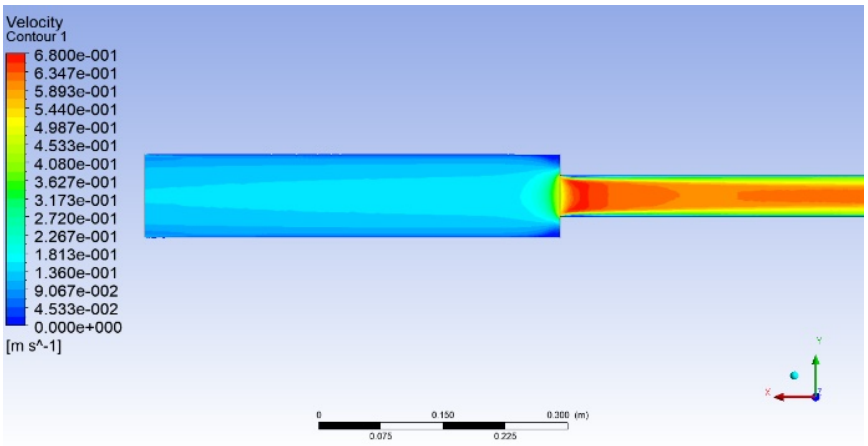


б)

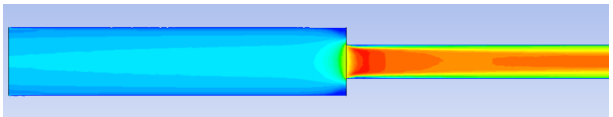
Рис. 2.12 Розподіл швидкості вздовж радіусу: а) на відстані 100 мм до раптового звуження; б) на відстані 1400 мм після раптового звуження

Аналізуючи рис. 2.12 можна дійти до висновку, що магнітне поле на початковій дільниці має незначний вплив, але після проходження раптового звуження вплив магнітного поля практично нівелюється (рис. 2.12б). 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 $\bar{B}(B_x, B_y, B_z)$ Тл. Труба орієнтована вздовж осі x. Тому дія двох компонентів магнітної індукції створюють поперечне магнітне поле.

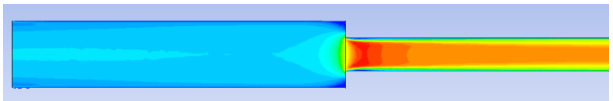
Результати розрахунку течії в раптовому звуженні наведено на рис. 2.13.



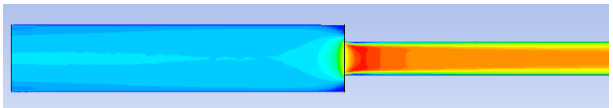
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.13. Розподіл швидкості під час течії в раптовому звуженні: а) $\bar{B}(0,0,0)$; б) $\bar{B}(2,0,0)$; в) $\bar{B}(0,2,0)$; г) $\bar{B}(0,0,2)$

Дія магнітного поля практично не впливає на картини течії в раптовому звуженні (рис. 2.13). Деякі відмінності можна спостерігати для поперечної дії вектора магнітної індукції (рис. 2.13 в, г).

Рис. 2.14. Залежність коефіцієнту місцевого опору раптового звуження від числа Гартмана

На рис. 2.14 наведено залежність коефіцієнта місцевого опору (раптового звуження) від числа Гартмана. Спостерігається повне співпадіння кривих для поперечної дії вектору магнітної індукції. Діапазон зміни проекції магнітної індукції на кожну 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. 2.15). Це пояснюється збільшенням швидкості течії та зменшенням відносної дії магнітного поля на потік.

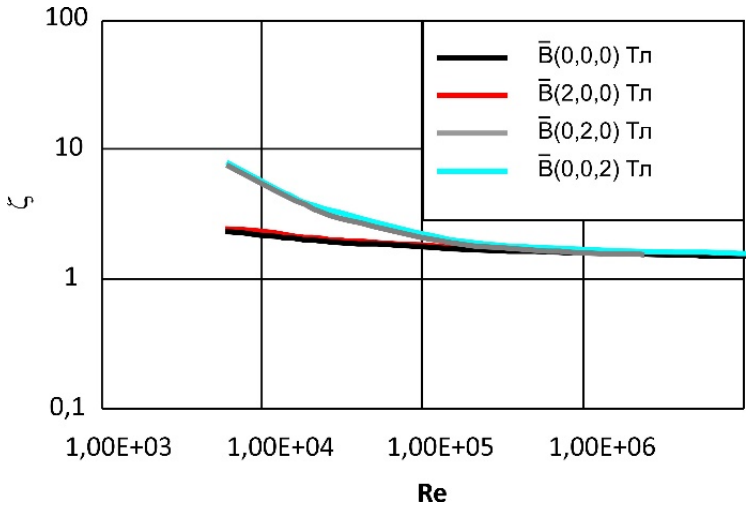
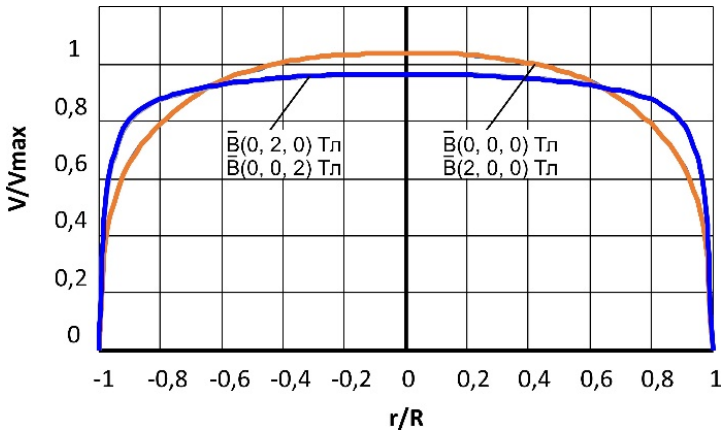
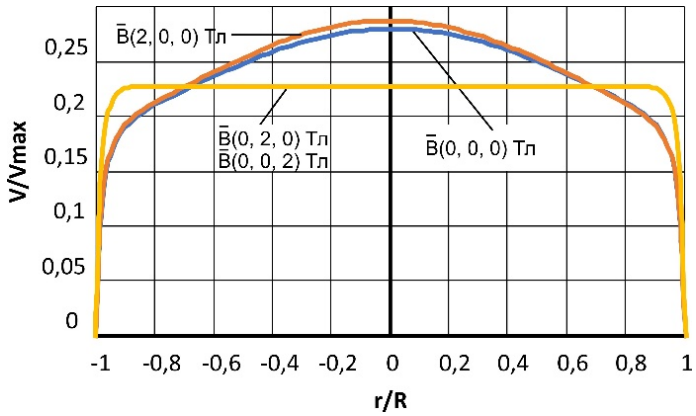


Рис. 2.15. Залежність коефіцієнту місцевого опору (раптове звуження) від числа Рейнольдса



а)

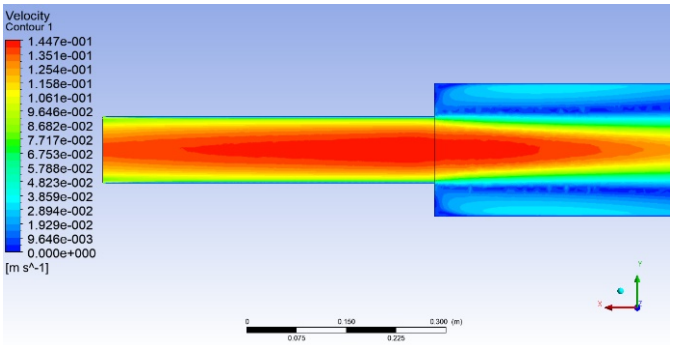


б)

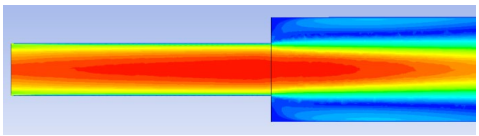
Рис. 2.16. Розподіл швидкості вздовж радіусу: а) на відстані 100 мм до раптового розширення; б) на відстані 1400 мм після раптового розширення.

На рис. 2.16 наведено порівняння профілів швидкості під час течії в раптовому розширенні із різним напрямком магнітної індукції. Порівнюючи рис. 3а та рис. 7а зауважимо, що розподіл швидкості практично однаковий на початковій ділянці, що відповідає умовам завдання. Рис. 2.16 б 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.

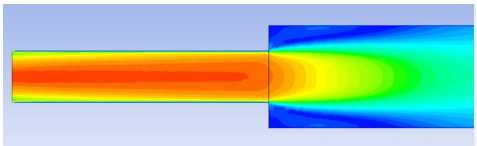
Результати розрахунку течії в раптовому розширенні наведено на рис. 2.19.



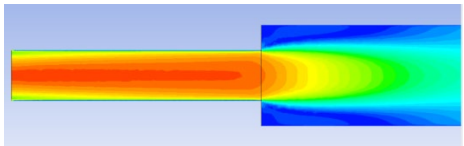
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.19. Розподіл швидкості під час течії в раптовому розширенні: а) $\bar{B}(0,0,0)$; б) $\bar{B}(2,0,0)$; в) $\bar{B}(0,2,0)$; г) $\bar{B}(0,0,2)$

На відміну від раптового звуження (рис. 2.13), в раптовому розширенні (рис. 2.19) 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. 2.20) залежності відносних втрат повного тиску від числа Гартмана мають квадратичну залежність. Спостерігається повне співпадіння кривих для поперечної дії вектору магнітної індукції.

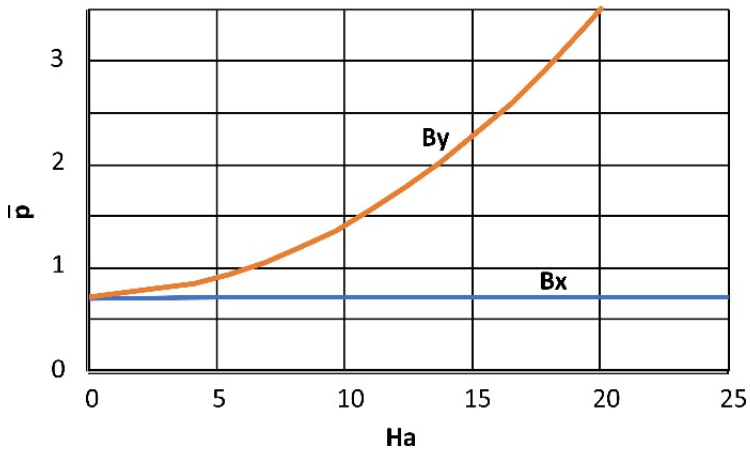


Рис. 2.20. Залежність коефіцієнту відносних втрат повного тиску для раптового розширення від числа Гартмана

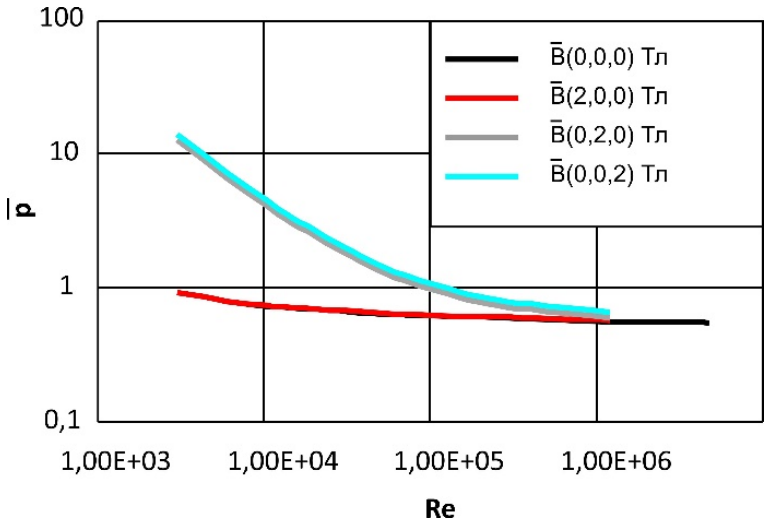


Рис. 2.21. Залежність коефіцієнту місцевого опору (раптове розширення) від числа Рейнольдса

Дія магнітного поля з вектором магнітної індукції, що співпадає з віссю течії електропровідної рідини практично не впливає на втрати тиску в раптовому розширенні (Рис. 2.21). Дія поперечного вектору магнітної індукції збільшує втрати тиску на порядок за малих чисел Рейнольдса. Збільшення чисел Рейнольдса до значень $Re > 10^6$ нівелює дію магнітного поля.

2.4 Висновки по розділу 2

1. Аналіз суми квадратів відхилень розрахункових точок від експериментальних показує, що для течії без впливу магнітного поля найкращою є модель турбулентності BSL Reynolds Stress, при наявності магнітного поля – k-ε модель. Кількість елементів сітки практично не впливає на точність розрахунку перепаду тиску. Для простих геометрій достатньо використовувати сіткові розбиття з кількістю елементів, що не перевищує $5 \cdot 10^5$ елементів.

2. На основі чисельного моделювання течії електропровідної рідини в коліні трубопроводу за допомогою вирішення рівнянь Нав'є-Стоксу осереднених за Рейнольдсом визначено залежності втрат тиску в плавному повороті. Магнітне поле має значний вплив на епюру швидкості до повороту та після нього в коліні внаслідок того, що орієнтація вектору 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.

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 вектору магнітної індукції. Максимальні значення опору мають місце коли вектор магнітної індукції направлено вздовж однієї з осей трубопроводу коліна.

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

3. 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 з результатами чисельного моделювання.

Магнітне поле на початковій дільниці 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.

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

вектору магнітної індукції. Дія поперечного вектору магнітної індукції збільшує втрати тиску на порядок за малих чисел Рейнольдса. Збільшення чисел Рейнольдса до значень $Re > 10^6$ нівелює дію магнітного поля.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОЧИЩЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ СИСТЕМ КОНДИЦІЮВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

3.1. Методика проведення експериментальних досліджень

Унікальні властивості рідин, що можуть взаємодіяти з електричними та магнітними полями перспективно використовувати у машинобудуванні, техніці та медицині [104, 106]. Магнітні рідини представляють собою розчини феромагнетиків у рідині й їх фізичні властивості у магнітному полі викликають структурні перетворення у таких рідинах.

З самого початку відкриття особливих властивостей магнітних рідин їх почали вивчати для створення багатьох пристроїв, а саме: магнітогідродинамічні насоси, магнітогідродинамічні генератори електроенергії, поводження рідин у розплавах [107-109]. Але, згодом серйозної уваги дослідників стала привертати можливість використання магнітних та електропровідних рідин для очищення рідини (найчастіше води) від нафтових плям або розливів.

Аварія на нафтовидобувній платформі Deepwater Horizon в Мексиканській затоці в 2010 році, а також проникнення вуглеводнів у ґрунтові води при розробці сланцевих родовищ у США змусили вчених шукати нові шляхи для боротьби з забрудненням води нафтою. Згідно з роботами [110, 111], таким шляхом є використання феромагнітних наночастинок, що проявляють властивості магнітних рідин та частинки рідини мають певний позитивний заряд, що дозволяє їм приклеюватися до молекул, та макрооб’ємів нафти й під дією магнітного поля рухатися в напрямку, що задає оператор очищення.

Тому вивчення поводження магнітних рідин у магнітному полі та використання їх для очищення води від залишків нафти або олії є актуальною задачею, вирішення якої приведе до розробки ефективної технології очищення.

Вперше вплив магнітного поля на гідродинамічні особливості течії електропровідних рідин відкрито майже 100 років тому на прикладі руху ртуті [112]. З того часу магнітні й електропровідні рідини привертають увагу

багатьох дослідників [96, 105]. Завдяки складності процесів, що відбуваються під час руху електропровідної рідини у магнітному та електричному полях, більшість досліджень була експериментальною. Було виявлено, що такі рідини проявляють аномальні властивості щодо втрат енергії та тиску, які не відповідають загальновідомим класичним рівнянням Бернуллі внаслідок перетворення епюри швидкості в перетині та зміни коефіцієнта Коріоліса. Крім того, виявлено, що перехід від ламінарної течії до турбулентної теж відбувається за критичними числами Рейнольдсу, що не відповідають класичним рідинам [112, 113]. Спроби вирішити рівняння руху течії електропровідної рідини аналітичними способами [82, 114] за допомоги рівнянь Нав'є-Стоксу не мали успіху для тривимірних постановок внаслідок складності системи рівнянь та використаних часткових похідних, які можуть бути вирішені лише числовими способами на сьогоднішній день [115, 116].

Числові способи вирішення рівнянь руху будь-яких рідин набули свого розвитку в останні роки, в тому числі для магнітної гідродинаміки, що дозволяє використовувати CFD розрахунки для адекватного опису поводження магнітних рідин за одночасного вирішення осереднених рівнянь Нав’є-Стоксу та рівнянь Максвелла [85, 117].

Оптимізація характеристик та параметрів очищення рідин від нафтових та оливних плям найчастіше відбувається емпіричним експериментальним шляхом, але магнітогідродинамічні рідини є досить коштовними рідинами, що приводить до того, що експериментальні дослідження їх поводження стають теж дуже коштовними [118, 119]. Математичне моделювання використовується для докладного аналізу розподілів швидкості та тисків під час руху рідини під дією та без дії магнітного поля. Виявити фізику явища, що відбувається, проаналізувати рух твердих частинок, якщо рідина з них складається, можливо на основі одночасного вирішення рівнянь Рейнольдсу, рівнянь Максвела, рівняння нерозривності рідини та рівнянь динаміки твердих частинок [120, 121] за допомогою програмного комплексу Ansys CFX [122].

Таким чином, визначення фізичних явищ руху твердих частинок електропровідної рідини на основі магнетиту в різних елементах трубопроводу є актуальною задачею, вирішення якої дозволить покращити параметри очищення забруднених нафтою та олією рідин.

Дослідження проведено в два етапи. На першому етапі проведена верифікація гідродинамічних параметрів руху електропровідної рідини, та визначена адекватність використаних рівнянь математичної моделі для опису руху електропровідної рідини та частинок магнетиту. Верифікація здійснена для руху рідини під дією магнітного поля та без неї.

На другому етапі проведено моделювання руху електропровідної рідини та частинок магнетиту в трубопроводі із різними місцевими гідравлічними опорами.

Для визначення параметрів руху використано числове моделювання руху електропровідної рідини за допомогою програмного комплексу Ansys CFX. Тому, що дослідження проведено для окремих місцевих опорів таке обмеження щодо сітки є цілком прийнятним та впливає на якість розрахунків. Для розрахунків використано математичну модель, що описана в статті [117], яка складається з осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, рівнянь Максвелла, рівняння нерозривності для нестисливої рідини та рівнянь SST(Shear Stress Transport) моделі турбулентності. Для моделювання руху твердих частинок використано підхід Лагранжа. Загалом кажучи, для розрахунку течії твердих частинок можливе використання двох підходів Лагранжа та Ейлера. Підхід Лагранжа має певні переваги, що важливі саме для даного дослідження: повна інформація щодо поведінки окремих твердих частинок в проточній частині; відносно спрощене моделювання частинок різних розмірів, форм та розподілів цих величин; значно простіше моделювання для частинок різного розміру, що приводить до різних швидкостей частинок. Використання підходу Ейлера для великої кількості частинок приводить до унеможливлення відстежування окремих частинок [123].

Під час застосування підходу Лагранжа окремі частинки відстежуються від місця їх входу до розрахункового домену до граничної умови виходу з домену або до тих пір, доки не буде виконано якийсь критерій обмеження інтегрування рівнянь [84]. Ця межа інтеграції може введена до розрахунку користувачем. Можливі два види розрахунку: коли частинки впливають на рух основної фази рідини або газу та коли частинки на основну фазу не впливають. Очевидно, що розрахунок без урахування впливу твердих частинок на основну фазу здійснюється значно швидше, але точність розрахунку погіршується. Вплив твердих частинок на основну фазу реалізується за рахунок додаткового члена у рівняннях розрахунку основної рідини. Оскільки кожна частинка відстежується від точки її введення до кінцевої границі, то процедура аналізу траєкторій твердих частинок основана та застосовується лише до стаціонарного розрахунку основної рідини.

Зміна координати розташування твердої частинки в просторі відбувається із урахуванням швидкості частинки ($\overline{V}_p = d\overline{x}_p/dt$) та кроку за часом δt [125]:

$$\overline{x}_p^n = \overline{x}_p^0 + \overline{V}_p^0 \delta t, \tag{3.1}$$

де індекси n та 0 відносяться до старих за часом значень та нових відповідно. $\overline{V}_p^0$ – початкова швидкість твердої частинки.

Під час прямого інтегрування швидкість частинок, обчислена на початку кроку за часом, вважається переважною на всьому кроці. Наприкінці часового кроку нова швидкість частинок обчислюється за допомогою аналітичного рішення рівняння динаміки частинок:

$$m_p \frac{d\overline{V}_p}{dt} = \sum \overline{F}, \tag{3.2}$$

де $\sum \overline{F}$ – сума усіх сил, що діють на частинку.

Це рівняння є прикладом загального рівняння транспорту:

$$\frac{d\phi_p}{dt} = \frac{(\phi_f - \phi_p)}{\tau} + R \tag{3.3}$$

де ϕ – загальна змінна переносу, індекс f вказує на значення змінної в навколишній до частинки рідині, τ – коефіцієнт лінеаризації; R – нелінійній джерельний член.

Аналітичне рішення загального рівняння переносу можна записати так [123]:

$$\phi_p = \phi_f + \left(\phi_p^0 - \phi_f\right)e^{-\frac{\delta t}{\tau}} + \tau R\left(1 - e^{-\frac{\delta t}{\tau}}\right). \tag{3.4}$$

Для визначення значення загальної змінної властивості рідини беруться з попереднього часового кроку.

Щоб визначити значення τ і R необхідно враховувати багато параметрів рідини: густина, в'язкість і швидкість. Ці значення розраховуються для кожного кінцевого об’єму.

Для більш точного розрахунку поведінки твердих частинок у рідині необхідно враховувати не лише вплив рідини на частинку, але й вплив твердих частинок на параметри течії. Це, так званий, сполучений розрахунок (two-way coupling).

Відсутність урахування впливу твердих частинок на основний потік можливий лише за умови, що концентрація частинок маленька й можна вважати, що їх вплив на основну фазу такий, яким можна знехтувати. Такий розрахунок більш простий тому що можливо спочатку розрахувати течію рідини, а потім на основі вже розрахованих параметрів визначити основні параметри руху твердої частинки (так званий метод суперпозиції).

Сполучений розрахунок вимагає, щоб додатковий джерельний член був включений до рівнянь течії рідини. Додатковий джерельний член обумовлений зміною параметрів турбулентності або опором. Додатковий джерельний член використовується і в рівнянні руху частинки та генерується для кожної частинки.

Цей член застосовують в контрольному об'ємі, в якому частинка знаходиться на даному часовому кроці. Цей член отримують шляхом розв'язування рівнянь переносу для джерел. Загальне рівняння для джерел частинок:

$$\frac{dS_p}{dt} = C_S\phi_p + R_S, \tag{3.5}$$

де $C_S\phi_p$ – додаткові внески до джерельного члену, які є лінійними; R_S – інші внески, що можуть включати, коли це доцільно, член масопереносу $-\left(dm_p/dt\right)\phi_p$.

Це рівняння має той самий вигляд, що й загальне рівняння переносу для частинок і розв'язується так само, як описано вище.

Джерело S, що додається до рівнянь безперервної (рідинної) фази, потім помножується на величину числової витрати для цієї частинки, що є масовою витратою, поділеною на масу частинки.

Для визначення траєкторій частинки необхідно розрахувати наступне рівняння впливу сил на зміну прискорення твердої частинки внаслідок різниці між швидкостями твердої частинки та рідини

$$m_p\frac{d\overline{V}_p}{dt} = \overline{F}_D, \tag{3.6}$$

де, $\overline{F}_D$ – сила лобового опору частинки.

Аеродинамічна сила лобового опору пропорційна швидкості зсуву, тобто різниці швидкостей між рідиною та частинкою:

$$\overline{F}_D = \frac{1}{2}C_D\rho_F A_F\left|\overline{U}_S\right|\overline{U}_S = \frac{1}{2}C_D\rho_F A_F\left|\overline{U}_F - \overline{U}_P\right|\left(\overline{U}_F - \overline{U}_P\right), \tag{3.7}$$

де C_D – коефіцієнт лобового опору; A_F – ефективна площа поперечного перетину частинки.

Коефіцієнт опору вводиться для врахування експериментальних результатів щодо в'язкого опору твердої кулі. В даному дослідженні використане визначення коефіцієнту опору за моделлю Шиллера-Ноймана [125].

$$C_D = \frac{24}{Re(1+0.15\,Re^{0.687})}, \tag{3.8}$$

де Re – число Рейнольдса.

Використовуючи нову змінну

$$D = \frac{C_D \rho_F A_F |\overline{U}_S|}{2} \tag{3.9}$$

можна розрахувати внесок до рівняння джерел:

$$\overline{R} = \frac{D}{m_p + \frac{C_{VM}}{2} m_F} \overline{V}_F = \frac{R_{VM}}{m_p} D \overline{U}_F; \tag{3.10}$$

$$C_{lin} = -\frac{D}{m_p + \frac{C_{VM}}{2} m_F} = -\frac{R_{VM}}{m_p} D. \tag{3.11}$$

Джерельний член до рівняння розраховується за наступною формулою:

$$\frac{d\overline{S}}{dt} = -\overline{F}_D = -\frac{1}{2} C_D \rho_F A_F |\overline{U}_S| \overline{U}_S. \tag{3.12}$$

Джерело $\overline{S}$ додається до рівнянь безперервної фази, потім множиться на коефіцієнт кількості для цієї частинки.

Для розрахунку зношування стінок трубопроводу використана модель Фінні [84, 123]. Зношування стінок трубопроводу внаслідок ерозійного впливу твердих частинок є складною функцією удару частинок та властивостей частинок й стінок. Виявлено, що майже для всіх металів ерозія змінюється залежно від кута удару та швидкості відповідно до співвідношення [126]:

$$E = kV_p^n f(\gamma), \tag{3.13}$$

де E – безрозмірна маса; V_P – швидкість руху частинок; $f(\gamma)$ – безрозмірна функція кута удару (зіткнення). Кут зіткнення обраховується в радіанах й визначається між дотичною до траєкторії частинки та стінки. Значення n для металів знаходиться в діапазоні 2,3..2,5.

Модель ерозійного зношування Фінні [127] пов'язує швидкість зношування зі швидкістю кінетичної енергії удару частинок об поверхню, використовуючи $n = 2$ [123]:

$$E = kV_p^2 f(\gamma), \tag{3.14}$$

де

$$f(\gamma) = \frac{1}{3} cos^2 \gamma, \text{якщо } tg\gamma > 1/3 \tag{3.15}$$

$$f(\gamma) = sin(2\gamma) - 3\, sin^2 \gamma, \text{якщо } tg\gamma \leq 1/3 \tag{3.16}$$

У програмі Ansys CFX необхідність коригування коефіцієнту k для отримання безрозмірного коефіцієнта ерозії долається шляхом використання залежності:

$$E = \left(\frac{V_p}{V_0}\right)^n f(\gamma), \tag{3.17}$$

де $V_0 = \frac{1}{\sqrt[n]{k}}$.

Типові значення цієї швидкості для різних матеріалів стінки наведено в табл.3.1.

Таблиця 3.1

Значення швидкості V_0 в залежності від матеріалу стінки трубопроводу

Матеріал стінки трубопроводу	V_0, м/с
Алюміній	952
Мідь	661

Сталь	1310
Загартована сталь	3321

Для аналізу чутливості результатів розрахунку до кількості кінцевих об’ємів, що використано під час побудови сіткового розбиття проведено порівняння результатів для п’ятьох сіток з дією та без дії магнітного поля. Результати наведено в табл.3.2. Вплив сіткового розбиття визначено на основі порівняння результатів розрахунку тиску на вході в елемент трубопроводу.

Таблиця 3.2

Тиск на вході в елемент трубопроводу

Кількість елементів сітки, млн.	Тиск, Па	Число Гартмана
0,1	2320	0
0,2	1590	0
0,3	1890	0
0,4	1805	0
0,5	1845	0
0,1	11500	50
0,2	12100	50
0,3	10900	50
0,4	11250	50
0,5	11300	50
0,1	41500	100
0,2	40000	100
0,3	39500	100
0,4	39900	100
0,5	40000	100

Таким чином, внаслідок того, що результат розрахунку для сіток з кількістю елементів більше за 300000 змінюється не більше ніж на 3,6% можна рахувати, що використання сіток з числом елементів близьким до 500000 є цілком прийнятним для проведення наступних досліджень.

На рис. 3.1 наведено результати розрахунку траєкторій твердих частинок магнетиту.

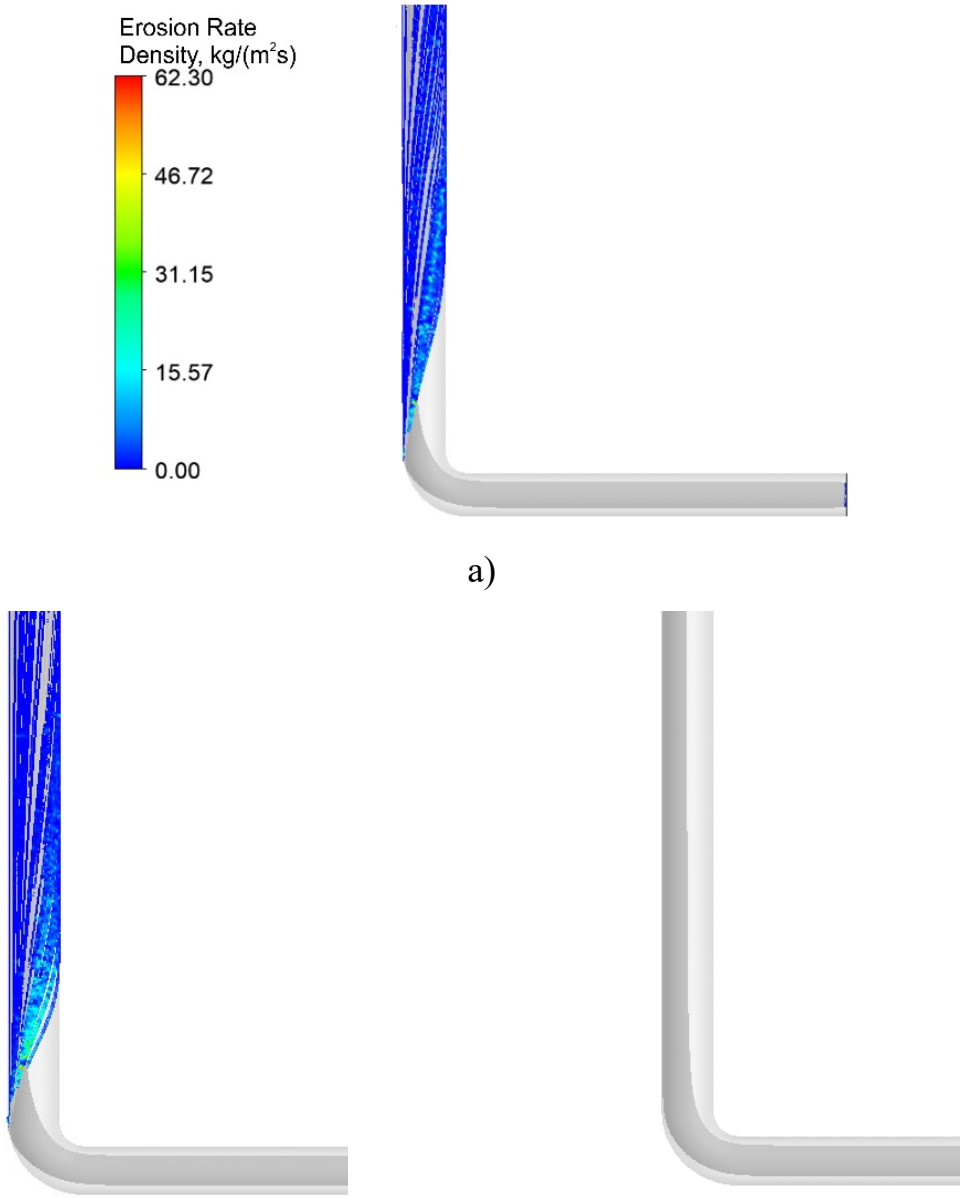


Рис. 3.1. Траєкторії частинок магнетиту в трубопроводі:

а) $Ha = 0$; б) $Ha = 50$; в) $Ha = 200$

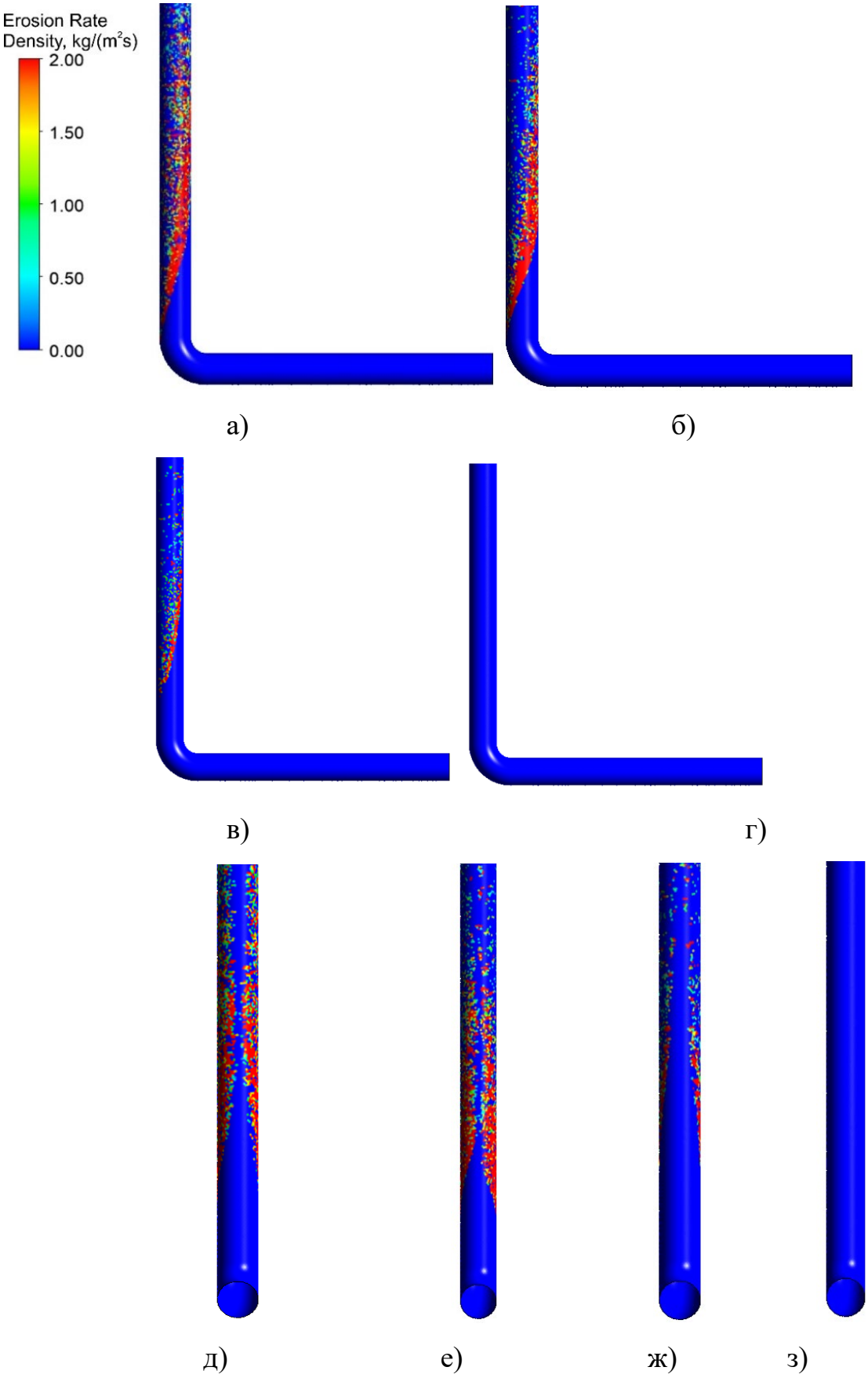


Рис.3.2. Інтенсивність зношування поверхонь трубопроводу під час течії електромагнітної рідини із різним числом Гартмана:

а), д) $Ha = 0$; б), е) $Ha = 50$; в), ж) $Ha = 100$; г), з) $Ha = 200$

Траєкторії твердих частинок пофарбовано у колір згідно їх впливу на зношення стінок трубопроводу. Для порівняння наведено три картини течії із різним числом Гартмана ($Ha = BR\sqrt{\sigma/\rho\nu}$), що ілюструє вплив магнітного поля на рух твердих частинок та рідини в цілому. B – магнітна індукція; R – радіус труби; σ – електропровідність рідини; ρ_F – густина рідини; ν_F – густина рідини.

Верифікація використовуваних математичних моделей попередньо проведена в дослідженні [17] на основі порівняння розподілів швидкості в трубопроводі з поворотом під час дії магнітного поля та без нього. Результати розрахунку показали, що модель турбулентності SST досить гарно описує течію електропровідної рідини і її можна використовувати й отримувати достовірні результати.

Для якісного очищення трубопроводів, радіаторів та інших проточних частин необхідний якісний розподіл магнітної рідини за перетином трубопроводу для гарного проникнення магнітних частинок у забруднення. Це необхідно для того, щоб під дією магнітного поля елементи забруднення добре вийшли з проточних частин разом з магнітною рідиною. Проаналізувавши рис. 1 можна дійти до висновку, що магнітні частинки електропровідної рідини досить гарно заповнюють границі перетину, якщо є поворот потоку, як це відбувається у радіаторах. Дуже наглядно це можна бачити за результатами розрахунку зношення трубопроводу під час течії електропровідної рідини з магнітним полем та без (Рис. 3.1 та 3.2).

Збільшення інтенсивності магнітного поля приводить до зміни епюри швидкості [117] електропровідної рідини, що заважає частинкам магнетиту проникнути близько до стінки, що можна бачити на рис. 3.2 г, 3.2 з. З іншої сторони збільшення потужності магнітного поля може дозволити відірвати забруднення від стінок трубопроводу разом з твердою частинкою магнетиту, що можна бачити на рисунках. Крім того, математичне моделювання на основі числових методів у тривимірній постановці дозволяє проаналізувати необхідні та достатні параметри магнітного поля для повного очищення трубопроводів від забруднень.

Складніша щодо можливості очищення ситуація в трубопроводах з раптовим розширенням (Рис.3.3). Тверді частинки разом з рідиною відриваються від стінок та практично не потрапляють у пристінні зони.

Більша можливість потрапити якнайшвидше до стінок трубопроводу має течія електропровідної рідини під дією вектору магнітної індукції $\bar{B}(0, B, 0)$, тобто, якщо існує магнітне поле з вектором магнітної індукції з проекцією в y -напрямку (Рис. 3.3в).

Для моделювання течії електропровідної рідини в радіаторі з оцінкою можливості його очищення від забруднення була створена розрахункова модель декількох поворотів трубопроводу на 180° (Рис. 3.4).

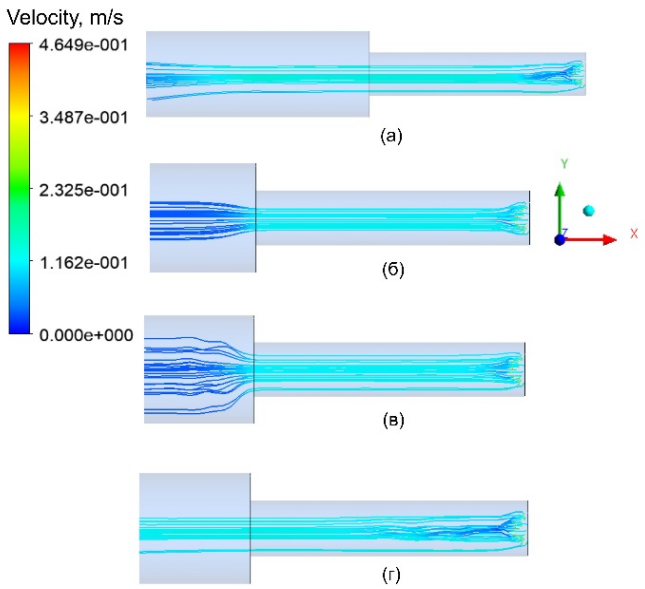
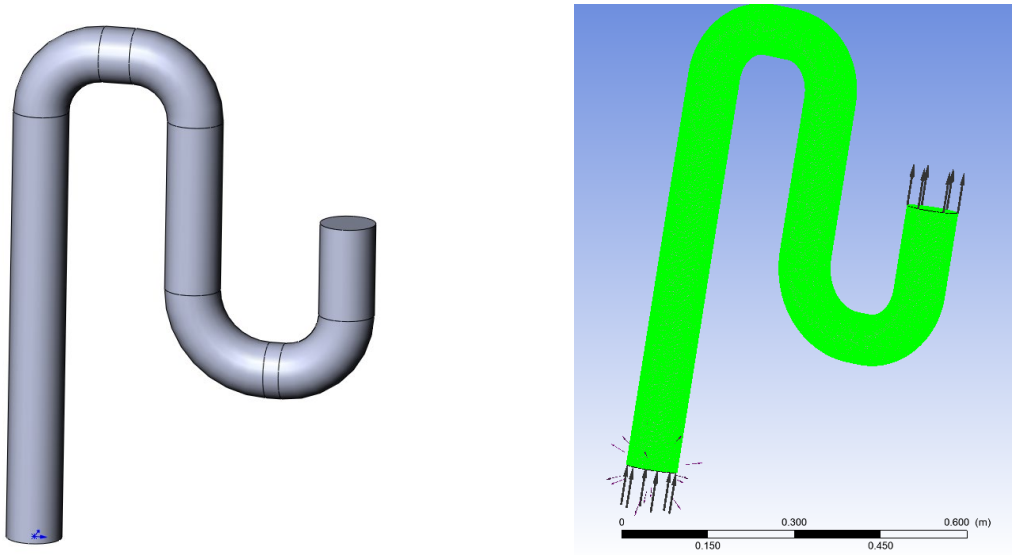
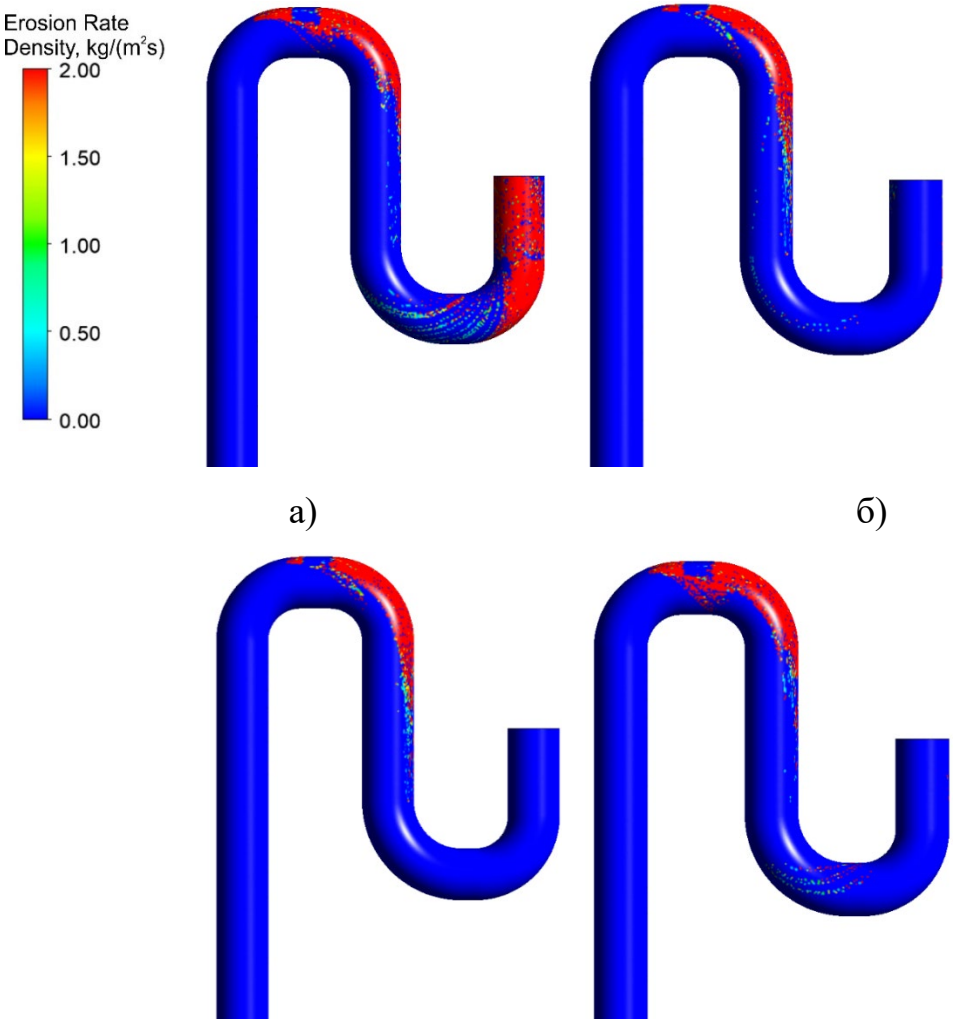


Рис. 3.3. Траєкторії частинок магнетиту в трубопроводі з раптовим розширенням: а) $Ha = 0$; б) $Ha = 250$ z -напрямок; в) $Ha = 250$ y -напрямок; г) $Ha = 50$ x -напрямок



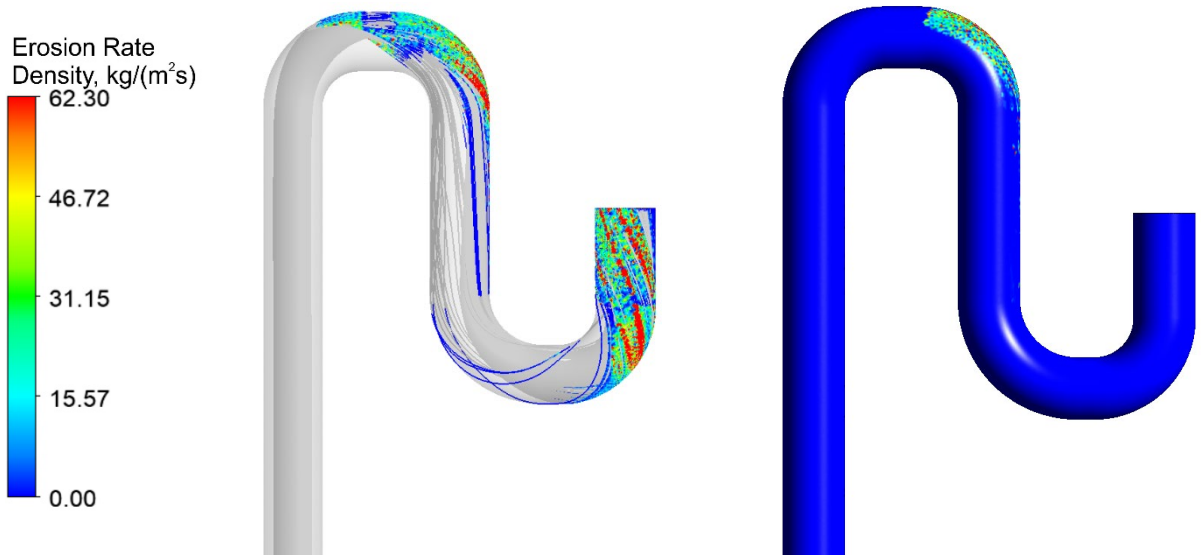
(а) (б)

Рис. 3. 4. Твердотільна (а) та розрахункова сіткова (б) моделі для моделювання руху електропровідної рідини радіатором.



а) б)

в) г)



д) е)

Рис. 3.5. Інтенсивність зношування поверхонь трубопроводу під час течії електромагнітної рідини із різним числом Гартмана радіатором: а), д) $Ha = 0$; б) $Ha = 100$ x -напрямок; в) $Ha = 100$ y -напрямок; г) $Ha = 100$ z -напрямок; е) $Ha = 500$ z -напрямок .

Реальна модель радіатора не застосовувалася внаслідок великої протяжності прямолінійних ділянок, що значно ускладнило б аналіз результатів розрахунку та збільшило б необхідну кількість кінцевих об’ємів для якісного розрахунку. Результати моделювання наведено на рис.3.5.

Магнітне поле, безумовно, впливає на розподіл твердих частинок магнетиту в трубопроводі. Збільшення зношування в окремих ділянках трубопроводу пов’язане з впливом відцентрової сили, що діє на частинку під час повороту. Відсутність великих змін в параметрах зношування на рис. 3.5б, 3.5в та 3.5г пояснюється недостатнім впливом магнітного поля на електропровідну рідину, що підтверджується характеристиками зношування, що показані на рис. 3.5е. Так само як й у випадку плавного повороту на 90° відбувається зменшення зношування стінок трубопроводу зі збільшенням інтенсивності магнітного поля. Підтверджується гіпотеза, що частинки магнетиту, які є у складі магнітної рідини, розповсюджуються

трубопроводом та потрапляють практично в усі точки трубопроводу без дії магнітного поля. Включення магнітного поля дозволяє сподіватися на те, що частинки магнетиту будуть рухатися на відстані від стінок та відривати забруднення від стінок трубопроводу. Очікується, що найбільше забруднення може відкладатися саме в тих зонах де відбувається максимальне зношування трубопроводу твердими частинками внаслідок дії відцентрової сили. Таким чином, можна вважати, що частинки магнетиту будуть добре розповсюджуватися серед забруднення та сприяти очищенню стінок радіатору та трубопроводу від олійних та нафтових забруднень.

3.2. Опис та принцип роботи експериментальної установки

Відома станція для очищення системи кондиціонування, яка містить бак з промивною рідиною, магістраль подачі промивної рідини, вентиль, манометр, фільтруючий елемент, магістраль повернення промивної рідини (“MSG MS101p Станция для очистки систем автокондиционирования”, руководство по эксплуатации, https://servicems.ru/, от 15.08.2016.]) – прототип.

Недоліком розглянутої конструкції є використання ізопропилового спирту в якості промивної рідини і, як наслідок, неповне очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів системи кондиціонування від залишків мінеральної оливи (5−7%) та недостатньо висока ефективність технічного обслуговування систем кондиціонування пасажирських вагонів, неможливість переведення систем кондиціонування на інші сучасні холодоагенти, що потребують використання синтетичних олив.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищення якості очищення внутрішніх поверхонь трубопроводу системи кондиціонування від залишків мінеральної оливи, звідси підвищення ефективності технічного обслуговування системи кондиціонування пасажирських вагонів.

Поставлена задача досягається тим, що в станції для очищення системи кондиціонування пасажирського вагону, яка містить бак з промивною рідиною,

магістраль подачі промивної рідини, вентиль, манометр, насос, фільтруючий елемент, магістраль повернення промивної рідини, згідно корисної моделі, в якості промивної рідини використовують магнітну (електропровідну) рідину, при цьому станція додатково обладнана котушкою індуктивності і джерелом регулювання напруги.

Для підтвердження достовірності досліджень здійснена його експериментальна перевірка з використанням експериментального стенду рис. 3.6

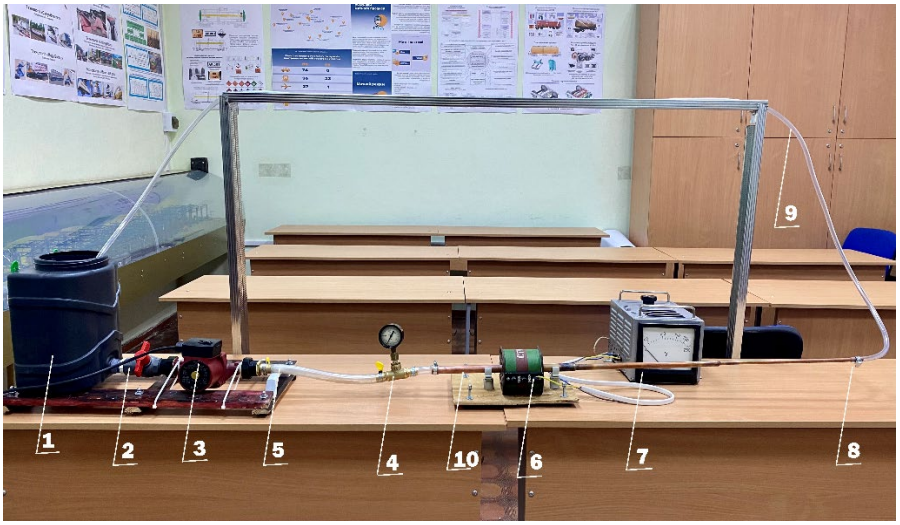


Рис. 3.6. Загальний вид стенда експериментальної установки для дослідження параметрів очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів СКП пасажирських вагонів:

де 1 – бак з магнітною (електропровідною) рідиною; 2 – вентиль; 3 – циркуляційний насос; 4 – манометр; 5 – трубопровід системи очищування; 6 – котушка індуктивності; 7 – джерело регулювання напруги; 8 – фільтруючий елемент; 9 – магістраль повернення промивної рідини; 10 – трубопровід що очищується від залишків мінеральної оливи.

3.3. Робота експериментального стенду

Станція працює наступним чином.

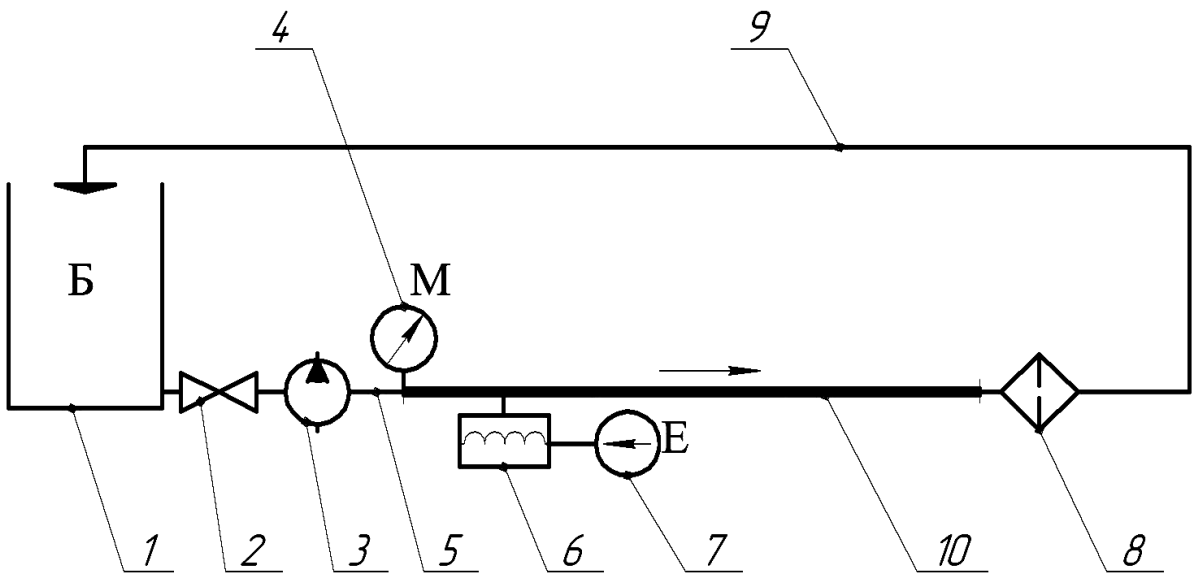


Рис. 3.7 Схема станції для очищення системи кондиціонування повітря пасажирського вагону.

На рис. 3.7 зображена станція для очищення системи кондиціонування пасажирського вагону, яка має бак з промивною магнітною (електропровідною) рідиною) 1, вентиль 2, циркуляційний насос 3, манометр 4, магістраль подачі промивної рідини 5, котушку індуктивності 6, джерело регулювання напруги 7, фільтруючий елемент 8, магістраль повернення промивної рідини 9. Станція під'єднана до трубопроводу 10, що очищується від мінеральної оливи.

В трубопровід 10 системи кондиціонування, що очищується, через магістраль подачі промивної рідини 5 з баку 1, використовуючи вентиль 2, подається магнітна (електропровідна) рідина циркуляційним насосом 3. Після заповнення трубопроводу 10 системи кондиціонування магнітною (електропровідною) рідиною контролюється робочий тиск рідини манометром 4, після чого котушкою індуктивності 6 і джерелом регулювання напруги 7 створюється електромагнітне поле в трубопроводі, внаслідок чого магнітна рідина щільно заповнює всю внутрішню поверхню трубопроводу 10. Рух промивної магнітної рідини здійснюється циркуляційним насосом 3. При цьому потік магнітної рідини реалізує процес механічного очищення внутрішньої поверхні трубопроводу 10. Після проходження потоку магнітної рідини через всю ділянку

трубопроводу 10 та його очищення, за допомогою фільтруючого елементу 8 проводиться процес фільтрації магнітної рідини від залишків мінеральної оливи.

Повернення відпрацьованої магнітної рідини здійснюється за допомогою магістралі повернення промивної рідини 9 в бак з промивною рідиною 1, при цьому кількість циклів очищення системи кондиціонування залежить від ступеня і характеру засмічення трубопроводу залишками мінеральної оливи.

Особливістю конструкції є створення електромагнітного поля в трубопроводі котушкою індуктивності 6 та джерелом регулювання напруги 7, при цьому напруга регулюється в залежності від режиму роботи станції (50−250 В), що дозволяє забезпечити щільний контакт між магнітною рідиною та внутрішньою поверхнею трубопроводу, що безумовно підвищує якість процесу очищення.

Застосування електромагнітного поля і циркуляційного насоса 3 забезпечує мінімальний обсяг використання магнітної рідини в процесі очищення.

Таким чином, щільний потік магнітної рідини на внутрішній поверхні трубопроводу поліпшує процес механічного очищення системи кондиціонування пасажирських вагонів.

Запропонована корисна модель дозволяє підвищити якість очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів кондиціонера від залишків мінеральної оливи і, в цілому, підвищити ефективність технічного обслуговування систем кондиціонування пасажирських вагонів на 30−40 % в порівнянні з існуючими, які виконують очищення залишків мінеральної оливи на 5−7%.

3.4 Висновки по розділу 3

Для якісного очищення трубопроводів, радіаторів та інших проточних частин необхідно якісне розподілення магнітної рідини по перерізу трубопроводу для хорошого проникнення магнітних частинок у забруднення. Це необхідно для того, щоб під дією магнітного поля елементи забруднення якісно були видалені з проточних частин разом із магнітною рідиною. Математичне моделювання дозволяє визначити якість заповнення твердими частинками магнетиту поперечного перерізу,

і особливо якщо є поворот потоку, як це відбувається в радіаторах. Дуже наочно це можна побачити за результатами розрахунку зносу трубопроводу при перебігу електропровідної рідини з магнітним полем і без.

Математичне моделювання дозволило підтвердити гіпотезу, що частинки магнетиту, котрі знаходяться у складі магнітної рідини, поширюються трубопроводом і потрапляють практично у всі точки трубопроводу без дії магнітного поля. Включення магнітного поля дозволяє сподіватися на те, що частинки магнетиту рухатимуться на відстані від стінок та відриватимуть забруднення від стінок трубопроводу. Очікується, що найбільше забруднення може відкладатися саме в тих зонах, де відбувається максимальне зношування трубопроводу твердими частинками внаслідок дії відцентрової сили, яку можна оцінити моделюванням течії без дорогих експериментальних досліджень. Таким чином, можна вважати, що частинки магнетиту добре поширюватимуться серед забруднення та сприятимуть очищенню стінок радіатора та трубопроводу від масляних та нафтових забруднень.

Моделювання проведено для діапазону швидкостей (від 0,1 до 3 м/с) та чисел Рейнольдса, які відповідають можливим швидкостям руху магнітної рідини в радіаторі. Визначено втрати тиску для підбору параметрів перекачування рідини, що дозволило мінімізувати експериментальні дослідження гідравлічних параметрів перекачування рідини та сконцентруватись на дослідженнях очищення.

Магнітне поле, безумовно, впливає на розподіл твердих частинок магнетиту в трубопроводі. Збільшення зношування в окремих ділянках трубопроводу пов’язане з впливом відцентрової сили, що діє на частинку під час повороту.

Магнітні частинки електропровідної рідини досить гарно заповнюють границі перетину, якщо є поворот потоку, як це відбувається у радіаторах. Збільшення інтенсивності магнітного поля приводить до зміни епюри швидкості електропровідної рідини, що заважає частинкам магнетиту проникнути близько до стінки. З іншої сторони збільшення потужності магнітного поля може дозволити відірвати забруднення від стінок трубопроводу разом з твердою частинкою магнетиту.

Складніша щодо можливості очищення ситуація в трубопроводах з раптовим розширенням. Тверді частинки разом з рідиною відриваються від стінок та практично не потрапляють у пристінні зони.

РОЗДІЛ 4 ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ СИСТЕМ КОНДИЦІЮВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

Ефективна робота холодильної установки залежить не тільки від хорошого технічного стану обладнання, а і від грамотної його експлуатації. Основним завданням при експлуатації холодильного обладнання є підтримка заданого температурного і вологісного режимів в охолоджуваних об’єктах з найменшою витратою електроенергії, води, матеріалів і мінімальним зносом машин і апаратів, а також забезпечення надійної та безпечної роботи цього обладнання.

Головним джерелом оновлення основних засобів рухомого складу та їх інвестування є амортизаційний фонд, але через кризові явища в економіці країни, невчасну індексацію вартість основних засобів, значення амортизаційного фонду як засобу відтворення рухомого складу втратило свою важливість. Це пояснюється тим, що балансова вартість основних засобів вагонного депо відстає від ринкової вартості в 3 рази, що зменшує відрахування на амортизацію та розміри коштів які включаються до валових витрат під час проведення ремонтів. Одним із заходів щодо вирішення зазначених проблем є впровадження більш ефективних методів ремонту. Підвищення економічної ефективності виробництва у вагонному депо можна досягти шляхом його спеціалізації, застосовуючи найпрогресивніші технологічні процеси ремонту.

Виробництво магнітної рідини передбачається реалізувати у безпосередній близькості від діючого виробництва з переробки відходів гірничої промисловості. Це дозволяє використовувати наявний досвід експлуатаційників при налагодженні виробництва за пропонованою схемою.

4.1 Розрахунок собівартості робіт з очищення внутрішніх поверхонь апаратів та трубопроводів СКП пасажирського вагона

Згідно з проведеним хронометражем тривалість операцій з повного очищення вентиляційних повітроводів пасажирського вагона (розбирання внутрішнього обладнання та демонтаж секцій повітроводу з становить 44,6 години (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Собівартість робіт з очищення внутрішніх поверхонь апаратів та трубопроводів СКП пасажирського вагона

№	Найменування робіт	Розряд робіт	Норма часу	Тариф, грн
	1. Робоча сила			
1.	очищення внутрішніх поверхонь апаратів та трубопроводів СКП пасажирського вагона	3	44,6	
Разом				
	премія		40%	
	Соц.страх		28,46%	
Разом з калькуляції				1467

Технічні характеристики застосовуваного обладнання наведено в табл. 4.2, 4.3 та 4.4

Табл.4.2.

Найменування параметру Технічні характеристики	Значення
Продуктивність, кг/год	60
Рід живлячого струму	змінний трифазний
Напруга мережі живлення, В	220
Споживана потужність, кВт, не більше	7
Тиск подачі МР, bar, не більше	18

Технічні характеристики установки подачі МР в установку для очищення трубопроводу табл. 4.3

Таблиця 4.3.

Найменування параметру	Значення
Рід живлячого типу	Змінний трифазний
Напруга мережі живлення, В	220
Частота мережі живлення, Гц	50
Споживана потужність, кВт,	**U**
Ємність бункера завантаження, л	10
Тиск стисненого повітря, МПа	От 0 до 12
Продуктивність установки подачі МР, кг/год	не менее 30

Час, необхідний очищення системи пасажирського вагона МР , становить 0,17 години. Потужність установки для очищення поверхонь повітроводів вагонів –0,1 кВт.

Час роботи насоса для вироблення 30 хв.

$$t = \frac{30}{0{,}367} = 0{,}0227$$

Технічні характеристики установки для очищення у табл.4.4.

Таблиця 4.4

Найменування параметра	Значення
Електроживлення	Не більше 42 В змінного струму або 100 В постійного струму
Напруга мережі живлення	380 В / 220 В, частотой 50 Гц
Потужність, кВт, не більш	од

За даними табл. 4.5, розрахуємо вартість МР, необхідної для цієї операції.

$$C_{mr} = Q_{mr} \cdot Q_e \cdot t \quad (4.1)$$

Де Q_{mr} *– расход МР л/мін;* Q_e *– расход електричної енергії;* t *– час очищування.*

Таблиця 4.5 Технико-экономические показатели МР

Найменування параметра	Значення
витрати МР, *л/мін*	1
витрати електричної енергії	1,3

Обчислимо заробітну плату працівника, зайнятого у процесі очищення системи СКП пасажирського вагон (табл. 4.6)

Таблиця 4. 6

№ п/п	Найменування робіт	Розряд робот	Норма часу на од.	Тариф, грн.	Сума, грн.
	1.Робоча сила				
1.1.	Очистка СКП пасажирського вагону з застосуванням МР	3	0,17	42,66	7,25
Разом :			0,17		7,25
Премія			40%		2,90
Разом :					11,67
Соцстрах			28,46%		3,32
Разом по калькуляції				14,99	

Технологічна собівартість цієї операції

$$С_т = С_{ве} + С_{ел.е} + С_{мр} + ЗП + С_{сн} \quad (4.2)$$

4.2 Розрахунок сумарного економічного ефекту

З урахуванням вартості базового холодильного обладнання (16 490,02 грн) та технологічної собівартості запропонованої операції, річний ефект від 1 установки на 1 вагон за 1 рік становить 16571,33 грн. Це у сукупності дає сумарний економічний ефект за весь період експлуатації (15 років) – 248,57 тис. грн. (за всіма разом запропонованими рішеннями вдосконалення для одного вагона).

Для розрахунку сумарного економічного ефекту та терміну окупності капіталовкладень можна використати типову методику розрахунку вартості техніко-економічних рішень, яка передбачає визначення оцінок чистої доданої вартості (NPV) і строку окупності запропонованих заходів. Для розрахунків використовується ставка дисконту, яка визначалась експертним шляхом з урахуванням індексу інфляції та середньорічної банківської ставки. Вона становить 20,9%. Дані є прогнозованими і можуть дещо змінитися при покращенні або погіршенні економічної ситуації в країні.

Розрахунки економічної ефективності представлені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Розрахунок економічної ефективності запропонованих заходів

Рік реалізації	Інвестиції	Вартість 1 установки на 1 вагон з монтажем, грн.	Кількість вагонів (установка), шт.	Витрати на установку, грн.	Кількість вагонів (експлуатація), шт.	Річний ефект від 1 установки на 1 вагоні, грн.	Загальний річний ефект, грн.	Дисконтна ставка	Майбутня вартість (FV) по роках, грн.	Теперішня вартість (PV) по роках, грн.	Накопичена теперішня вартість, грн.	Чиста приведена вартість (NPV), грн.
0	**295000**							0,209				
1		6033,36	12	72400,32					0	0	0	-295000
2		6033,36	20	120667,2	12	16571,33	198856		78188,8	53492,38	53492,38	-241507,6
3		6033,36	39	235301	20	16571,33	331426,7		96125,63	54395,16	107887,5	-187112,5
4		6033,36	39	235301	39	16571,33	646282		410981	192360,8	300248,3	5248,312
5		6033,36	39	235301	39	16571,33	646282		410981	159107,3	459355,6	164355,6
6		6033,36	39	235301	39	16571,33	646282		410981	131602,4	590958,1	295958,1
7		6033,36	39	235301	39	16571,33	646282		410981	108852,3	699810,4	404810,4
8		6033,36	39	235301	39	16571,33	646282		410981	90034,98	789845,4	494845,4
9		6033,36	39	235301	39	16571,33	646282		410981	74470,62	864316	569316
10		6033,36	39	235301	39	16571,33	646282		410981	61596,88	925912,9	630912,9
11		6033,36	39	235301	39	16571,33	646282		410981	50948,62	976861,5	681861,5
12		6033,36	39	235301	39	16571,33	646282		410981	42141,12	1019003	724002,6
13		6033,36	39	235301	39	16571,33	646282		410981	34856,18	1053859	758858,8
14		6033,36	39	235301	39	16571,33	646282		410981	28830,59	1082689	787689,4
15		6033,36		0	39	16571,33	646282		646282	37499,68	1120189	825189
Сума, грн			**500**	**3016680**	**500**		**8285667**		**5341387**	**1120189**	**10044428**	**5619428**

Капітальні інвестиції становлять 295 тис. грн. і вкладаються в нульовому році перед початком встановлення відповідних установок на вагони. Вартість 1 установки з монтажем на 1 вагон дорівнює 6033,36 грн. Передбачається, що в перший рік модернізовані СКП будуть встановлені на 12 вагонах, в 2 рік – на 20 вагонах, решта – по 39 вагонів на рік. Річний економічний ефект від використання запропонованих СКП на вагонах очікується на наступний рік від їх встановлення. Загальний річний ефект розраховується шляхом множення кількості вагонів, на яких встановлено СКП, та річного ефекту від 1 установки на 1 вагоні. Сумарний економічний ефект за весь період експлуатації (15 років) за всіма разом запропонованими рішеннями вдосконалення для одного вагона становить 248,57 тис. грн.

Майбутня вартість (FV) по роках розрахована як різниця між загальним річним ефектом і витратами на установку. Для приведення її у поточні ціни були здійснені розрахунки теперішньої вартості (PV) по формулі:

$$PV = \frac{FV}{(1+r)^n} \tag{4.3}$$

де r – дисконтна ставка (0,209), n – кількість років (15 років).

Економічний ефект розрахований на 15 років, виходячи з того, що модернізація проводиться при виконанні капітальновідновлюваного ремонту з продовженням терміну служби. У розрахунках економічний ефект від використання модернізованих СКП пасажирського вагона залізничного транспорту досягається за рахунок підвищення енергоефективності виробничої діяльності.

Чиста теперішня вартість (NPV) представляє собою різницю між теперішньою вартістю грошових надходжень та теперішньою вартістю грошових потоків за певний період часу. Виходячи з розрахунків, очевидно, що термін окупності капіталовкладень (за всіма разом запропонованими рішеннями з вдосконалення) складає 4 роки (рис. 4.1): наприкінці 4 року планується отримання економічного ефекту у розмірі 5,2 тис. грн.

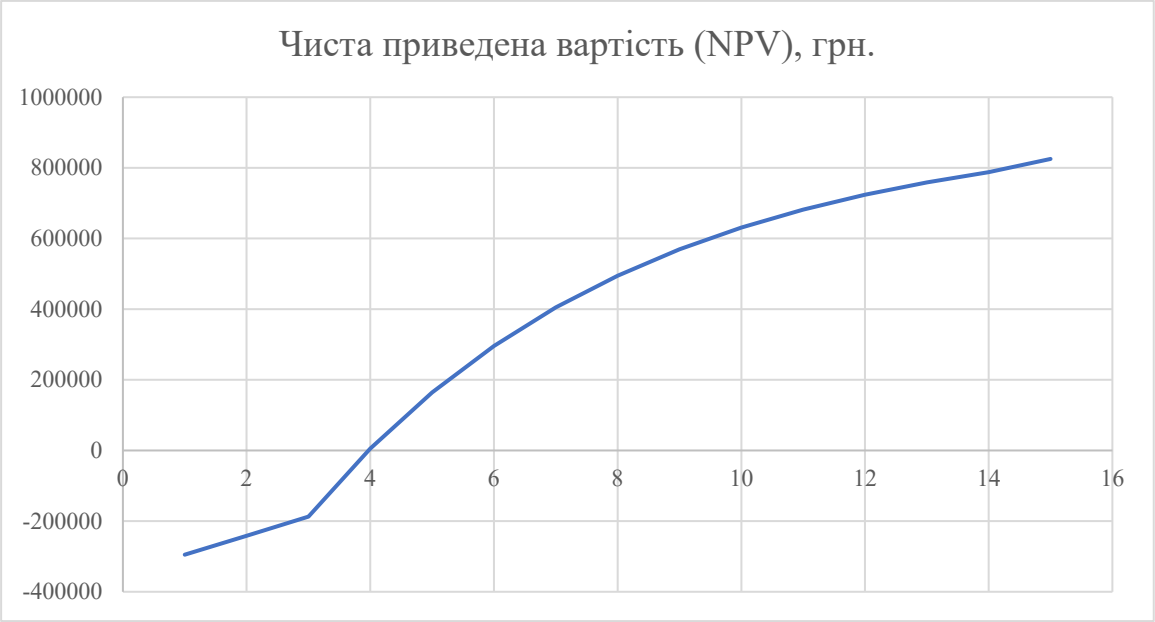


Рис. 4.1. Термін окупності проєкту

Сумарний економічний ефект за весь період експлуатації (15 років) за всіма разом запропонованими рішеннями вдосконалення для одного вагона становить 248,57 тис. грн, а для експлуатаційного парку, який потрібно перевести станом на 2021 рік становить 500 пасажирських вагонів – на загальну суму 5,619 млн. грн.

4.3 Висновки по розділу 4

З урахуванням вартості базового холодильного обладнання (16 490,02 грн) та технологічної собівартості запропонованої операції, річний ефект від 1 установки на 1 вагон за 1 рік становить 16571,33 грн. Це у сукупності дає сумарний економічний ефект за весь період експлуатації (15 років) –248,57 тис. грн. (за всіма разом запропонованими рішеннями вдосконалення для одного вагона).

Вартість 1 установки з монтажем на 1 вагон дорівнює 6033,36 грн. Передбачається, що в перший рік модернізовані СКП будуть встановлені на 12

вагонах, в 2 рік – на 20 вагонах, решта – по 39 вагонів на рік. Річний економічний ефект від використання запропонованих СКП на вагонах очікується на наступний рік від їх встановлення. Загальний річний ефект розраховується шляхом множення кількості вагонів, на яких встановлено СКП, та річного ефекту від 1 установки на 1 вагоні. Сумарний економічний ефект за весь період експлуатації (15 років) за всіма разом запропонованими рішеннями вдосконалення для одного вагона становить 248,57 тис. грн.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень сформульовано такі висновки:

1. Аналіз експлуатації систем кондиціонування пасажирських вагонів показує, що головним недоліком існуючої технології обслуговування системи кондиціонування є неповне очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів від залишків мінеральної оливи та, неможливість переведення систем кондиціонування на інші сучасні холодоагенти, що потребують використання синтетичних олив. Крім того, у пасажирському вагонному парку є вагони з СКП, що оснащенні холодильним обладнанням, яке розраховане на використання холодоагентів фреон-12 (R12), фреон-22 (R22). Відповідно до рішень Монреальського протоколу та інших міжнародних домовленостей, що до речовин, які руйнують озоновий шар холодоагенти R12, R22 визнані озоноруйнуючими речовинами, їх виробництво і застосування в теперішній час заборонено. Тому, необхідне очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів та холодильного обладнання СКП від залишків мінеральних олив та забруднень при заміні (ретрофіті) R12, R22 на озонобезпечні альтернативні холодоагенти. В установках, що працюють на хладоні R12, R22, у випарнику затопленого типу олива накопичується, і збільшується концентрація її в розчині. В результаті підвищується температура кипіння і збільшується в'язкість розчину (в порівнянні з температурою кипіння і в'язкістю чистого фреону), що погіршує теплообмін.

2. На основі чисельного моделювання течії електропровідної рідини в коліні трубопроводу за допомогою вирішення рівнянь Нав’є-Стоксу осереднених за Рейнольдсом визначено залежності втрат тиску в плавному повороті. Магнітне поле має значний вплив на епюру швидкості до повороту та після нього в коліні внаслідок того, що орієнтація вектору 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.

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 вектору магнітної індукції. Максимальні значення опору мають місце коли вектор магнітної індукції направлено вздовж однієї з осей трубопроводу коліна.

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

3. Математичне моделювання дозволило підтвердити гіпотезу, що частинки магнетиту, котрі знаходяться у складі магнітної рідини, поширюються трубопроводом і потрапляють практично у всі точки трубопроводу без дії магнітного поля. Включення магнітного поля дозволяє сподіватися на те, що частинки магнетиту рухатимуться на відстані від стінок та відриватимуть забруднення від стінок трубопроводу. Таким чином, можна вважати, що частинки магнетиту будуть добре поширюватися серед забруднення та сприяти очищенню стінок радіатора та трубопроводу від масляних та інших забруднень. Моделювання проведено для спектра швидкостей (від 0,1 до 3 м/с) та чисел Рейнольдса, які відповідають можливим швидкостям руху магнітної води в радіаторі. Визначено втрати тиску для підбору параметрів перекачування рідини, що дозволило мінімізувати експериментальні дослідження гідравлічних параметрів перекачування рідини та сконцентруватись на дослідженнях очищення.

4. Визначена економічна ефективність процесу очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів систем кондиціонування повітря пасажирських вагонів від залишків мінеральної оливи при використанні електромагнітного поля та магнітної рідини, яка склала 248,57 тис. грн/рік. Підвищення ефективності процесу очищення холодильного обладнання

пасажирських вагонів, в порівнянні з існуючою технологією, склало 34,5%, що засвідчено актами впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мартинов І. Е. Холодильне обладнання вагонів : навч. посібник / І. Е. Мартинов, В. М. Іщенко, Н. С. Брайтковська [та ін.]. – Харків : УкрДАЗТ, 2013. – 140 с.

2. Бабакин Б. С. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе: справочное руководство / Б. С. Бабакин, В. И. Стефанчук, Е. Е. Ковтунов. – М. : Колос, 2000. – 160 с.

3. Жердев А. А. Диметиловый эфир – рабочее тело холодильных машин / А. А. Жердев, С. Д. Глухов, А. В. Шарабурин // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2002. – Спец. вып.– С. 55–62.

4. Железный В. П. Оценка перспектив применения изобутана в бытовой холодильной технике с помощью эколого–термоэкономического метода / В. П. Железный, О. Я. Хлиева, Н. П. Быковец // Холодильная техника. – 2001. – № 9. – С. 11–13.

5. Семенов А. П. Перспективные методы очистки воздуховодов системы вентиляции вагонов в пассажирских поездах / А. П. Семенов // Межвузовский сборник трудов молодых учёных, аспирантов и студентов. – Омск, 2008. – Вып. 5, Ч. 1. – С. 57-61.

6. Мотовилова О. С. Совершенствование установок кондиционирования воздуха в вагонах / О. С. Мотовилова, А. Ю. Громов , А. П. Семенов // Безопасность движения поездов : матер. IX науч.–практ. конф. – Москва, 2008.

7. Chikazumi S. / S. Chikazumi, K. Suzuki // Jour. Phys. Soc. Jpn. – 1955. – № 10.–P. 523.

8. Такетоми С. Магнитные жидкости / С. Такетоми, С. Тикадзуми ; пер. с японск. – М. : Мир, 1993. – 272 с.

9. Rosensweig R. E. / R. E. Rosensweig, I. W. Nestor, R. S. Timmings // Am. Ins. Chem. – Int. Chem. End. Sympo. Series. – 1965. – № 5. – P. 104.

10. Cowley M. D. / M. D. Cowley, R. E. Rosensweig // Jour. Fluid Mech. – 1967. – № 30, part 4. – P. 671.

11. Rosensweig R. E. / R. E. Rosensweig, G. E. Miskolery, F. D. Ezekiel // Machine Design March. – 1968. – № 28.

12. Furubayashi T. / T. Furubayashi, I. Nakatani, N. Salgusa // Jour. Phys. Soc. Jpn. – 1987. – № 56. – P. 1855.

13. Sano K. / K. Sano, M. Doi // Jour. Phys. Soc. Jpn. – 1983. – № 52. – P. 2810.

14. I. Nakatani, T. Furubayashi, T. Takahashi, H. Hanaoka // Jour. Mag. Mag. Mat. – 1987. – № 65. – P. 261.

15. K. Kimoto, Y. Kamiya, M. Nonoyama, R. Ueda // Jpn. Journ. Appl. Phys. – 1963. – № 2. – P. 702.

16. Elmore W. C. // Jour. Phys. Rev. – 1938. – Vol. 54. – P. 309.

17. I. Nakatani, T. Furubayashi, T. Takahashi, H. Hanaoka // Jour. Mag. Mag. Mat. – 1985. – № 65. – P. 255.

18. Абрамзон А. А. Поверхностно–активные вещества. Свойства и применение / А. А. Абрамзон. – Л. : Химия, 1975.

19. Такетоми С. Магнитные жидкости / С. Такетоми, С. Тикадзуми ; пер. с японск. – М. : Мир, 1993. – 272 с.

20. Орлов Д. В. Магнитные жидкости / Д. В. Орлов, Ю. О. Михалев. – М. : Машиностроение, 1993. – 272 с.

21. Берковский Б. М. Магнитные жидкости / Б. М. Берковский, В. Ф. Медведев, М. С. Краков. – М. : Химия, 1989. – 240 с.

22. Furubayashi T. / T. Furubayashi, I. Nakatani, N. Salgusa // Jour. Phys. Soc. Jpn. – 1987. – № 56. – P. 1855.

23. Sano K. / K. Sano, M. Doi // Jour. Phys. Soc. Jpn. – 1983. – № 52. – P. 2810.

24. Калаев С.З. Направленное изменение свойств минералов и пород техногенных месторождений для получения магнитных жидкостей, обеспечивающих решение инженерных задач добычи и переработки полезных ископаемых: дис….д-ра техн.наук: спец. 25.00.20 / С.З. Калаев; Тульський государственный университет. – Тула, 2015. – 347с.

25. K. Kimoto, Y. Kamiya, M. Nonoyama, R. Ueda // Jpn. Journ. Appl. Phys. – 1963. – № 2. – P. 702.

26. Elmore W. C. // Jour. Phys. Rev. – 1938. – Vol. 54. – P. 309.

27. I. Nakatani, T. Furubayashi, T. Takahashi, H. Hanaoka // Jour. Mag. Mag. Mat. – 1985. – № 65. – P. 255.

28. Новые подходы получения магнитных жидкостей и магнитореологических суспензий технического назначения / Ф. С. Байбуртский [и др.] // 11-я Междунар. Плесская конф. по магнитным жидкостям : сб. науч. тр. (Плес, сент. 2004 г.). – 2004. – С. 38–44.

29. Такетоми С. Магнитные жидкости / С. Такетоми, С. Тикадзуми ; пер. с англ.; под ред. В. Е. Фертмана. – М.: Мир, 1994. – 275 с.

30. Сизов А. П. Применение магнитных жидкостей в смазках / А. П. Сизов, Е. А. Топорова // 11-я Междунар. Плесская конф. по магнитным жидкостям : сб. науч. тр. (Плес, сент. 2004 г.). – 2004. – С. 296–299.

31. Установка для испытаний комбинированных герметизаторов с магнитной жидкостью / А. М. Баусов, М. С. Сайкин, И. В. Семенов, А. Н. Шевяков // 13-я Междунар. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям : сб. науч. тр. (Плес, сент. 2008 г.). – 2008. – С. 375–380.

32. Виноградов А. Н. О совершенствовании конструкции комбинированных магнитожидкостных герметизаторов, предназначенных для замены бесконтактных уплотнений подшипниковых узлов электродвигателей / А. Н. Виноградов, А. В. Радионов, А. В. Казакуца // 13-я Междунар. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям : сб. науч. тр. (Плес, сент. 2008 г.). – 2008. – С. 419–428.

33. Rosenszveig R. E. Buoyancy and Stable Levitation of a Magnetic Body immersed in a Magnetizable Fluid / R. E. Rosensweig // Nature. – 1966. – Vol. 210, № 5036. – P. 613–614.

34. А. с. 875163. Магнитожидкостное уплотнение / А. П. Сизов, Ю. И. Козлов, В. А. Силаев. – № ; заявл. 00.00.81 ; опубл. 00.00.81, Бюл. № 39. – с.

35. А. с. 516861. Ферромагнитная жидкость для магнитожидкостных уплотнений / Д. В. Орлов, В. Г. Курбатов, В. А. Силаев. – № ; заявл. 00.00.84 ; опубл. 00.00.84, Бюл. № 17. – с.

36. Сизов А. П. Перспективы применения магнитных жидкостей в смазочных композициях / А. П. Сизов, Е. А. Топорова // Магнитные жидкости в ИГЭУ / под ред. Ю. Я. Щелыкалова. – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 2004. – 144 с.

37. Подгорков В. В. Использование магнитных жидкостей в качестве смазок и технологических сред / В. В. Подгорков // Тезисы докладов 6-й Всесоюзной конференции по магнитным жидкостям (Плес, 13–15 мая 1991 г.). – М., 1991. – 182 с.

38. Сизов А. П. Применение комбинированных магнитожидкостных уплотнений в подшипниковых узлах машин / А. П. Сизов, В. В. Подгорков // 7–я Междунар. Плесская конф. по магнитным жидкостям (Плес, 10–12 сент. 1996 г.) : тезисы докладов. – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 1996. – С.

39. Исследование возможности применения магнитожидкостных уплотнений для герметизации коленвала двигателей внутреннего сгорания / М. С. Сайкин, С. Г. Лысенков, Ю. О. Михалев, Л. А. Бобко, С. И. Новикова // Состояние и перспективы развития электротехнологии (VIII Бенардосовские чтения), 4–6 июня, 1997 г. : матер. междунар. науч.–техн. конф. – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 1997. – С.115.

40. Михалев Ю. О. Новые магнитожидкостные уплотнения для ферментеров / Ю. О. Михалев, С. Г. Лысенков // 11–я Междунар. Плесская конф. по магнитным жидкостям : сб. науч. тр. (Плес, сент. 2004 г.). – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 2004. – С. 289–294.

41. Щелыкалов Ю. Я. Принципы формирования рабочей зоны магнитожидкостного уплотнения нового поколения / Ю. Я. Щелыкалов, С. М. Перминов, М. С. Перминов // 11–я Междунар. Плесская конф. по магнитным жидкостям : сб. науч. тр. (Плес, сент. 2004 г.). – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 2004. – С. 365–371.

42. Сизов А. П. К разработке термоуправляемого магнитожидкостного уплотнения / А. П. Сизов, Е. В. Сергеев, Д. Г. Снегирев // 13–я Междунар. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям : сб. науч. тр. (Плес, сент. 2008 г.). – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 2008. – С. 380–383.

43. Дворчик С. Е. Использование магнитных жидкостей для очистки воды от нефтепродуктов / С. Е. Дворчик, С. Ю. Реуцкий, А. Я. Свижер // Химия и технология воды. – 1992. – Т. 14, № 9. – С. 706–712.

44. J. C. Bacri, D. Salin, R. Massart // J. Phys. Lett. – 1984. – Vol. 45, № 11. – P. 415–420.

45. I. Nakatani, T. Furubayashi, T. Takahashi, H. Hanaoka // J. Mag. Mag. Mat. – 1987. – Vol. 65, № 283. – P. 261–264.

46. Филиппов В. А. Анализ способов классификации немагнитных материалов по плотности / В. А. Филиппов, Ю. И. Страдомский // 13–я Междунар. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям : сб. науч. тр. (Плес, сент. 2008 г.). – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 2008. – С. 434–439.

47. Пушкарев В. В. Очистка маслосодержащих сточных вод / В. В. Пушкарев, А. Г. Южанинов, С. К. Мэн. – М. : Металлургия, 1980. – 200 с.

48. Покровский В. Н. Очистка сточных вод тепловых электростанций / В. Н. Покровский, Е. П. Аракчеев. – М. : Энергия, 1980. – 256 с.

49. Жуков А. И. Методы очистки производственных сточных вод : справ. пособие / А. И. Жуков, И. Л Монгайт, И. Д. Родзиллер ; под общ. ред. А. И. Жукова. – М. : Стройиздат, 1977. – 204 с.

50. Booker N. A. Sewage clarification with magnetite particles / N. A. Booker, D. Keir, A. Priestley, C. D. Rithcie // Water Sci. Technol. – 1991. – 23 (7–9). – P. 1703–1712.

51. Sing K. S. Technology profile / K. S. Sing // Ground water monitor. – 1994. – P. 60–76.

52. Safarik I. Sorption of water soluble organic dyes on magnetic poly / I. Safarik, M. Safarikova, V. Buricova // Collect. Czech. Chem. Comn. – 1995. – № 60. – P. 1448–1456.

53. Oil spill remediation using magnetic particles / J. D. Orbell, L. Godhino, S. W. Bigger, T. M. Nguyen // J. Chem. Educ. – 1997. – № 74. – P. 1446.

54. Морозов Н. А. Объемная очистка воды от нефтеродуктов / Н. А. Морозов, Ю. И. Страдомский // 13–я Междунар. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям : сб. науч. тр. (Плес, 9–12 сент. 2008 г.). – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 2008. – С. 276–280.

55. Шлиомис М. И. Эффективная вязкость магнитных суспензий / М. И. Шлиомис // ЖЭТФ. – 1971. – Т. 61. – Вып. 6. – С. 2411–2418.

56. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика / Р. Розенцвейг. – М. : Мир, 1989. – 467 с.

57. Суязов В. М. О нессиметричной модели вязкой электромагнитной жидкости / В. М. Суязов // ЖЭТФ. – 1970. – № 2. – С.12–20.

58. . Суязов В. М. Движение ферросуспензий во вращающихся однородных магнитных полях / В. М. Суязов // Магнитная гидродинамика. – 1976. – № 4. – С. 3–10.

59. Баштовой В. Г. Ассиметричная модель магнитной жидкости с учетом конечной анизотропии ферромагнитных частиц / В. Г. Баштовой, Б. Э. Кашевский // Магнитная гидродинамика. – 1976. – № 4. – С. 24–32.

60. Шлиомис М. И. Магнитные жидкости / М. И. Шлиомис // УФН. – 1974. – Т. 112. – Вып. 3. – С. 427–458.

61. Блум М. А. К кинетике намагничивания суспензий ферромагнитных частиц / М. А. Блум, Ю. Л. Райхер, М. И. Шлиомис // ЖЭТФ. – 1973. – Т. 65. – № 1. – С. 834–840.

62. Майоров М. М. Экспериментальное исследование магнитной проницаемости феррожидкости в переменном магнитном поле / М. М. Майоров // Магнитная гидродинамика. – 1979. – № 2. – С. 21–26.

63. Fannin P. C. On the analysis of complex susceptibility data of ferrofluids / P. C. Fannin, B. K. Scaife, S. W. Charles // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1988. – Vol. 21. – № 6. – P. 1035–1036.

64. Агабекян Э. М. Высокочастотная магнитная восприимчивость и времена релаксации магнитной жидкости / Э. М. Агабекян, А. Г. Иванов, В. В. Кирюшин, В. А. Налетова // Магнитная гидродинамика. – 1986. – № 2. – С. 65–72.

65. Цеберс А. О. Численные эксперименты по моделированию вращательного броуновского движения частицы ферромагнетика в поле / А. О. Цеберс // Магнитная гидродинамика. – 1984. – № 4. – С. 17–22.

66. . Блум Э. Я. Экспериментальное исследование дисперсии магнитной восприимчивости коллоида магнитожестких частиц в зависимости от внешнего магнитного поля / Э. Я. Блум, М. М. Майоров, Б. Л. Никоару, А. О. Цеберс // Магнитная гидродинамика. – 1987. – № 1. – С. 53–57.

67. Лахтина Е. В. Дисперсия магнитной восприимчивости и микроструктура магнитной жидкости / Е. В. Лахтина, А. Ф. Пшеничников // Коллоидный журнал. – 2006. – Т. 68. – № 3. – С. 327–337.

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

69. Gedik E. CFD simulation of magnetohydrodynamic flow of a liquid-metal galinstan fluid in circular pipes / E. Gedik, H. Kurt, Z. Recebli // Fluid Dynamics and Materials Processing. – 2013. – Vol. 9, № 1. – P. 23–33.

70. Statistical analysis of MHD convective ferro-nanofluid flow through an inclined channel with hall current, heat source and soret effect / A.S. Sabu, Alphonsa Mathew, T.S. Neethu, K. Anil George // Thermal Science and Engineering Progress. – 2021. – Vol. 22. – Article 100816. – DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100816.

71. Nijhawan P. A Proposed Hybrid Model for Electric Power Generation: A Case Study of Rajasthan, India / P. Nijhawan, M. K. Singla, J. Gupta // IETE Journal of Research. – 2021. – P. 1–11. – DOI : 10.1080/03772063.2021.1878940 .

72. Attia H. Circular pipe MHD flow of a dusty Bingham fluid / Attia Hazem, Ahmed Mohamed // Journal of Applied Science and Engineering. – 2005. – Vol. 8, Iss. 4. – P. 257–265. – DOI : 10.6180/jase.2005.8.4.01.

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

74. Верификация расчетов течений в вихрекамерных устройствах / Д. А. Сёмин, А. С. Роговой, А. Н. Левашов, Я. Н. Левашов // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Машинобудування. – 2016. – № 2 (77). – С. 71–78.

75. Hartmann J. Hg-Dynamics I. Theory of the Laminar Flow of an Electrically Conductive Liquid in a Homogeneous Magnetic Field. – Copenhagen, 1937. – XV, 6. – P. 1–28.

76. Davidson P. A. Magnetohydrodynamics in materials processing / P. A. Davidson // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1999. – Vol. 31, Iss. 1. – P. 273–300.

77. Experimental study of MHD effects on turbulent flow of Flibe simulant fluid in circular pipe / J. Takeuchi, S. I. Satake, N. B. Morley, T. Kunugi, T. Yokomine, M. A. Abdou // Fusion Engineering and Design. – 2008. – Vol. 83, Iss. 7-9. – P. 1082–1086. – DOI : 10.1016/j.fusengdes.2008.08.050.

78. Zhang X. Experimental investigations on liquid metal MHD turbulent flows through a circular pipe with a conductive wall / X. Zhang, C. Pan, Z. Xu // Fusion Engineering and Design. – 2017. – Vol. 125. – P. 647–652. – DOI : 10.1016/j.fusengdes.2017.04.087.

79. Rogovyi A. Verification of fluid flow calculations in vortex chamber superchargers / A. Rogovyi // Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. – Харьков, 2016. – Вып. 39. – С. 39–46. – Режим доступа : http://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/handle123456789/1922.

80. Tavangar S. CFD simulation for secondary breakup of coal–water slurry drops using OpenFOAM / S. Tavangar, S. H. Hashemabadi, A. Saberimoghadam // Fuel Processing Technology. – 2015. – Vol. 132. – P.153–163. – DOI : 10.1016/j.fuproc.2014.12.037

81. Increasing the efficiency of highly concentrated coal–water fuel based on the simulation of non–Newtonian fluid flow / N. Chernetskaya-Beletskaya, A. Rogovyi, I. Baranov, A. Krut, M. Miroshnikova, N. Bragin // In MATEC Web of Conferences, 2019. – 2019. – Vol. 294. – Article № 01009. – DOI : 10.1051/matecconf/201929401009.

82. Rogovyi A., Korohodskyi V., Medvediev Ye. Influence of Bingham fluid viscosity on energy performances of a vortex chamber pump / Rogovyi A., Korohodskyi V., Medvediev Ye. // Energy. – 2021. – Vol. 218. – Article № 119432. – DOI : 10.1016/j.energy.2020.119432.

83. AIAA guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations (AIAA G-077-1998(2002)) / American Institute of Aeronautics and Astronautics : site. – Electron. text. data. – Mode of access : https://arc.aiaa.org/doi/book/10.2514/4.472855. – Title from the screen. – Accessed 02.12.2021.

84. Сьомін Д. О. Вихорокамерні нагнітачі : монограф. / Д. О. Сьомін, А. С. Роговий. – Харків : ФОП Мезіна В.В. – 2017. – 204 с.

85. Widlund O. Implementation of MHD model equations in CFX 4.3 : [technical report] [Electronic resource] / Ola Widlund ; Royal Institute of Technology, Fax´en Laboratory. – Stockholm, 2000. – Electron. text. data. – Mode of access : http://ola.widlund.free.fr/doc/TRITA_CFX.pdf. – Title from the screen. – Accessed 02.12.2021.

86. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа : учеб. для вузов / Л. Г. Лойцянский. – 7-е изд., испр. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.

87. Роговий А. С. Розробка теорії та методів розрахунку вихорокамерних нагнітачів : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.05.17 / А. С. Роговий ; Харківський нац. автомобільно-дорожній ун-т. – Харків, 2017. – 364 с.

88. Математична модель просторової тривимірної течії водовугільного палива / Н. Б. Чернецька-Білецька, А. С. Роговий, І. О. Баранов, М. В. Мірошникова // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2018. – №1 (242). – С. 159–164.

89. Гарбарук А. В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений : учеб. пособие / А. В. Гарбарук, М. Х. Стрелец, М. Л. Шур. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.

90. Вихрові виконавчі пристрої : В 2–х частинах. Ч.1 Однорідні робочі середовища : монографія / Д. О. Сьомін, В. О. Павлюченко, Я. І. Мальцев, С. В. Войцеховський, А. С. Роговий, Л. В. Дмитрієнко, М. О. Мальцева. – Луганськ : вид-во СНУ ім. В.Даля, 2009. – 256 с.

91. Ansys CFX–Solver Theory Guide. Release 2019 R3. – Canonsburg : ANSYS, 2019.

92. Launder B. E. The numerical computation of turbulent flows / B. E. Launder, D. B. Spalding // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1974. –Vol. 3, Iss. 2. – P. 269–289. – DOI : 10.1016/0045-7825(74)90029-2

93. The numerical modeling of melt flow and MHD instabilities in an aluminum reduction cell / H. Zhang, J. Li, Z. Wang, Y. Xu, Y. Lai // JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 2010. – 62(11). – P. 26–31. – DOI : 10.1007/s11837-010-0163-y.

94. Matyushenko A. A. Criteria of computational grid generation for turbulence models taking into account laminar–turbulent transition / A. A. Matyushenko, A. S. Stabnikov, A. V. Garbaruk // In Journal of Physics : Conference Series. – 2019. – Vol. 1400, Iss. 7. – Article № 077047. – DOI : 10.1088/1742-6596/1400/7/077047.

95. Han X. On sensitivity of RANS simulations to uncertain turbulent inflow conditions / X. Han, P. Sagaut, D. Lucor // Computers & Fluids. – 2012. – Vol. 61. – P. 2–5. – DOI : 10.1016/j.compfluid.2011.04.009.

96. Alfvén H. Magnetohydrodynamics and the thermonuclear problem. Proceedings of the Second Nations International Conference. Vol. 31. 1958.

97. 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.

98. 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.

99. Liu M, Duan YF. Resistance properties of coalewater slurry flowing through local piping fittings. Exp Therm Fluid Sci, 2009, 33(5), pp.828-837.

100. 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.

101. 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.

102. 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.

103. Роговий А.С. Використання методів числового вирішення задач інженерного аналізу: навчальний посібник. Харків: ХНАДУ, 2019. 112 с.

104. Frank M. Visual analysis of two-dimensional magnetohydrodynamics. Phys.Fluids, 2001. vol.13, pp. 2287-2295.

105. Davidson P.A. Magnetohydrodynamics in materials processing. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999. 31(1), pp. 273-300.

106. Kim S. Hydrodynamics of Anisotropic Liquid Crystals in an Applied Magnetic Field. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 2021, 53(3), pp. 3123-3157.

107. Khan M.A., Kosel J. Integrated magnetohydrodynamic pump with magnetic composite substrate and laser-induced graphene electrodes. Polymers, 2021, 13(7), pp. 1113.

108. West D., Taylor J.A., Krupenkin T. Alternating current liquid metal vortex magnetohydrodynamic generator. Energy Conversion and Management, 2020, 223, pp. 113223.

109. Lu P., Fang R., Ye Q., Huang H. Numerical Research on the Flow Fields in the Power Generation Channel of a Liquid Metal Magnetohydrodynamic System. ACS omega, 2020, 5(48), pp. 31164-31170.

110. Ko S., Kim E.S., Park S., Daigle H., Milner T.E., Huh C., Geremia G.A. Amine functionalized magnetic nanoparticles for removal of oil droplets from produced water and accelerated magnetic separation. Journal of Nanoparticle Research, 2017, 19(4), pp. 132.

111. Ko S., Kim E.S., Park S., Daigle H., Milner T.E., Huh C., Geremia G.A. Oil droplet removal from produced water using nanoparticles and their magnetic separation. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro., 2016.

112. J. Hartmann, F. Lazarus, Hg-Dynamics II. Experimental Investigations on the Flow of Mercury in a Homogeneous Magnetic Field. – Copenhagen, 1937. – XV, 7. – P. 1–46.

113. Narasimha, R., Sreenivasan, K. R. Relaminarization of fluid flows. In Advances in applied mechanics, 1979, 19, pp. 221-309.

114. Azimi Neda, Rahimi Masoud, Zangenehmehr Parastoo. Numerical Study of Mixing and Mass Transfer in a Micromixer by Stimulation of Magnetic Nanoparticles in a Magnetic Field. Chemical Engineering & Technology, 2021, 44.6, pp. 1084-1093.

115. Andrenko P., Rogovyi A., Hrechka I., Khovanskyi S., Svynarenko M. The Influence of the Gas Content in the Working Fluid on Parameters of the the Hydraulic Motor's Axial Piston. In Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, 2021, pp. 97-106.

116. Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Shvornikova A., Baranov I., Miroshnikova M., Bragin N. Study on the coal-water fuel pipeline transportation taking into account the granulometric composition parameters. International Journal of Engineering & Technology, 2018, 7(4.3), pp. 240-245.

117. Чернецька-Білецька Н.Б., Роговий А.С., Мірошникова М.В., Штиков А.Р. Верифікація розрахунку течії електропровідної рідини в круглих трубах. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту, 2021, (196), С. 87-98.

118. Zonouzi S.A., Khodabandeh R., Safarzadeh H., Aminfar H., Trushkina Y., Mohammadpourfard M., Alvarez G.S. Experimental investigation of the flow and heat

transfer of magnetic nanofluid in a vertical tube in the presence of magnetic quadrupole field. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 91, pp. 155-165.

119. Andrenko P., Rogovyi A., Hrechka I., Khovanskyi S., Svynarenko M. Characteristics improvement of labyrinth screw pump using design modification in screw. In Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1741(1), pp. 012024.

120. Pianykh A.A., Arkhipov G.V., Tretyakov Y.A. Mathematical model of magnetic hydrodynamics and heat transfer in an aluminum reduction cell. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2020, 61(1), pp. 65-73.

121. Rogovyi A., Korohodskyi V., Khovanskyi S., Hrechka I., Medvediev Y. Optimal design of vortex chamber pump. In Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1741(1), pp. 012018.

122. Luo Y., Fan X., Kim C.N. MHD flows in a U-channel under the influence of the spatially different channel-wall electric conductivity and of the magnetic field orientation. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, pp. 1-11.

123. Ansys C.F.X. Users Manual. ANSYS Inc. 2021.

124. Appadurai A., Raghavan V. Numerical investigations on particle separation in dynamic separators. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2019, 30(4).

125. Su W., Shi X., Wu Y., J., Lan X. Simulation on the effect of particle on flow hydrodynamics in a slurry bed. Powder Technology, 2020, 361, pp. 1006-1020.

126. Hutchings, I. M. Mechanical and metallurgical aspects of the erosion of metals. Proceedings of the International Conference on Corrosion-Erosion of Coal Conversion System Materials. National Association of Corrosion Engineers, 1979. 393.

127. Dosanjh, S., & Humphrey, J. A. The influence of turbulence on erosion by a particle-laden fluid jet. Wear, 1985. 102(4), pp.. 309-330.

ДОДАТКИ

МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ, ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ
І ПРОЕКТНИЙ ІНСТИТУТ ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ
«У К Р Н Д І П Р О Е К Т»

Ідентифікаційний код 00174125
Юридична адреса: 03142 м. Київ
проспект Академіка Палладіна, 46/2
Телефон/факс (044) 424-23-72
Електронна пошта: post.unp@ukr.net

р/р 26003300027169
АТ «Ощадбанк» м. Київ
МФО 322669
ІПН № 001741226579

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ДП «Інститут
«УкрНДІпроект»,
Голова вченої ради
д-р техн. наук, проф.

_____ **Олександр КРУТЬ**
«_____» _____ 2021 р.

АКТ

впровадження результатів дисертації старшого викладача кафедри ЛУБРТ Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля Мірошникової Марії Володимирівни на тему "Підвищення енергоефективності холодильного обладнання пасажирських вагонів удосконаленням очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів"

Цим актом підтверджується, що Державним науково-дослідним, проектно-конструкторським та проектним інститутом вугільної промисловості «УкрНДІпроект» прийнято до використання такі результати дисертації **Мірошникової М.В.**:

1. Методика вибору запропонованих в дисертації технічних рішень, що дозволяють досягти взаємозамінності альтернативних холодоагентів та на основі врахування їхніх функціональних властивостей обрати раціональні;

2. Методика очищення поверхонь апаратів і трубопроводів холодильних машин від залишків мінеральної оливи за рахунок використання течії електропровідної рідини;

3. Конструкторські рішення, що дозволяють забезпечити щільний контакт між магнітною рідиною та внутрішньою поверхнею трубопроводу шляхом ефективного регулювання електромагнітного поля в трубопроводі.

Впровадження результатів дисертації **МІРОШНИКОВОЇ Марії Володимирівни** в роботу інституту «УкрНДІпроект» дозволяє суттєво скоротити обсяги і зменшити трудомісткість дослідницьких і дослідно-конструкторських робіт, значно підвищити достовірність інженерних розрахунків. Ефективність безпосереднього використання холодильного обладнання при цьому зростає щонайменше на 35%.

Вчений секретар інституту
канд. техн. наук **Михайло ТОЛСТОЙ**

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

в.о. ПКВЧДЗ-1

«03» 12 2021 р.

АКТ

впровадження результатів і висновків дисертаційної роботи Мірошникової Марії Володимирівни на тему “ Підвищення енергоефективності холодильного обладнання пасажирських вагонів удосконаленням очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів ”

старшого виклада кафедри ЛУБРТ Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Комісія в складі:

Голови – головного інженера Крутенко В. М. і членів комісії ПКВЧДЗЕл Глушко В. С., провідний інженер-технолог Горлушко Ю. В., ПКВЧДЗ (інструктор) Горбатюк С. О.,

розглянувши дисертаційну роботу М.В. Мірошникової , встановила:

1. У дисертаційній роботі Мірошникової М.В. проведені дослідження очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів та холодильного обладнання СКП від залишків мінеральних олив, що застосовуються у системах з хладоном R12.

2. Особливу значущість в аспекті практичної реалізації представляють розроблені в дисертації науково-обгрунтовані технічні рішення, що дозволяють досягти взаємозамінності альтернативних холодоагентів за рахунок удосконалення очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів:

- визначені залежності втрат тиску на повороті в коліні трубопроводу на основі вирішення рівнянь Нав’є-Стоксу осереднених за Рейнольдсом;
- залежності коефіцієнтів втрат тиску під час течії в раптовому розширенні та раптовому звуженні визначено на основі методу чисельного моделювання течії електропровідної рідини в трубопроводі з місцевими опорами.

3. При розробці згаданих методів використані наступні викладення і результати досліджень:

- 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.

4. Застосування електромагнітного поля і циркуляційного насоса забезпечує мінімальний обсяг використання магнітної рідини в процесі очищення. Таким чином, щільний потік магнітної рідини на внутрішній поверхні трубопроводу поліпшує процес механічного очищення системи кондиціонування пасажирських вагонів на 37 %

5. На основі результатів запропонованих досліджень визначена ефективність процесу очищення внутрішніх поверхонь апаратів і трубопроводів систем кондиціювання повітря пасажирських вагонів від залишків мінеральної оливи при використанні електромагнітного поля та магнітної рідини

6. Робота Мірошникової М.В., є самостійним, закінченим дослідженням, результати якого представлені у вигляді науково-обгрунтованих рекомендацій, інженерних методів розрахунку, конструктивних і схемних рішень, виконаних на сучасному науково-технічному рівні.

Голова комісії _____ В.М. Крутенко

Члени комісії:

_____ В.С. Глушко

_____ Ю.В. Горлушко

_____ С.О. Горбатюк