

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**РАДІОНОВ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 502/504:621.318:537.6/.8(043.3)

**НАУКОВІ ТА ПРИКЛАДНІ ОСНОВИ МАГНІТОРІДИННОЇ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ,  
ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ЕКОЛОГІЧНУ БЕЗПЕКУ ШКІДЛИВИХ ВИРОБНИЦТВ**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Суми – 2020

**Дисертація є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису.**

Робота виконана на кафедрі технічного сервісу Сумського національного аграрного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор  
**Тарельник В'ячеслав Борисович,**  
Сумський національний аграрний університет  
Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри  
технічного сервісу.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Козуля Тетяна Володимирівна,**  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки  
України, професор кафедри програмної інженерії та  
інформаційних технологій управління, м. Харків;

доктор технічних наук, доцент  
**Бахарєв Володимир Сергійович,** Кременчуцький  
національний університет імені Михайла  
Остроградського Міністерства освіти і науки України,  
декан факультету природничих наук, м. Кременчук;

доктор технічних наук, доцент  
**Гурець Лариса Леонідівна,** Сумський державний  
університет Міністерства освіти і науки України,  
доцент кафедри прикладної екології, м. Суми.

Захист дисертації відбудеться 19 червня 2020р. о 10 год 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 в Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корп. Ц, ауд. 219.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, Україна, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, та на сайті спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 за електронною адресою: <https://sumdu.edu.ua/uk/science/science-info/scientific-infrastructure/specialized-council/102-55-051-04.html>.

Автореферат розісланий 16 травня 2020 року.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04



І. Ю. Аблєєва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Техногенне навантаження на навколишнє середовище (НС) в Україні в кілька разів перевищує показники в розвинутих країнах світу. Україна має цілий ряд промислових регіонів з високим рівнем загроз виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

Завдання забезпечення екологічної безпеки промислових об'єктів залежить не тільки від правильної оцінки техногенної небезпеки, але і теоретичного узагальнення характерних небезпек технологічних процесів, поглибленого їх аналізу, науково обґрунтованого виділення найбільш небезпечних об'єктів.

Для України техногенне навантаження на довкілля посилюється внаслідок збільшення частки морально і фізично застарілих технологій та обладнання, зниження темпів відновлення виробництва. Зношення основних виробничих фондів усіх галузей економіки на сьогоднішній день наближається до 80 %, а темп відновлення фондів не перевищує 2,5 %.

Сумарне техногенне навантаження підприємств небезпечних виробництв (НВ) поєднує дві взаємозалежні групи впливів: забруднення навколишнього середовища і порушення, в першу чергу, працездатності технічних систем. Спад обсягів виробництва не призводить до адекватного зниження техногенного навантаження на навколишнє природне середовище через зростання кількості екологічно небезпечних аварій. За статистичними даними кількість викидів забруднювальних речовин, пожеж та вибухів продовжує збільшуватися.

Виникнення і розвиток техногенних аварій, зумовлених механічним пошкодженням, визначаються ланцюгом подій і процесів, що починаються з відмови допоміжного, незначного елемента з подальшим каскадним розвитком у серйозну аварію.

Екологічні умови забезпечення техногенної безпеки полягають, щонайперше, в безпечній та безаварійній роботі машин, механізмів і технологічного обладнання. Це узгоджується з основним принципом екологічної безпеки – уникнення загроз екологічної небезпеки до її зародження, що можна прогнозувати через оцінку екологічних ризиків.

Особливість НВ полягає у високій концентрації машинних агрегатів – насосних, компресорних, апаратів повітряного охолодження (АПО), димососів тощо з одиничними потужностями від десятків кВт до одиниць МВт, що є основною причиною виникнення виробничих несправностей і аварійних ситуацій.

В умовах зростання техногенного тиску на довкілля виникає необхідність дослідження впливу безвідмовності, працездатності та надійності електрообладнання на екологічну безпеку системно, враховуючи всі взаємозв'язки між причинами виникнення аварій, їх залежність від кліматично-техногенних чинників впливу на НС та екологічних наслідків.

На сьогодні вплив окремих елементів технологічного обладнання на його працездатність і екологічну безпеку потребує поглибленого теоретичного аналізу та вивчення досвіду експлуатації. Сучасний розвиток вітчизняної промисловості

вимагає безпечної технологічної та наукомісткої модернізації. Основна увага в наукових роботах приділяється питанням оцінки ризику під час реалізації процесів життєвого циклу обладнання. Прогнозні розрахунки рівня ризиків, що виникають під час розроблення, впровадження та/або модернізації технологічного обладнання та його елементів є потребою сучасного наукоємного екологічно безпечного виробництва.

Найчастіше надійність і працездатність устаткування, що застосовується на НВ, визначається надійністю підшипникових вузлів. Приблизно 90 % випадків аварійних руйнувань підшипникових вузлів, що є джерелом техногенного навантаження на НС, прямо чи опосередковано зумовлюються незадовільною роботою ущільнень. Незважаючи на різноманіття конструктивних рішень та інноваційних пропозицій у сфері герметології, проблема забезпечення тривалого безвідмовного функціонування ущільнень є надзвичайно актуальною. Це зумовлено тим, що потенційні можливості традиційних ущільнень значною мірою вичерпали себе та не можуть забезпечити абсолютну герметичність.

Одним із можливих шляхів розв'язання окресленої проблеми є застосування нового типу ущільнень – магніторідинних герметизуючих комплексів (МРГК), головною перевагою яких є спроможність забезпечення практично повної 100 % герметичності, і, відповідно, підвищення екологічної безпеки виробничих процесів. Впровадження МРГК можна провести під час планового ремонту устаткування, одночасно здійснивши і його модернізацію, що забезпечує їх автоматичну апробацію у важких експлуатаційних умовах. Надалі це дає можливість закладати високоефективні наукомісткі технології у серійні зразки нової техніки.

Проблеми техногенної безпеки, ущільнювальної техніки і ферогідродинаміки, що розв'язуються в дисертаційній праці, ґрунтуються на результатах досліджень відомих учених як: Адаменко М. І., Баштовий В. Г., Вамболь С. О., Гафт Я. З., Голубєв О. І., Гомеля М. Д., Громико Б. М., Диканський Ю. І., Зубарєв А. Ю., Іванов А. О., Казаков Ю. Б., Качинський А. Б., Краків М. С., Легасов В. О., Мальований М. С., Марцинковський В. А., Махутов М. А., Пляцук Л. Д., Пшеничников О. Ф., Райхер Ю. Л., Рижков С. С., Селезов І. Т., Трофимчук О. М., Шмандій В. М., Blums E., Figueiredo Neto A. M., Gawlinski M., Odenbach S., Pant R. P., Raj K., Rosensweig R.E., Scholten P. C., Taketomi S., Zahn M. та ін.

Стримуючими факторами широкого використання МРГК є складність і недостатня вивченість взаємозалежних фізичних процесів, що в них відбуваються, відносно невелика сфера застосування (наприклад, у літературі відсутні дані щодо параметрів МРГК, характерних для зношеного обладнання), а також важкі умови експлуатації технологічного обладнання.

Таким чином, створення та теоретичне обґрунтування концепції зменшення ризику техногенних аварій і катастроф для технологічного обладнання з широким інтервалом фізичного зносу й морального старіння та її реалізація на підприємствах НВ шляхом усунення експлуатаційних відмов і загроз травматизму обслуговуючого персоналу за допомогою МРГК є актуальною *науково-прикладною проблемою* в царині екологічної безпеки техносфери.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика

дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямам природоохоронної діяльності в Україні, викладеним в «Основних напрямках державної політики України в області охорони навколишнього середовища, використання природних ресурсів і забезпечення екологічної безпеки», затверджених Верховною Радою України від 05.03.1998 № 188/98-ВР; «Основних засадах (стратегіях) державної екологічної політики на період до 2020 року», затверджених Законом України від 21.12.2010 № 2818-VI; Постанові Кабінету Міністрів України від 07.09.2011 № 942 «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року» (Розділ - «Рациональне природокористування»); Законі України від 21.03.2017 № 1959- VIII «Про оцінку впливу на довкілля».

Результати проведених досліджень, на яких ґрунтується дисертаційна робота, безпосередньо пов'язані з науково-дослідними темами, що виконувалися в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, ТОВ «НВВП “Ферогідродинаміка”», Сумському національному аграрному університеті, а також із виконанням спільного проекту фондів фундаментальних досліджень України та Білорусі (проект № Ф54.2/012) «Діагностика та прогнозування експлуатаційних характеристик нанодисперсних магнітних рідин із використанням фізико-механічних, електричних та магнітних методів для створення високоефективних магніторідинних пристроїв» (номер державної реєстрації 0113U005305).

Важливі науково-практичні результати отримано автором під час виконання дослідницьких і проектно-конструкторських робіт (загальна кількість – близько 300) за договорами з провідними підприємствами галузей небезпечних виробництв України та країн СНД.

**Мета і завдання дослідження.** *Мета роботи* – підвищення рівня екологічної безпеки небезпечних виробництв шляхом створення умов для безаварійної роботи, усунення відмов на устаткуванні, що експлуатується, а також загроз травматизму обслуговуючого персоналу під час застосування в елементах технічних систем магніторідинних герметизуючих комплексів.

Для досягнення зазначеної мети поставлено та вирішено такі **завдання дослідження**:

– виявити основні проблеми та причини виходу з ладу технологічного обладнання (та його елементів) НВ як основного джерела техногенного навантаження на НС, вплив їх на аварійність і травматизм у галузях, на виникнення та розвиток техногенних аварій і катастроф;

– обґрунтувати методологічний підхід до забезпечення підвищення рівня екологічної безпеки НВ на основі удосконалення і модернізації елементів технічних систем технологічного обладнання;

– проаналізувати вітчизняний та зарубіжний досвід у сфері оцінки потенційних техногенних ризиків, вибрати оптимальні методи ризик-аналізу, адаптувати та модернізувати їх для здійснення оцінки рівня техногенної безпеки під час заміни штатних ущільнень на МРГК;

– розробити теоретичні основи моделювання екологічно безпечних процесів у робочому зазорі магніторідинного герметизатора (МРГ), що становлять вирішення таких необхідних завдань:

– надати аналітичний аналіз розподілу температурних полів за нестационарного протікання магнітної рідини в зазорі МРГ;

– здійснити аналітичний аналіз взаємного впливу відцентрових і магнітних сил у робочому зазорі;

– аналітично й експериментально визначити магнітні, фізико-хімічні, реологічні та експлуатаційні властивості технічних концентрованих магнітних рідин (МР) на різних дисперсійних основах;

– вивчити механізм процесу структурної релаксації у концентрованих технічних магнітних рідинах і його вплив на седиментаційну стійкість і довговічність рідин; розробити простий у реалізації експрес-метод визначення седиментаційної стійкості;

– розробити на підставі єдиного системного підходу узагальнену математичну модель магнітних, електричних і гідромеханічних взаємозалежних полів у робочому зазорі МРГ на основі методу мультифізичного моделювання;

– розробити аналітичну модель, що враховує взаємодію мікро- і наночастинок у бідисперсних промислових МР у робочому зазорі МРГ;

– розробити програми та методи випробувань МРГ і МР для експериментальних досліджень їх на працездатність і довговічність, порівняльних стендових і дослідно-промислових випробувань МРГК і штатних ущільнюючих систем, використання яких забезпечує зниження техногенного навантаження на НС;

– на підставі теоретичних і експериментальних досліджень запропонувати нові технічні рішення та розробити конструкції МРГК для підвищення рівня екологічної безпеки технологічного обладнання небезпечних виробництв;

– організувати промислове впровадження низки конструкцій МРГК із практично повною герметичністю для підвищення показників екологічної і техногенної безпеки промислових небезпечних виробництв, заснувати серійне виготовлення МРГК на підприємствах, що випускають технологічне обладнання;

– обґрунтувати екологічну безпечність та ефективність розроблених технічних конструктивних рішень шляхом здійснення порівняльної оцінки рівня техногенної безпеки під час упровадження МРГК замість штатних ущільнень за допомогою удосконаленого методу системного багаторівневого аналізу;

– встановити залежність рівня екологічної безпеки на обладнанні, що експлуатується, ґрунтуючись на модернізованій методиці оцінки техногенних ризиків, від впливу технічних характеристик електродвигунів, режимів їх роботи та кліматичних умов.

**Об'єкт дослідження** – наукомісткі екологічно безпечні технології на основі МРГК для створення умов надійної безпеки життя та діяльності людини шляхом модернізації фізично зношеного та морально застарілого обладнання.

**Предмет дослідження** – підвищення рівня екологічної безпеки небезпечних виробництв шляхом застосування магніторідинних герметизуючих комплексів, що

забезпечують безвідмовне функціонування у штатних та нештатних процесах і надійну техногенну безпечність підприємств.

**Методи дослідження.** У дисертаційній роботі використано комплекс наукових методів для проведення теоретичних і експериментальних досліджень на основі застосування положень теорії системного аналізу. Методи системного аналізу використані для встановлення причин техногенних аварій, дослідження впливу елементів технічних систем на оцінку ризику техногенної безпеки, для виявлення та вивчення взаємопов'язаних неоднорідних, нелінійних, анізотропних двовимірних магнітних, теплових, електричних і механічних полів, що діють у зазорі МРГК.

Для якісного оцінювання значущості окремих факторів у зазорі МРГК проаналізовано основні рівняння ферогідродинаміки, що ґрунтуються на класичних законах механіки суцільних середовищ і містять рівняння збереження імпульсу; нерозривності; теплопровідності; стану; умови відсутності зовнішнього заданого струму і магнітних зарядів; стану магнітної рідини.

Для дослідження сукупності взаємопов'язаних процесів різної фізичної природи в зазорі МРГК застосовано метод кінцевих елементів, виконаний у пакеті прикладних програм Comsol Multiphysics. Необхідні параметри МР (намагніченість насичення, магнітна сприйнятливність, розмір наночастинок тощо) для реалізації моделі визначалися під час проведення експериментальних досліджень із використанням сучасних високоточних засобів вимірювання.

З метою дослідження реологічних властивостей бідисперсних МР розроблено математичну модель на основі теорії суспензій несферичних частинок, реалізовану у комп'ютерній програмі Mathcad.

Для дослідження залежності техногенного ризику від кліматичних умов експлуатації, технічних характеристик і режимів роботи електродвигунів, а також під час аналізу результатів ресурсних, дослідно-промислових випробувань і досвіду експлуатації МРГК використовувалися методи постановки та планування експерименту, статистичної обробки експериментальних даних із використанням прикладних комп'ютерних програм MS Excel, Statistica 7,0.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

– вперше з метою підвищення рівня техногенної безпеки обґрунтовано науково-методологічний підхід до розв'язання проблеми недопущення накопичення дефектів у технологічному обладнанні та подальшого розвитку аварійних подій з позицій системного аналізу, що дозволило встановити причини техногенних відмов систем безпеки та надати рішення щодо зниження техногенного ризику шляхом застосування магніторідинних герметизуючих комплексів;

– вперше для зниження техногенного навантаження на довкілля небезпечних виробництв встановлено такі науково обґрунтовані заходи підтримки екологічно безпечних процесів на основі застосування методів фізичного та математичного моделювання взаємозалежних магнітних, теплових, електричних і гідромеханічних полів у робочому зазорі МРГ:

– температурний розігрів технічних МР для всіх швидкостей зсуву у разі перевершення магнітних сил над відцентровими не перевищує 5 °С;

- стійка робота ущільнення за умови збереження триразового (у порівнянні з номінальним) збільшення робочого зазору МРГК і лінійних швидкостей до порядку 35 м/с;
- надійність у разі збільшених зазорів для забезпечення самокорекції при додаванні феромагнітного мікронного порошку з концентрацією 1 г на 10 мл МР; що дозволило отримати такі результати:
- вперше теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено залежність рівня техногенної безпеки та надійності технологічного обладнання, що експлуатується з МРГК, та якості магнітних рідин на підставі результатів досліджень магнітної сприйнятливості технічних магнітних рідин на великій кількості дисперсійних основ різного хімічного складу;
- вперше для управління екологічною безпекою небезпечних виробництв визначено вплив експлуатаційних властивостей МР на умови забезпечення надійної безпеки життєдіяльності людини з урахуванням критичних ситуацій, що виникають під час техногенних аварій, та обґрунтовано наукові положення: для МР із високою седиментаційною стійкістю саме під дією магнітного поля сповільнюється випаровуваність, а характер зміни в'язкості МР дозволяє діагностувати її якість;
- вперше науково обґрунтовано методичні засади оцінки рівня техногенної безпеки НВ, що створило умови для розвитку методології системних досліджень в екологічній безпеці та комплексного підходу до зниження ризику техногенних аварій шляхом розроблення конструктивних рішень МРГК, зменшення до 7 разів величини техногенного ризику під час використання МР із середнім розміром частинок до 8 нм і кількістю кластерів і агрегатів, сумарний внесок яких у початкову магнітну сприйнятливість МР не перевищує 5 %, що зберігає седиментаційну стійкість протягом не менше 25 років у разі дотримання правил її зберігання;
- вперше з метою мінімізації впливу природно-кліматичних факторів і експлуатаційних умов на рівень техногенної безпеки на підставі узагальнень теоретичних досліджень встановлено доцільність застосування МРГК замість штатних ущільнень для забезпечення практично повної герметичності обладнання;
- отримали подальший розвиток науково-практичні засади для розроблення й упровадження схемних і конструктивних рішень із проектування МРГ з позиції екологічної безпеки; розроблено класифікацію МРГК; уведено поняття МРГК, де роль основного ущільнення виконує МРГ; запропоновано методи посилення позитивних властивостей основного і допоміжного ущільнень.

### **Практичне значення одержаних результатів і впровадження.**

Результати досліджень обґрунтували технічні рішення та надали практичні рекомендації використання МРГК для технологічного обладнання промислових підприємств, що дозволило підвищити рівень техногенної безпеки небезпечних виробництв до 7 разів в умовах раціонального використання природних ресурсів і дотримання нормативів шкідливих викидів завдяки забезпеченню практично повної герметичності підшипникових вузлів шляхом застосування МРГК.

Більшість результатів теоретичних, експериментальних і проектних досліджень узагальнено відповідними технічними умовами, що сприяє їхньому широкому промислому впровадженню. Вони погоджені з провідними інститутами



та заводами, що проектують і виготовляють обладнання, на яке встановлюються МРГК.

Запропоновані у дисертаційній роботі практичні рекомендації підтверджуються результатами експериментів і досвідом промислової експлуатації МРГК, створених на основі результатів виконаних досліджень. За двадцятирічний термін впроваджено понад 4000 МРГК на майже 200 промислових підприємствах небезпечних виробництв в Україні, Росії, Білорусі, Молдові, Узбекистані, Казахстані, Естонії. Здійснюваний протягом цих років авторський нагляд за експлуатацією МРГК підтверджує високу ефективність отриманих результатів. Вони впроваджені на всіх українських заводах з виробництва аміачних мінеральних добрив в містах Черкаси, Горлівка, Кам'янське, Сєверодонецьк, Рівне, Южне; нафтопереробних заводах в містах Лисичанськ, Кременчук, Херсон, Одеса, Дрогобич; Південно-Українській АЕС; коксохімічних заводах у містах Кривий Ріг, Запоріжжя, Кам'янське, Авдіївка, Макіївка, Маріуполь, Ясинувата, Торецьк, Алчевськ тощо.

Всього запропоновані конструкції МРГК промислово експлуатуються близько на 100 підприємствах хімічної промисловості, 23 – нафтопереробної, 15 – металургійної, 20 – вугільної промисловості, а також на 5 підприємствах енергетики, 19 – машинобудування та 1 – водопостачання.

Гарантія повної герметичності обладнання забезпечила системну узгодженість працездатності та техногенно-екологічної безпеки в реальних умовах експлуатації і в випадку виникнення нештатної аварійної ситуації.

Використовуючи позитивні результати промислової експлуатації впроваджених пропозицій з герметизації обладнання заводи-виробники електродвигунів (серії ВАСО, ВАСВ, АСВО, ДАЗО, ВАО, СДН, СДМ, СДС, СДК, СТД тощо) і прохідницьких та вугледобувних комбайнів включили комплектацію обладнання МРГК у свої номенклатурні довідники.

Серійне впровадження МРГК організовано на таких заводах:

- ТОВ «Новокаховський електромашинобудівний завод» (м. Нова Каховка, Україна);
- ТОВ «Завод крупних електричних машин» (м. Нова Каховка, Україна);
- АТ «Первомайський електромеханічний завод ім. К. Маркса» (м. Первомайськ, Луганська обл., Україна);
- ВАТ «Сафоновський електромашинобудівний завод» (м. Сафонов, Росія);
- ТОВ «Електроважмаш-Привід» (м. Лисьва, Росія);
- АТ «Горлівський машинобудівник» (м. Горлівка, Україна).

Конструкції МРГК впроваджувались безпосередньо на підприємствах НВ шляхом заміни штатних ущільнень під час проведення планових ремонтів (акти впровадження ПАТ "Одеський припортовий завод" від 8.11.19, ПАТ "Укртатнафта" від 4.11.19, АТ "ДНПРОАЗОТ" від 22.10.19), а також при постачанні МРГК на заводи-виробники нового технологічного обладнання (акти впровадження ТОВ "Завод крупних електричних машин" від 8.12.19, ТОВ "НВП "НКЕМЗ" від 25.09.19).

Результати дисертаційної роботи щодо досліджень математичного мультифізичного моделювання процесів в МРГК, методу експрес-аналізу

динамічних характеристик магнітної рідини, оцінці рівня техногенної безпеки небезпечних виробництв впроваджені на кафедрі загальної механіки та динаміки машин Сумського державного університету (акт впровадження від 2.11.19) і на кафедрі технічного сервісу Сумського національного аграрного університету (акт впровадження від 30.10.19).

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення, теоретичні та практичні результати, що виносяться на захист і наведені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно в період із 1998 р. до 2019 р. під час проведення досліджень у ТОВ «Науково-виробниче впровадзувальне підприємство “Ферогідродинаміка”» (м. Миколаїв), Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, Сумському національному аграрному університеті.

Експериментальні дослідження та промислові випробування, впровадження у виробництво отриманих результатів, авторський нагляд за експлуатацією розроблених пристроїв виконано під науковим керівництвом і за безпосередньою участю здобувача.

Особистий внесок автора конкретизовано в списку публікацій. Внесок автора в роботи, виконані у співавторстві, полягав у обґрунтуванні напрямів досліджень; плануванні експериментів і обробці результатів; моделюванні процесів, що відбуваються в робочому зазорі МРГК; розробленні практичних рекомендацій для впровадження; науково-технічній та прикладній розробці раціональних технологічних і конструктивних схем МРГК; оцінці рівня техногенного ризику під час заміни традиційних ущільнень на МРГК.

В основних фахових наукових роботах, виконаних у співавторстві, особистий внесок автора відзначено в списку опублікованих праць за темою дисертації. В інших публікаціях додаткового характеру особистий внесок авторів розподілено рівномірно.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної праці обговорено на наукових конференціях різних рівнів, симпозіумах, семінарах, нарадах, технічних радах великих підприємств, виробнича діяльність яких може становити загрозу екологічній безпеці: I–III, VII–XII, XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження та екології в суднобудуванні», Миколаїв, 1996, 1998, 2002, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2019; 8–12 and 14 International conference on Magnetic Fluids: Timisoara, Romania, 1998, Bremen, Germany, 2001, San Paulo, Brazil, 2004, Kosice, Slovakia, 2007, Sendai, Japan, 2010, Ekaterinburg, Russia, 2016; 8–11, 13–17 Міжнародній Плесьській конференції по магнітним рідинам, Плесь, Росія, 1998, 2000, 2002, 2004, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016; International Conference “Advances in the Refrigeration Systems, Food Technologies and Cold Chain”, Sofia, Bulgaria, 1998; IX–XV Міжнародній науково-технічній конференції «Герметичність, вібронадійність і екологічна безпека насосного та компресорного обладнання» – ГЕРВІКОН, м. Суми, 1999, 2002, 2005, 2011, 2014, 2017, Kielce-Przemysl, Polska, 2008; 1–17 Спеціалізованих семінарах «Проблеми безпечної експлуатації компресорного та насосного обладнання в хімічній промисловості» – ЕККОН, м. Одеса, 2000, 2001,

2003, 2004, 2006, 2007, 2009, 2010, 2012, 2013, м. Суми, 2002, 2005, 2011, 2014, 2017, Przemysl, Polska, 2008; Кемерово, Росія, 2016; IX–XIII International Conference “Seals and Sealing Technology in Machines and Devices”, Wroclaw, Polska 2001, 2004, 2007, 2010, 2013; XVI Міжнародній конференції «Проблеми енергозбереження, безпеки, екології в промисловій та комунальній енергетиці», м. Ялта, 2005; I–VI Всеросійській науковій конференції «Фізико-хімічні та прикладні проблеми магнітних дисперсних наносистем», м. Ставрополь, Росія, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017; Міжнародній науково-практичній конференції «Енергоефективність – 2007», м. Київ, 2007; 7 International Conference on industrial fans and pumps, Gliwice, Polska, 2007; 2, 4–6 Міжнародній науково-технічній конференції «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення», м. Миколаїв, 2007, 2011, 2013, 2015; XI–XIII, XVI Міжнародній науково-практичній конференції зі збагачення корисних копалин, м. Бердянськ, 2008, 2009, 2010, 2013; Міжнародній конференції «Енергозбереження, екологія, ефективність. Шляхи зниження енергозалежності України», м. Київ, 2008; 4 Міжнародній науково-практичній конференції «Вугільна теплоенергетика: проблеми реабілітації і розвитку», м. Алушта, 2008; XIII–XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки», м. Кременчук, 2015, 2016, 2017, 2018; технічній нараді головних механіків ВАТ «АК “Сибур”», м. Тольятті, Росія, 2004; технічній нараді Ради головних енергетиків нафтопереробних заводів країн СНД «Основні напрями підвищення енергоефективності нафтопереробних підприємств», м. Москва, Росія, 2015; технічних радах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», м. Кривий Ріг; ПАТ «Укртрансгаз», м. Київ; ВАТ «Белнефтехім», м. Мінськ-Новополоцьк, Білорусь; ВАТ «НавоїАзот», м. Навої, Узбекистан; ВАТ «Фергана Азот», м. Фергана, Узбекистан; ВАТ «Мосенерго», м. Москва, Росія.

**Публікації.** Основні положення дисертації опубліковано у 85 наукових працях, із яких: 1 монографія, 60 статей, зокрема 33 – у фахових наукових виданнях України з технічних наук (із них 2, що індексуються БД Scopus), 16 – у виданнях, що індексуються БД Scopus та/або Web of Science, 11 – у закордонних наукових періодичних виданнях; 18 тез доповідей у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій; 5 патентів України та 1 патент Росії на винаходи.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з двох частин. Перша частина містить анотацію, вступ, сім розділів, загальні висновки та список використаних джерел із 375 найменувань, які розміщено на 42 сторінках. Загальний обсяг першої частини становить 419 сторінок, з яких основного тексту – 299 сторінок, що містить 130 рисунків та 11 таблиць, зокрема 39 рисунків і 2 таблиці на 31 окремому аркуші. Друга частина містить 16 додатків на 176 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подано загальну характеристику дисертаційної роботи. Обґрунтовано необхідність проведення наукових досліджень та їхню актуальність з огляду на сучасний стан проблеми підвищення рівня екологічної та техногенної безпеки НВ. Показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Сформульовано мету і завдання досліджень, які були вирішені для їх досягнення. На

підставі цього визначено об'єкт і предмет досліджень. Наведено методи досліджень, використані в дисертації, сформульовано нові наукові результати; визначено практичне значення отриманих результатів і відомості про впровадження та промислову експлуатацію результатів досліджень; особистий внесок автора; апробацію поданих пропозицій; повноту викладу матеріалів у публікаціях і обсяг дисертаційної роботи.

**Перший розділ** присвячено аналізу літературних джерел, із яких випливає, що реалізація концепції сталого соціально-екологічного розвитку неможлива без зменшення техногенних небезпек у структурі ризику для людини та навколишнього природного середовища.

Надана оцінка стану розв'язання задач техногенної безпеки в контексті вирішення задач екобезпеки України. Показано, що більшість технічного оснащення на шкідливих виробництвах є джерелом підвищеної небезпеки для людей та навколишнього середовища. Проблема безпечної експлуатації обладнання основних технологічних комплексів стала особливо актуальною в Україні сьогодні, коли більша частина парку діючого обладнання виробила встановлений нормативний термін, а його оновлення через економічні причини неможливо. Рівень техногенної безпеки України суттєво залежить від безпечності стану понад 1,5 тис. пожежовибухонебезпечних об'єктів, на яких зосереджено близько 13 млн т твердих та рідких небезпечних речовин. Підтримка нормальної експлуатації технологічного обладнання зменшує викиди шкідливих речовин у повітря, водні об'єкти та ґрунт, знижує ризик виникнення вибухів і пожеж. Літературний аналіз обґрунтовано надає висновок, що підвищення надійності роботи машин забезпечує відносно більший економічний ефект, ніж поліпшення інших техніко-економічних показників. За результатами аналізу причин великих аварій (за даними ООН) встановлено, що в більшості випадків безпосередніми причинами їх виникнення були механічні несправності (рис. 1).



Рисунок 1 – Причини крупних аварій у світі на підприємствах НВ

Спільною рисою техногенних катастроф, зумовлених механічним пошкодженням, є початок аварії з відмови допоміжного елемента з подальшим каскадним розвитком у серйозну аварію.

Так, наприклад, причиною розвитку аварійних ситуацій при експлуатації технологічного обладнання часто є незадовільна робота підшипникових вузлів. У ході дисертаційних досліджень вивчені умови роботи підшипникових вузлів технологічного обладнання й на

підставі літературних даних зроблено висновок, що до 90 % випадків аварійних руйнувань підшипників прямо або опосередковано зумовлено незадовільною роботою ущільнень.

На підставі аналізу досвіду експлуатації систем герметизації технологічного обладнання показано, що потенційні можливості традиційних ущільнень значною мірою себе вичерпали, забезпечити практично 100 % герметичність вони не здатні.

Обґрунтовано, що забезпечення високого рівня герметичності можна досягти шляхом застосування магніторідинних герметизаторів. Визначено основні завдання, які потрібно вирішити для застосування МРГК на зношеному технологічному обладнанні з метою підвищення рівня його безпеки під час експлуатації.

Здійснено огляд існуючих підходів і методів оцінки ризику техногенних аварій для забезпечення проведення кількісної оцінки рівня техногенної безпеки при заміні традиційних ущільнень на МРГК.

Результати проведеного аналізу науково-технічної літератури дозволили обґрунтувати наукову значущість роботи, сформулювати мету, завдання та основні етапи досліджень.

У **другому розділі** розглянуті об'єкт і методи досліджень.

З урахуванням положень системного підходу до вирішення завдань, що виникають під час експлуатації складних технічних систем, запропоновано й обґрунтовано ефективність застосування МРГК для підвищення техногенно-екологічної безпеки НВ.

Уперше досліджувалися фізико-хімічні та експлуатаційні властивості МР, виготовлені більш ніж на десяти різних дисперсійних основах. Це дозволило поглиблено дослідити питання структуроутворення, седиментаційної стійкості МР, виявити певні закономірності їх сталого експлуатаційного стану.

У розділі надано алгоритм наукових досліджень у цій області знань: розгляд процесів, що мають місце у МРГК, спочатку аналітично для виявлення закономірностей і взаємозалежностей у загальних рисах; проведення адаптації відомих методів проведення експериментальних досліджень і розроблення нових методів і експериментальних стендів для визначення характеристик МР та МРГК; розроблення мультифізичної моделі, що враховує процеси різної фізичної природи в зазорі МРГК; удосконалення методу Файн-Кінні для оцінки ризику техногенних аварій; упровадження результатів досліджень на небезпечних виробництвах.

Неоднозначність одержуваних рішень і складність перебігу і передбачуваності результатів фізичних процесів у МРГ пояснюється невивченими до кінця властивостями МР, складною технологією її отримання та полідисперсністю наночастинок. На стан магнітної рідини в процесі експлуатації впливають у комплексі відразу кілька видів сил, полів і факторів: фізичних, хімічних, гідродинамічних, магнітних, поверхневих, контактних, вібраційних тощо. У зв'язку з цим спочатку процеси розглянуто в загальних рисах, для виявлення основних закономірностей, оцінки меж впливу тих чи інших факторів на роботу герметизатора, визначення найбільш перспективних шляхів підвищення надійності та довговічності МРГК із метою створення умов для безпеки людини, враховуючи критичні ситуації, що можуть виникати під час техногенних аварій.

У ході досліджень розглянуто такий перебіг процесів у МРГ: розігрів МР у робочому зазорі в початковий момент часу під час звичайної експлуатації та під час додавання в зазор мікронних феромагнітних частинок; взаємовплив відцентрових і

магнітних сил. Для попереднього аналізу використані аналітичні методи, які базуються на загальних рівняннях ферогідродинаміки, закладених R.E. Rosensweig, та статистичної гідромеханіки суспензій (Л.Д. Ландау, В.Н. Покровський).

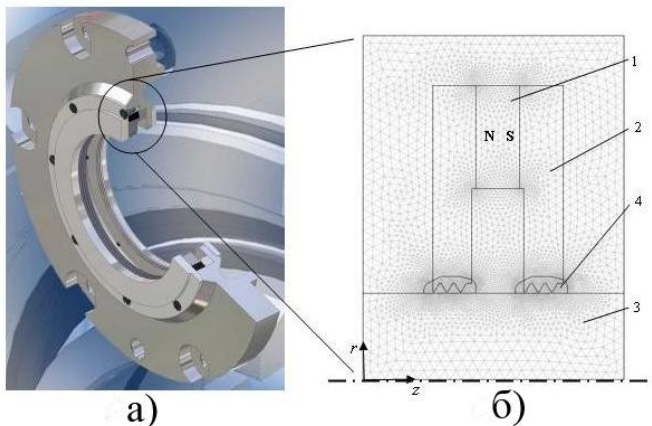
При проведенні експериментальних дослідних робіт застосовані методики з визначення магнітних, реологічних і експлуатаційних властивостей МР та проведена адаптація відомих методик для умов експерименту.

Для дослідження сумісності МР та ущільнювального середовища, утримуваного перепаду тиску, конструктивних елементів МРГ, впливу величини робочих зазорів, ресурсу МРГК розроблено експериментальні стенди.

Основні дослідження проведено на стенді, універсальність якого забезпечувалася можливістю випробування конструкції МРГК в натуральну величину, а використання фальш-валів дозволяла встановити необхідну величину зазору. На цьому стенді здійснено дослідження МРГК із попередніми манжетними і лабіринтовими ущільненнями.

Вибір методу мультифізичного моделювання зумовлений тим, що він дозволяє розглядати сукупність взаємопов'язаних процесів різної фізичної природи та рішення на цій основі низки пов'язаних задач із різних галузей науки і техніки.

Типова конструкція магніторідинного герметизатора циліндричного типу показана на рисунку 2 і містить магнітну систему з постійними магнітами,



а) – розрахункова область активної зони МРГ; б) – нанесена кінцево-елементна сітка

Рисунок 2 – Загальний вигляд типової конструкції МРГ

намагніченими в осьовому напрямку, і полюсами, що мають зубчасту структуру для отримання різко неоднорідного магнітного поля. Всередині магнітної системи розташований обертовий вал, у зазорі якого знаходиться магнітна рідина, що утримується під дією магнітних сил і забезпечує герметизацію внутрішнього середовища в разі існування певного перепаду тиску в осьовому напрямку.

Розрахунок процесів, які відбуваються в робочому зазорі МРГ, здійснюється послідовно в три етапи. На першому етапі розраховується розподіл у статиці магнітного поля в активній зоні герметизатора з урахуванням нелінійної характеристики

магнітопроводу і в припущенні насичення магнітної рідини, визначено положення межі магнітної рідини в статиці. На другому етапі розглядається гідродинамічна задача, що уможливило знайти розподіл азимутальної компоненти швидкості руху магнітної рідини. На третьому етапі, розраховуються електричні процеси в обсязі обертового вала, магнітної рідини й у полюсах магнітної системи. Три зазначені вище задачі розглядаються як слабкопов'язані. Магнітна, гідродинамічна й

електрична задачі далі розв'язуються послідовно з передачею даних, як показано на рисунку 3. Така модель була розроблена вперше.

Для порівняння рівнів техногенної безпеки під час застосування різних ущільнюючих систем модернізовано метод оцінки ризиків з урахуванням системного багаторівневого аналізу на основі методу Файн-Кінні.

Запропоновано визначати повнотою вихідних даних надійність і достовірність результатів аналізу впливу МРГК на техногенну безпеку. Вихідними даними для аналізу стали результати стендових, дослідно-промислових випробувань і експлуатації МРГК на різному технологічному обладнанні, журнали технічного стану технологічного обладнання, де впроваджено МРГК, та інші документи. У ході експериментальних досліджень використано аналізи роботи МРГК, які проводилися технічними службами заводів, де експлуатуються МРГК. Технічні служби заводів надали статистичні матеріали у вигляді банку даних щодо відмов, поломок, нещасних випадків, аварій, які сталися через традиційні ущільнення (лабіринтові, манжетні тощо).



Рисунок 3 – Зв'язок задач і передача даних між ними під час розрахунку МРГ

Попередні розрахунки показали, що низка факторів, які впливають на рівень техногенної безпеки, не врахована в кваліметричних таблицях методу Файн-Кінні. Достовірність результатів рівня техногенної безпеки зросла при додатковому врахуванні стану обладнання, ступеня схильності людини впливу шкідливих факторів від механічних пошкоджень.

Для цього формулу, що характеризує метод Файн-Кінні, перетворено до вигляду:

$$R = E \cdot A \cdot S \cdot K, \quad (1)$$

де  $E$  (*Existence*) – ймовірність виникнення небезпечної ситуації;  $A$  (*Avoidance*) – ймовірність того, що небезпечна ситуація призведе до нанесення шкоди;  $S$  (*Severity*) – тяжкість наслідків;  $K$  – добуток поправочних коефіцієнтів, які враховують:  $K_1 = 1,0-1,1$  – термін експлуатації обладнання;  $K_2 = 1,0-1,1$  – вплив фізичного і морального старіння обладнання на його ремонт;  $K_3 = 0,9-1,0$  – введення нових технічних рішень на етапі модернізації;  $K_4 = 0,9-1,0$  – виготовлення технологічного обладнання і його комплектуючих на сертифікованих виробничих дільницях;  $K_5 = 1,0-1,2$  – взаємне розташування небезпечних об'єктів;  $K_6 = 0,9-1,0$  – умови обслуговування та наявність резервування обладнання. Поправочні коефіцієнти отримано експертним шляхом на підставі результатів експлуатації.

Шкалу оцінки тяжкості наслідків  $S$  розроблено на основі обробки вихідних даних, використовуваних під час аналізу роботи штатних ущільнень та МРГК.

Отже, завдяки теоретично-практичним дослідженням обґрунтовано та запропоновано метод підвищення техногенної безпеки небезпечних виробництв шляхом застосування МРГК з урахуванням положень системного підходу до вирішення завдань, що виникають при експлуатації складних технічних систем.

У **третьому розділі** наведено результати аналітичних досліджень впливу процесів магніторідинної герметизації на рівень техногенної безпеки НВ.

Під час аналізу впливу відцентрових сил аналітично отримано вираз для швидкості рідини в зазорі від обертового вала до нерухомого магнітопроводу, що зменшується за нелінійним законом:

$$V_{0\theta} = \frac{(r_e^2 - r^2)^2}{r |r_e^2 - 1|}, \quad (2)$$

де  $r_e$  – радіус зовнішньої межі зазору, м.

З урахуванням (2) перепад тиску, що утримується герметизатором, визначається за такою формулою:

$$\Delta p = \Delta p_{ct} + \frac{2\rho |V_{0\theta}^s|^2 r_s^2}{(|h + r_s|^2 - r_s^2)^2} \left( \frac{r_s^4 - |h + r_s|^4}{2r_s^2} + 2|h + r_s|^3 \left( \frac{4}{3} - \ln|h + r_s| \right) - \right. \\ \left. - 2|r_s + h|^2 r_s |\ln r_s - 1| + \frac{r_s^3}{6h} + \frac{|h + r_s|^4}{2hr_s} \right), \quad (3)$$

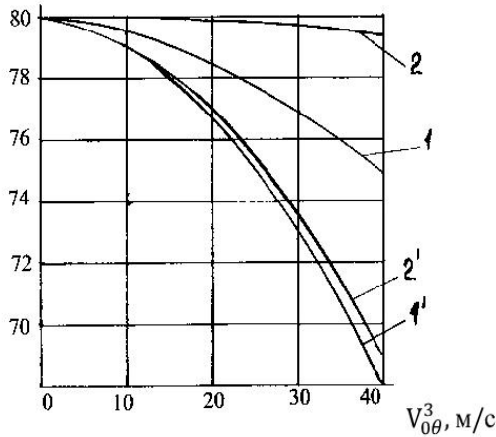
де  $r_s$  – радіусвала, м;  $h$  – величина зазора, мм.

Зіставлення з відомими рішеннями за лінійним законом розподілу швидкості показали, що утримуваний перепад тиску зменшується значно повільніше при врахуванні нелінійності швидкості. Для підвищення надійності МРГ і рівня техногенної безпеки актуальними є конструктивні рішення, що підсилюють нелінійність (рис.4,5).

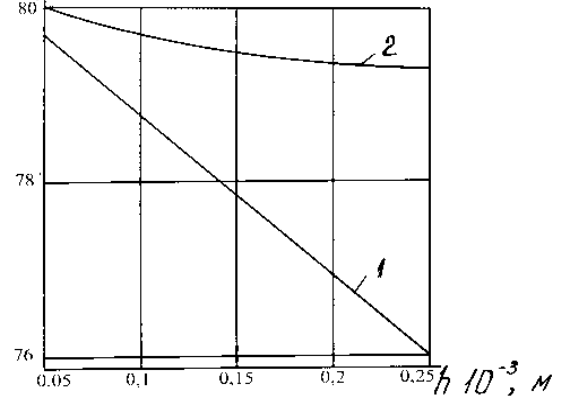
У ході розв'язання початково-крайової задачі щодо розігріву магнітної рідини в зазорі в початковий момент часу розглядалося поширення тепла в радіальному напрямку в трьох областях: вал (1), рідина (2), корпус (3). Для опису цього процесу використана ступінчаста функція включення джерела розігріву (функція Хевісайда) з коефіцієнтом, що враховує всі параметри розігріву.

Шляхом застосування перетворень Лапласа за часом побудовано аналітичні рішення з аналізу обернення Римана–Мелліна в комплексній площині для температурних полів у трьох областях  $\Omega_1$  (вал),  $\Omega_2$  (рідина),  $\Omega_3$  (корпус). В області  $\Omega_2$  рішення, наприклад, має вигляд:



$\Delta p \cdot 10^3, \text{кПа}$ 

1 – лінійна; 2 – нелінійна при  $h = 0,2 \text{ мм}$ ;  
 1' – 2' – те ж при  $h = 0,5 \text{ мм}$   
 Рисунок 4 – Залежність  
 утримуваного перепаду тиску  
 від швидкості вала

 $\Delta p \cdot 10^3, \text{кПа}$ 

1 – лінійна; 2 – нелінійна при  
 $V_{00} = 1 \text{ м/с}$   
 Рисунок 5 – Залежність  
 утримуваного перепаду тиску в  
 радіальному зазорі

$$T_2^C(x, t) = \frac{T_2(x, t)}{C} = 1 + e^{p_2 t} [e^{\sqrt{P_2 P_2} x} (e^{\sqrt{P_2 P_2} r_e} P_{21}^+ \sqrt{P_3} + e^{\sqrt{P_2 P_2} P_{23}^-} \sqrt{P_1}) + e^{-\sqrt{P_2 P_2} x} (e^{\sqrt{P_2 P_2} (r_e + 2)} \cdot P_{21}^- \sqrt{P_3} + P_{23}^+ \sqrt{P_1} e^{\sqrt{P_2 P_2} (2r_e + 1)})] / (e^{2\sqrt{P_2 P_2} P_{23}^-} P_{21}^- - e^{2\sqrt{P_2 P_2} r_e} P_{23}^+ P_{21}^+), \quad (4)$$

де  $C$  – амплітудне значення функції розігріву, залежить від критеріїв Брінкмана та Пекле, тензора швидкостей деформації рідини, що обертається;  $P$  – число Пекле в досліджуваній області та на їхніх кордонах;  $T$  – температура поля в зазорі, К;  $P$  – лишок функції в комплексній площині.

Величини, що входять у вираз (4), обчислюються за формулами:

$$P_{21}^+ = \sqrt{P_2} \pm \sqrt{P_1}, P_{23}^+ = \sqrt{P_2} \pm \sqrt{P_3}. \quad (5)$$

Встановлено, що домінуючий внесок має лише другий лишок  $P_2$ :

$$p_1 = 0, p_2 = \frac{1}{4P_2(r_e - 1)^2} \ln^2 \left( \frac{(\sqrt{P_1} - \sqrt{P_2})(\sqrt{P_3} - \sqrt{P_2})}{(\sqrt{P_2} + \sqrt{P_1})(\sqrt{P_3} + \sqrt{P_2})} \right). \quad (6)$$

Завдяки застосуванню інтеграла Дюамеля та його обчисленням за частинами отримано рішення в замкненому вигляді для довільних наростаючих від нуля в часі функцій розігріву:

$$\frac{T_2^c(x,t)}{T_0} = T_0 C [e^{P_2 t} E(x) + 1] = \frac{\eta_d V_{00}^S X_2}{K_1 h} \times \left\{ \frac{r_e^4}{8(r_e^2 - 1)^2} \times \left( \frac{3r_e^4 \ln(r_e)(\ln(r_e) - 2) + 6r_e^2(r_e^2 + \ln(r_e) + 1) - 1}{3r_e^3} - \frac{11}{3} \right) \right\}, \quad (7)$$

де  $r_e$  – радіус зовнішньої межі зазору, м;  $x_2$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $K_1$  – коефіцієнт теплопровідності рідини,  $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ ;

$$E(x) \text{ – визначається як } E(x) = \tilde{A}e^{a(x-1)} + \tilde{B}e^{-a(x-1)}, \quad (8)$$

де  $\tilde{A}, \tilde{B}$  – коефіцієнти експоненціальної залежності, які розраховують за формулами:

$$\tilde{A} = \frac{\tilde{A}_1}{\tilde{A}_2}, \tilde{B} = \frac{\tilde{B}_1}{\tilde{A}_2}, \tilde{A}_1 = P_{21}^+ \sqrt{P_3 + P_{23}^- \sqrt{P_1}},$$

$$\tilde{A}_2 = P_{23}^+ P_{21}^+ - P_{23}^- P_{21}^-, \tilde{B}_1 = P_{21}^- \sqrt{P_3} + P_{23}^+ \sqrt{P_1}. \quad (9)$$

Відповідно до наведених вище рівнянь вперше були здійснені аналітичні розрахунки для деяких реальних сценаріїв нестационарних процесів в зазорі МРГ. За результатами їх аналізу визначено, що температурним розігрівом у багатьох практичних задачах можна буде знехтувати. В цьому випадку температурний режим не впливає на рівень екобезпеки.

На основі моделі взаємодії мікронних і наночастинок феромагнітного матеріалу у вузькій щілині встановлена інтенсивність тепловиділення під час додавання часток карбонільного заліза в МР.

Основна ідея пояснення магнітотеплових ефектів ґрунтується на припущенні, що об'єднання мікронних частинок у лінійні ланцюгові агрегати призводить до сильного збільшення ефективної в'язкості суспензії, яке зумовлює зростання тепловиділення в середовищі. Під час осадження агрегатів із мікронних частинок на поверхні концентраторів магнітного потоку відбувається автоматичне коригування робочого зазору. За таких умов в'язкість суспензії знижується, тепловиділення практично припиняється. Однак у момент запуску при переміщенні мікронних частинок до магнітопроводу, температура короткочасно може перевищувати  $370 \text{ }^\circ\text{К}$ .

Інтенсивність тепловиділення в одиниці об'єму в одиницю часу, що виникає внаслідок ефектів в'язкості у ферорідині, встановлюється за загальною формулою:

$$W = \int_0^\gamma \sigma d\gamma, \quad (10)$$

де  $\sigma$  – стаціонарна в'язка напруга в суспензії, Па;  $\gamma$  – швидкість зсуву,  $\text{с}^{-1}$ .

Стаціонарна в'язка напруга, що виникає в суспензії, встановлюється згідно з теорією суспензій несферичних частинок:

$$\sigma = \sigma^s + \sigma^a; \sigma^a = \frac{\varphi_L \Gamma_n^m}{2n_c \nu_L},$$

$$\sigma^s = \eta_f \dot{\gamma} \left[ 1 + \phi_L \left[ \alpha_n + \frac{1}{2}(\zeta_n + \beta_n \lambda_n) + \frac{1}{2} \beta_n \cos(2\theta_n) + (\chi_n - 2\beta_n \lambda_n) \sin^2 \theta_n \cos^2 \theta_n \right] \right], \quad (11)$$

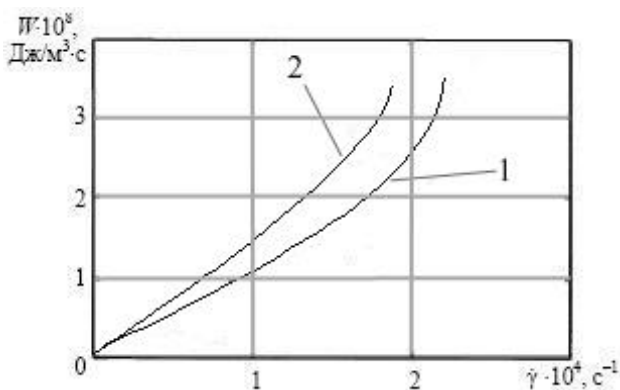
де  $\sigma^a$  і  $\sigma^s$  – антисиметрична та симетрична частини повної напруги, Па;  $\varphi_L$  – об'ємна частка мікронних частинок;  $n_c$  – максимальна кількість частинок у ланцюжку;  $\Gamma_n^m$  – магнітний момент сили, що прагне вибудувати ланцюжок уздовж поля, Н · м;  $\nu_L$  – обсяг мікронної частки, мкм<sup>3</sup>;  $n_f$  – в'язкість МР, Па · с.

Коефіцієнти  $\alpha_n$ ,  $\beta_n$ ,  $\zeta_n$  та  $\lambda_n$  визначаються лише числом частинок  $n$  у ланцюжку і можуть бути обчислені з відомих співвідношень В.Н. Покровського.

Головною відмінністю розробленої моделі від робіт інших авторів є врахування нелінійної намагніченості мікронних частинок та магнітних властивостей їх рідинної основи – магнітної рідини.

Аналіз результатів розрахунків показав, що зі зростанням швидкості зсуву інтенсивність тепловиділення в робочому зазорі МРГ збільшується нелінійно (рис. 6). Для існуючих конструкцій при зміні напруженості магнітного поля в зазорі МРГ від 500 кА/м до 2000 кА/м вона практично не змінюється при фіксованих частотах обертання валів.

При збільшенні обертів валу з 500 до 3000 об/хв. інтенсивність тепловиділення в зазорі суттєво збільшується, що перешкоджає можливому додаванню мікронних частинок карбонільного заліза (рис. 7).

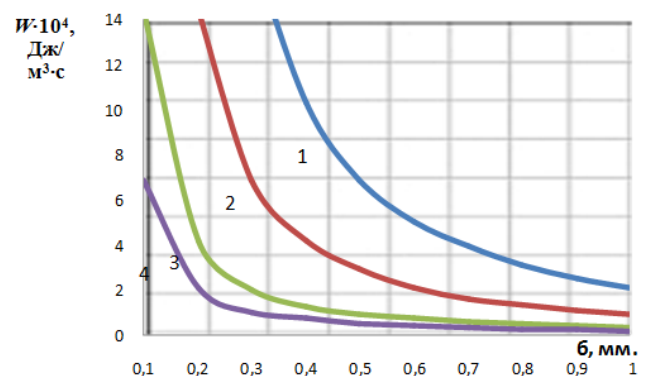


Напруженість магнітного поля

1 –  $H = 100$  кА/м;

2 –  $H = 2000$  кА/м

Рисунок 6 – Залежність інтенсивності тепловиділення від швидкості зсуву течії



Оберти валу, об/хв.: 1 – 3000;

2 – 1500; 3 – 750; 4 – 500

Рисунок 7 – Залежність інтенсивності тепловиділення від величини зазору

Розроблена модель дозволяє корегувати введення мікронних частинок у робочу зону МРГ згідно з одержаним патентом України №106420. За рахунок введення мікрочасток робочий зазор стає більш рівномірним, його величина зменшується, а магнітна індукція та утримуваний перепад тиску збільшується. Це приводить до зростання працездатності та надійності МРГК, а також дає можливість застосування герметизаторів на фізично зношеному обладнанні з великими зазорами. Забезпечення повної герметичності шляхом впровадження МРГК підвищує стан техногенно-екологічної безпеки.

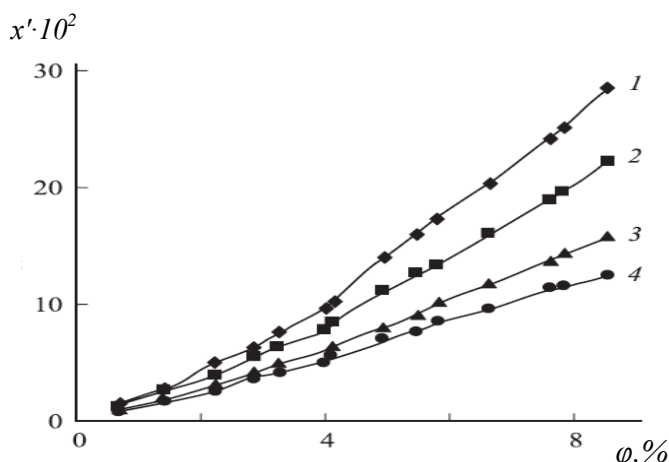
У **четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень.

Найбільший вплив на працездатність та рівень екологічної безпеки МРГК надають властивості магнітних рідин. З метою підвищення рівня екологічної безпеки та її складової частини (техногенної безпеки) були проведені дослідження фізичних та експлуатаційних властивостей МР.

За результатами оцінки даних експериментів визначено, що тепловий броунівський рух частинок, зовнішнє магнітне поле та міжчасткові взаємодії – це три головні чинники, що визначають фізичні властивості та поведінку магнітних рідин. Найбільш широке застосування в промислових МРГК отримали МР на основі вакуумного масла VM-3. Саме вони вивчалися більш детально.

З розгляду концентраційної залежності магнітної сприйнятливості при дії постійного магнітного поля видно, що процеси структуроутворення починаються при концентраціях, наближених до значень 4 % (рис. 8).

Розгляд залежності часу релаксації від напруженості постійного магнітного поля показує, що в первинно однорідній МР під час накладення зовнішнього поля починається процес утворення ланцюгових агрегатів, що призводить до зростання часу релаксації. При подальшому збільшенні напруженості поля зростання ланцюжків триває, але тут вирішальну роль відіграють ефекти, пов'язані з укрупненням агрегатів, що призводить до зменшення часу релаксації.



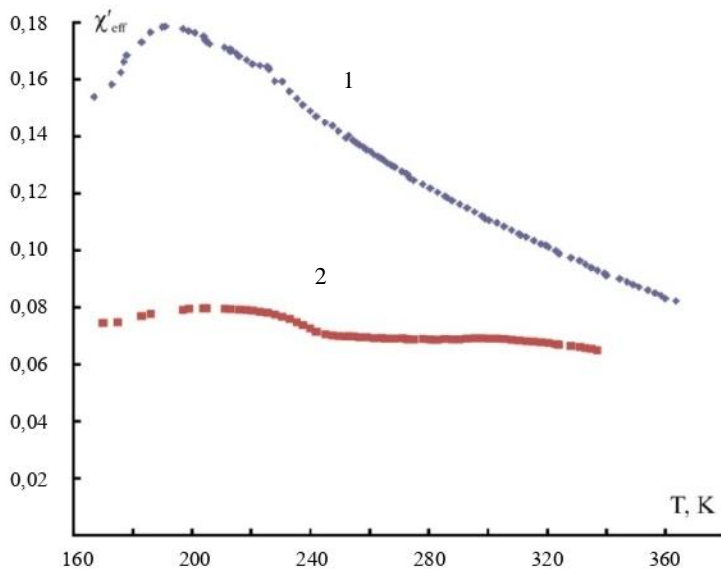
Напруженість МП, кА/м: 1 – 0; 2 – 2,15; 3 – 4,3; 4 – 5,8

Рисунок 8 – Залежність магнітної сприйнятливості від концентрації дисперсних частинок при впливі постійного магнітного поля

Перехід системи в той чи інший упорядкований стан має позначатися на характері температурних залежностей магнітних властивостей системи, зокрема її магнітній сприйнятливості. Для цього досліджувалися такі зразки: 1 – МР на основі гліцерину, 2 і 3 – сухий залишок, отриманий шляхом випаровування МР на основі гасу із середнім розміром частинок 7 і 15 нм відповідно.

Проведені дослідження показали, що температурна залежність магнітної сприйнятливості зразка № 1 має максимум, проте йому відповідна температура, не збігається з температурою затвердіння зразка (рис. 9, крива 1). Додатковий вплив постійним

магнітним полем, співспрямованим із вимірювальним, зміщує максимум в область більш високих температур (рис. 9, крива 2). Температурні залежності магнітної сприйнятливості зразків № 2 і № 3 мають максимуми, температура яких залежить від частоти вимірювального поля та напруженості додатково прикладеного постійного магнітного поля. Дослідження температурної залежності магнітної сприйнятливості зразка № 2 за різної частоти вимірювального поля дозволило зробити висновок, що підвищення частоти призводить до зміщення максимуму в область більш високих температур.



Напруженість МП, кА/м: 1 – 0; 2 – 9,7  
 Рисунок 9 – Залежність магнітної сприйнятливості магнітної рідини № 1 від температури при впливі зовнішнього постійного магнітного поля, паралельного вимірювальному

Результати проведених досліджень указують на відсутність зв'язку спостережуваного максимуму магнітної сприйнятливості досліджених зразків із температурою затвердіння дисперсійного середовища колоїдної системи. Так, для зразка № 1 температура максимуму магнітної сприйнятливості не збігається з температурою затвердіння зразка, зразки ж № 2 і № 3 дисперсійного середовища взагалі не мають.

Аналіз часу релаксації досліджуваних зразків дає підстави стверджувати про наявність зв'язку спостережуваного максимуму температурної залежності магнітної сприйнятливості з переходом

однодоменних частинок у суперпарамагнітний стан.

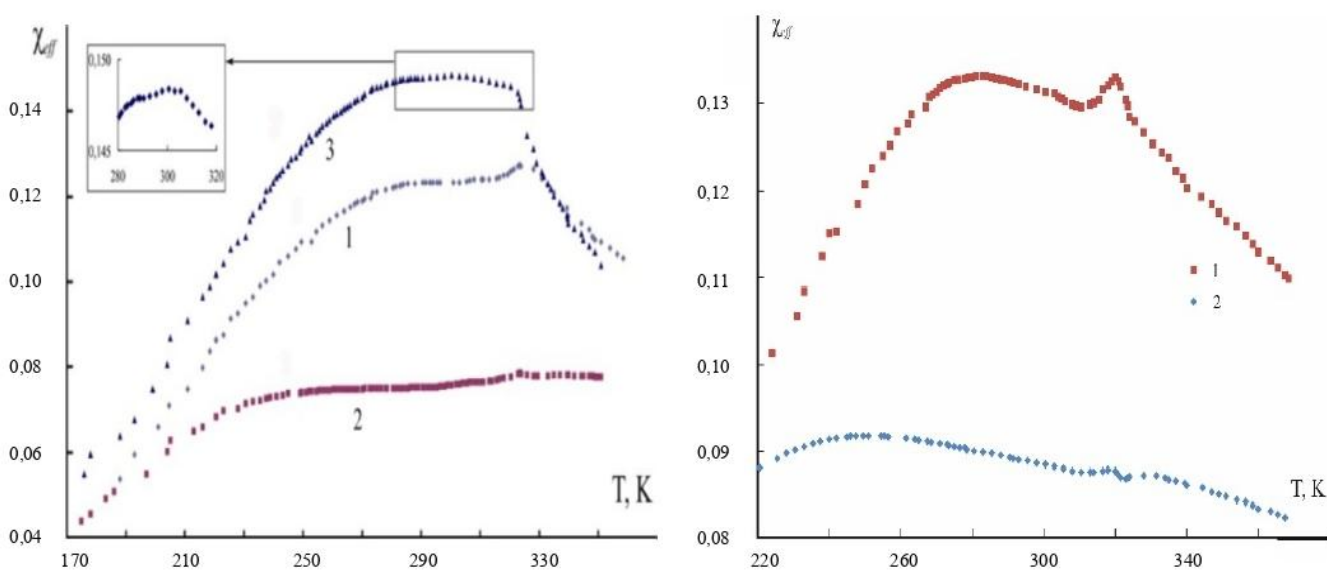
Дія електричного поля на магнітні рідини також призводить до розвитку в них процесів структуроутворення і, зрештою, зміни їхніх фізичних властивостей.

Підтвердженням процесів структуроутворення, не врахування яких може негативно відбитися на працездатності МРГК і рівні техногенної безпеки, є зміщення температурного максимуму магнітної сприйнятливості в область більш низьких температур.

Для більш повного розуміння процесів структуроутворення, були необхідні додаткові дослідження таких магнітних колоїдних систем, де перехід дисперсійного середовища з рідкого стану у твердий відбувається при кімнатних температурах. Спеціально для цього уперше розроблено та виготовлено МР на основі парафіну.

У якості об'єктів дослідження використано два зразки магнітної рідини з магнетитовими частинками на парафіновій основі, намагніченість насичення яких становила 80,2 кА/м і 28,0 кА/м.

На рисунку 10 наведено температурну залежність магнітної сприйнятливості зразка № 1 (крива 2). Як видно з рисунка, спочатку під час збільшення температур спостерігається зростання магнітної сприйнятливості, що, проте, сповільнюється з виходом на плато за температур, близьких до 273 К, на якому в інтервалі температур 273–323 К простежується слабо виражений пологий максимум. За температури, що відповідає переходу зразка із твердого стану в рідкий (323 К), спостерігається невеликий гострий максимум, а потім різке зменшення магнітної сприйнятливості. Аналогічний характер, але з більш вираженими максимумами має і крива температурної залежності магнітної сприйнятливості зразка № 2, (рис. 10б, крива 1). Додатковий вплив постійного магнітного поля призводить до зменшення магнітної сприйнятливості досліджених зразків, але не змінює характер їхньої температурної залежності (рис. 10а, крива 3) і (рис. 10б, крива 2).



а) – зразок №1

б) – зразок №2

1 – зразок охолоджений в магнітному полі; 2 – магнітне поле відсутнє;  
3 – постійне поле, що підмагнічується

Рисунок 10 – Залежність магнітної сприйнятливості зразків від температури

Результати дослідження у вигляді залежності магнітної сприйнятливості висококонцентрованої пасти магнітної рідини, в якій виключені броунівські ступеня свободи частинок у всьому досліджуваному температурному інтервалі, дозволяють також пов'язати спостережувані максимумами їхньої температурної залежності магнітної сприйнятливості з переходом в суперпарамагнітний стан. Підтвердженням цього можуть служити факти зміщення максимуму в область більш низьких температур під час додаткового додавання постійного магнітного поля і, навпаки, – в область більш високих температур у разі зростання частоти вимірювального поля.

У цілому необхідно відзначити, що з виникненням структурного упорядкування пов'язана хороша працездатність досліджених зразків промислових магнітних рідин, а це дозволяє покращити рівень техногенно-екологічної безпеки.

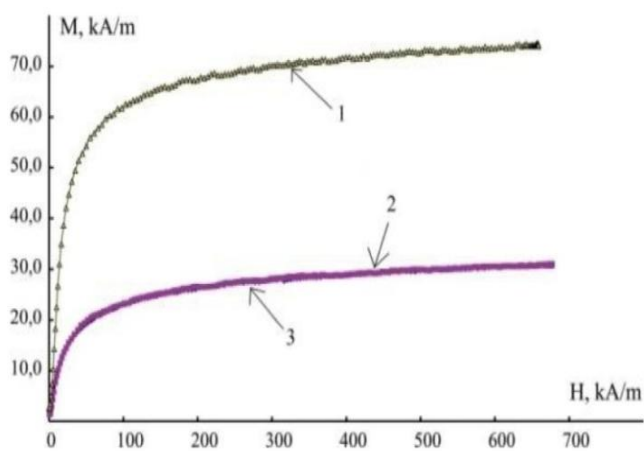
Для забезпечення високої надійності МРГК і рівня техногенної безпеки МР повинні зберігати свої властивості не менше 10 років. Досліджувалися зразки МР на основі вакуумного масла 2002, 2008 і 2018 років виготовлення (табл. 1).

У межах похибки магнітні властивості вивчених середовищ не зазнають змін, що свідчить про їх високу якість. Спостереження досліджених рідин у мікроскопі дозволило встановити, що середовище є однорідним і не містить включень.

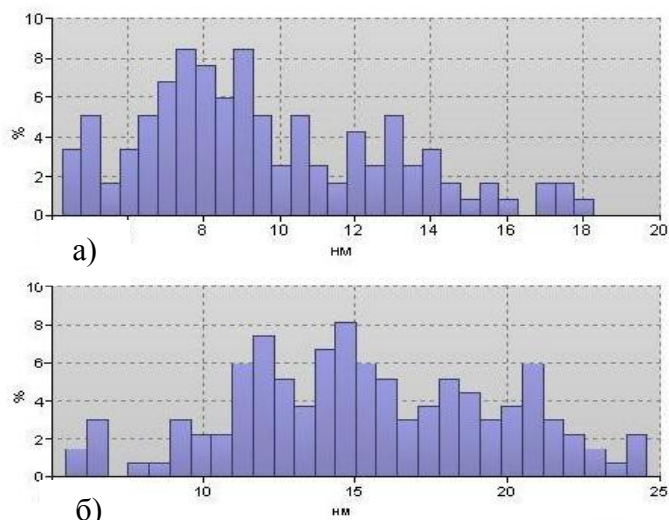
Таблиця 1 – Намагніченість насичення та магнітна сприйнятливість магнітних рідин на основі VM-3 різних років виготовлення

Рік	$M_s, kA/m$	$\chi$
2002	37,6	2,41
2008	37,7	2,40
2018	37,6	2,41

Криві намагнічування мають класичний характер, немає жодних зламів, екстремумів. Загалом це свідчить, що такі МР є доволі високої якості та можуть бути рекомендовані для застосування в МРГК. Такі ж результати отримані для МР, виготовленої у 2002 р. Ця рідина після шістнадцятирічного зберігання була процентрифугована, і, як видно з рисунка 11, криві намагнічування збіглися. Осад після центрифугування вирізняється доволі високою намагніченістю. При цьому крива намагнічування не має гістерезисного характеру, що свідчить про відсутність залишкової намагніченості та намагнічених агрегатів. Однак, ураховуючи середній розмір частинок (рис. 12а), можна констатувати, що в цій рідині відбулося утворення ланцюгових структур із пов'язаних між собою дипольних частинок, і ймовірність розшарування такої рідини в сильних магнітних полях доволі висока.



1 – осад від центрифугування;  
2 – рідина до центрифугування;  
3 – рідина після центрифугування  
Рисунок 11 – Криві намагнічування магнітної рідини на основі VM-3



а) – МР виготовлення 2002р,  
б) – МР виготовлення 2014р.

Рисунок 12 – Гістограма розподілу наночастинок магнітної рідини на основі вакуумного масла

Магнітогранулометричний і кластерний аналізи проводилися для магнітної рідини на основі ВМ-3. Основні висновки такі: в досліджуваній рідині середній магнітний момент частинки мінімум у два рази менше, ніж у аналогічних МР виробництва США, Китаю, Росії. Крім магнітного моменту, високу стабільність колоїдного розчину забезпечують малі розміри частинок і низька концентрація агрегатів (лише трохи перевищує 3 %). При цьому намагніченість насичення МР залишається доволі високою.

На експериментальній установці був реалізований відносно простий метод експрес-аналізу динамічних характеристик МР, що знаходиться в неоднорідному магнітному полі та в умовах, близьких до тих, які реалізуються в активній зоні герметизатора. В основі цього методу лежить силовий вплив неоднорідного магнітного поля на магнітні наночастинки в рідині. Спираючись на отримані дані та досвід експлуатації МРГ, зроблено висновок, що седиментаційну стійкість буде мати та магнітна рідина, зміна магнітної сили для якої протягом 10–15 хв не перевищуватиме 3 % (рис. 13).

Цей самий результат підтверджено під час дослідження МР із різним середнім діаметром наночастинок. Для унеможливлення впливу неконтрольованих факторів під час виготовлення зразків МР розроблено технологію отримання магнітних наноколоїдів з однієї партії з різним часом центрифугування (відповідно 60, 10 і 4 хв). На рисунку 14 наведено залежність для апіезону з різною тривалістю центрифугування.

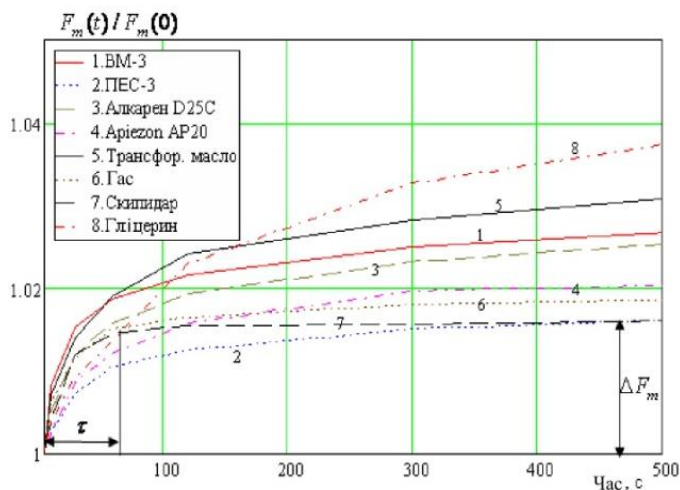
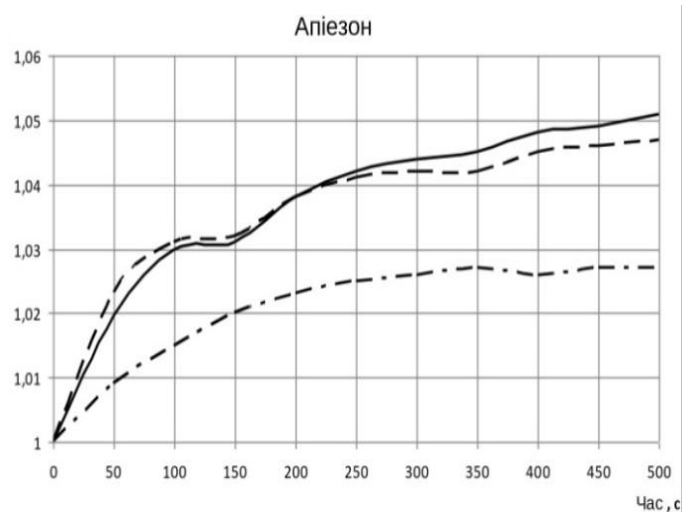


Рисунок 13 – Залежність відносного значення магнітної сили від часу



Тривалість центрифугування: --- 4 хв., — 10 хв., - · - · - 60 хв.

Рисунок 14 – Залежність відносної магнітної сили від часу

Дія магнітного поля уповільнює випаровуваність магнітної рідини порівняно з її дисперсійним середовищем. Однак з огляду на сильну залежність випаровування МЗ від випаровування її дисперсійного середовища для забезпечення заданого рівня працездатності, терміну служби до капремонту та техногенної безпеки МРГК необхідно вибрати маловипаровувані рідини як дисперсійні основи МР.



Через доволі складну залежність в'язкості МР від напруженості магнітного поля достовірні результати можна отримати лише експериментально.

Аналіз експериментальних даних показав, що при значеннях напруженості магнітного поля порядку 300кА/м подальше зростання в'язкості не спостерігається. Вивчення змін відносної в'язкості (відношення в'язкості, що вимірюється в магнітному полі  $H = 400$  кА/м, до в'язкості поза магнітного поля) для промислових МР, які пройшли експлуатаційну перевірку в складі МРГК, показав, що її величина не перевищує 2,5 (табл. 2).

Рекомендоване значення відносної в'язкості  $1 < K \leq 2,5$ . Відносну в'язкість МР запропоновано як критерій якості рідини, працездатності та безпеки герметизатора. Запропонований метод непрямої ідентифікації рівня техногенної безпеки вигідно відрізняється простотою здійснення, відсутністю дорогого спеціалізованого обладнання та може бути легко реалізований на будь-якому підприємстві, що експлуатує магніторідинні пристрої.

Таблиця 2 – Значення параметра К відносної в'язкості

Рідина – носій	Динамічна в'язкість за відсутності магнітного поля, мПа·с	Динамічна в'язкість за накладання магнітного поля, мПа·с	Коефіцієнт $\hat{E} = \frac{\eta_{ii}}{\eta_{i\hat{a}}}$
1. Вакуумне масло ВМ-3	47	84	1,79
2. Поліетилсілоксан ПЕС-3	18	31	1,72
3. Алкарен Д24С	51	86	1,68
4. Апіезон АР201	43	79	1,84
5. Трансформаторне масло ТКл	36	75	2,08
6. Гас	11	24	2,18
7. Скипидар	12	27	2,25
8. Гліцерин	59	146	2,48
9. Конденсаторне масло	35	73	2,09
10. Робоча гідравлічна рідина ЛЗ-МГ-2.	27	67	2,48

Отже, експериментальними дослідженнями визначені властивості магнітних рідин, які забезпечують надійну екобезпечну експлуатацію МРГК.

У **п'ятому розділі** викладено результати математичного мультифізичного моделювання комплексного врахування взаємовпливу магнітних, електричних і гідродинамічних полів у робочому зазорі для забезпечення безвідмовної роботи МРГК, та прийнятного рівня технічної безпеки.

Основними параметрами, визначеними при розв'язання магнітної задачі для подальшого вирішення гідродинамічного й електричного завдань, є вільна поверхня МР та розподіл магнітної сили в зазорі.

Вільна поверхня магнітної рідини, що знаходиться в зазорі МРГ, у статичному

стані обмежується лініями рівного значення магнітної індукції.

Розподіл магнітної сили в зазорі магнітної системи з припущенням, що весь він заповнений магнітної рідиною з намагніченістю насичення  $M_s = 30$  кА/м, відображено на рисунку 15.

На рисунку 16 показані вихрові структури, що виникають у магнітній рідині й утворені радіальною  $u_r$  і азимутальною  $u_z$  компонентами швидкості. Як видно з цих рисунків, структура з найбільшою вихровою швидкістю виникає в крайній правій області, що зумовлено наявністю великої за розмірами вільної межі рідини.

За результатами розрахунку магнітного поля визначено розподіл електричного потенціалу  $\phi$ , а потім густини струму  $J$  (рис. 17).

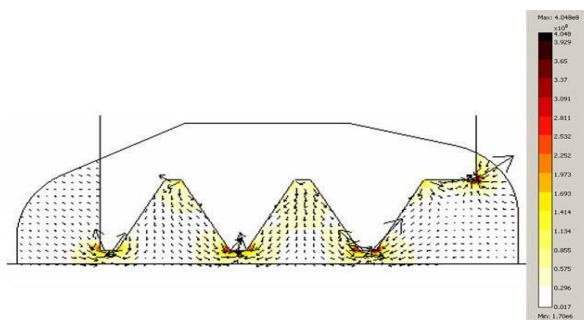


Рисунок 15 – Розподіл вектора об'ємної густини магнітної сили  $f_m$ , Н/м<sup>3</sup> у магнітній рідині (показано стрілками та вкольорі) при  $M_s = 30$  кА/м

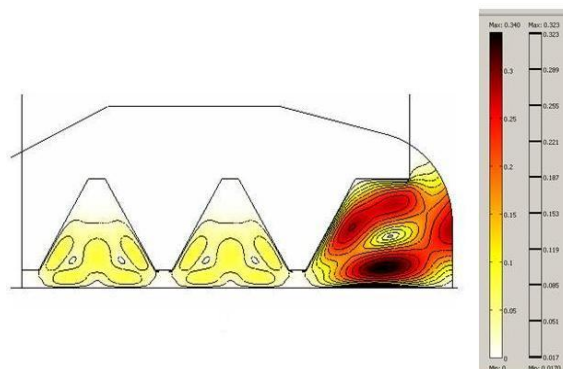


Рисунок 16 – Вихрові структури, утворені радіальною та азимутальною компонентами швидкості

Величина густини струму, яка виникає в активній зоні МРГ, залежить від величини електропровідності магнітної рідини, що показано на рисунку 18. З оціночних розрахунків випливає, що локальний нагрів зубців на полюсах магнітної системи на 5–10 °С відповідає густоті струму в зубцях, що перевищує  $10^6$  А/м<sup>2</sup> (див. рис.18).

Використання розробленої моделі взаємодії фізичних полів дозволяє оцінювати різні варіанти конструктивного виконання, як деталей, так і всього виробу в цілому, враховувати втрати магнітного потоку, визначати значення магнітної індукції у робочому зазорі й підбирати необхідну кількість магнітів у магнітній системі для забезпечення необхідного утримуваного перепаду тисків.

За допомогою цієї моделі розраховано розподіл магнітної індукції в активній зоні МРГ для інтервалу зміни робочого зазору 0,1–1,0 мм із кроком 0,1 мм.

Дослідження розподілу магнітної індукції у трьох областях (магнітна індукція на поверхні концентратора магнітного потоку або магнітопроводу, у середині робочого зазору і на поверхні валу) показали, що максимальне поле зі збільшенням робочого зазору зменшується з 1,8 Тл при зазорі 0,2 мм до 1,2 Тл при зазорі 0,8 мм. Таке зменшення індукції призведе до зниження величини критичного перепаду

тиску між внутрішнім і зовнішнім обсягами МРГ, а внаслідок спостерігатимуть зниження ефективності роботи герметизатора і зменшення рівня екологічної безпеки під час його експлуатації.

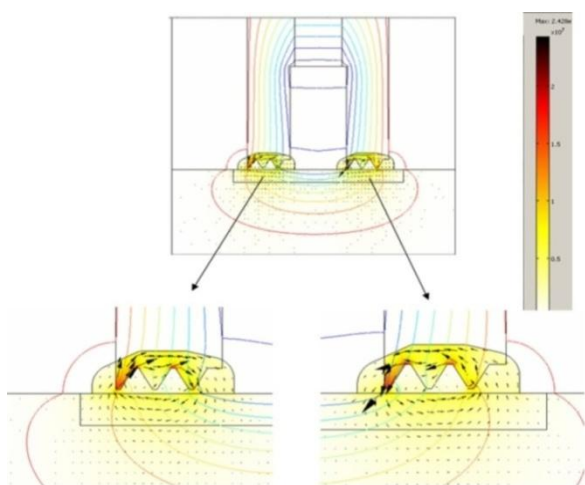


Рисунок 17 – Розподіл густини струму (стрілками та в кольорі) при електропровідності МР  $\sigma_{fluid} = 10^5 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$

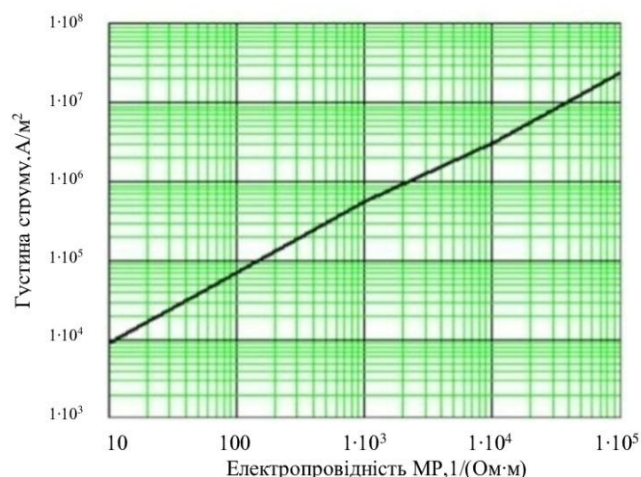


Рисунок 18 – Залежність максимального значення густини струму в крайньому зубці полюса від значення електропровідності магнітної рідини

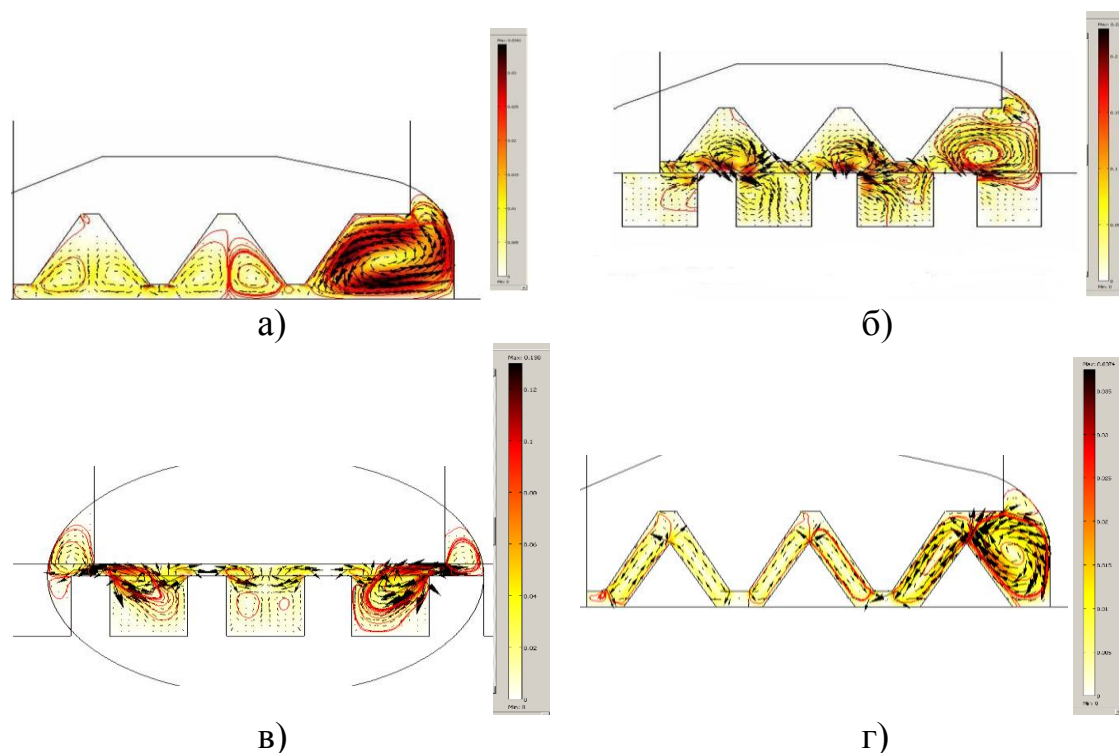
Досвід проектування та експлуатації МРГ, показує, що проблеми з викидом із зазору МР починаються в разі перевищення лінійної швидкості в зазорі величини 15 м/с. Візуально відзначено, що викид дрібнодисперсних крапель МР відбувається в азимутному напрямку. Це свідчить, що причиною викиду стає розвиток нестійкості вільної поверхні. При збільшенні лінійної швидкості понад 35 м/с утримати МР у робочій зоні МРГК будь-якої класичної конструкції не вдається.

Більш поширеним і ефективним засобом зниження впливу відцентрових сил в ущільнювальній техніці є виконання лабіринтів на валу. За аналогією з цим можна виконати зубцеві концентратори магнітного потоку на валу, а не на магнітопроводі. У цьому випадку відцентрові сили відкидають МР до вершини зубця в область максимального магнітного поля, що перешкоджає зниженню критичного перепаду тиску та викиду магнітної рідини із зазору.

Вихрові структури наведено на рисунку 19 для різних розрахункових схем. Загалом структура з найбільшою вихровою швидкістю виникає в крайній правій кінцевій області, що зумовлено наявністю великої за розмірами вільної межі рідини. В інших пазових областях також виникають вихрові структури, але максимальне значення швидкості в них у рази менше, що зумовлено інтенсивним гальмуванням рідини об довколишні стінки магнітопроводів, тому особливого впливу на викид МР із робочого зазору вони не роблять. Ця методика дозволяє прогнозувати взаємодію відцентрових і магнітних сил.

Із погляду гідродинамічних процесів, що відбуваються в робочому зазорі, найбільш прийнятною є схема з розміщенням зубців як на магнітопроводі, так і на «зовнішніх» зубцях на валу (рис. 19, г). Однак реалізація цієї схеми вимагає дуже високої точності виготовлення і провести такий монтаж практично неможливо технологічно не тільки для зношеного обладнання.

Таким чином, у результаті моделювання комплексного врахування взаємовпливу магнітних, електричних і гідродинамічних полів у робочому зазорі розроблені прийнятні варіанти схем герметизації, які наведені на рисунках 19б і 19в.



а) – герметизатор класичної конструкції; б) – герметизатор з зубцями на магнітопроводі трапецеподібної форми і «внутрішніми» зубцями прямокутної форми на валу; в) – герметизатор з «внутрішніми» зубцями циліндричної форми на валу; г) – герметизатор з зубцями трапецеподібної форми на магнітопроводі і «зовнішніми» зубцями на валу

Рисунок 19 – Вихрові структури, утворені радіальною  $u_r$  і осьовою  $u_z$  компонентами швидкості

Результати мультифізичного моделювання використовуються при розробці нових конструкцій МРГК. Обґрунтовано, що розроблена модель за достовірністю зіставлена з експериментом, її доцільно використовувати для визначення геометрії зазору і конструктивних елементів МРГК без проведення дорогих і тривалих експериментальних досліджень. Її впровадження підвищує надійність обладнання та стан техногенно-екологічної безпеки.

У шостому розділі надано аналіз досліджень з оцінки ризику техногенних аварій під час заміни штатних ущільнень на МРГК, ілюструються приклади

застосування цього показника для електрообладнання залежно від умов і режимів роботи, технічних характеристик, природно-кліматичних умов.

Розрахунки техногенних ризиків згідно з удосконаленим методом Файн-Кінні проведено для синхронних електродвигунів типу СДН, що випускаються ТОВ «ЗКЕМ», (м. Нова Каховка) при комплектації виносних підшипникових стійок лабіринтовими ущільненнями та МЖРК (рис. 20). За наданою інформацією умови експлуатації електродвигунів однакового року випуску (початку 90-х років), однакової потужності й оборотів валу, що обертається, доволі суттєво впливають на рівень техногенного ризику.

Більш комфортні умови експлуатації визначено для приводу водяних насосів, розміщених у закритих приміщеннях.

Найбільш важкі умови експлуатації – у шахтних вентиляторів головного провітрювання, тому що під час їх експлуатації обов'язково відбувається налипання пилу на поверхню лопаток, що призводить до дисбалансу ротора та сприяє появі підвищеної вібрації підшипникових вузлів.

Можливість МРГК забезпечити практично повну герметичність дозволяє підтримувати гарантовано високий рівень техногенної безпеки обладнання.

Аналіз рівня техногенного ризику під час застосування електродвигунів серій СДН-14 і СДН-15 при 1000 об/хв і різним діапазоном потужності: 800 кВт; 1,25 МВт; 1,6 МВт; 2,5 МВт; 3,2 МВт, які використовувалися як приводи водяних насосів показав, що в ході зростання потужності електричної машини рівень техногенної безпеки не змінюється.

У ході досліджень обґрунтовано незначний вплив збільшення оборотів валу на рівень техногенного ризику експлуатації цього обладнання.



а – комплектація МРГК; б – комплектація лабіринтовими ущільненнями  
1 – для приводу водяних насосів в закритих приміщеннях, 2 – для приводу водяних насосів на відкритому повітрі, 3 – для приводу цементних млинів, 4 – для приводу вуглерозмельних млинів, 5 – для приводу шахтних вентиляторів

Рисунок 20– Залежність техногенного ризику електродвигунів типу СДН в залежності від його призначення

Вивчення впливу кліматичних факторів на оцінку техногенного ризику проводилося для асинхронних електродвигунів серії ВАСО, ВАСВ, АСВО.

Під час дослідження експлуатаційної надійності за період із 1992 до 2015 рр. розглянуто асинхронні електродвигуни (АД) як із традиційними ущільненнями, так і з МРГК. Усього зібрано та опрацьовано статистичний матеріал про понад 4000 електродвигунів ВАСО, що вийшли з ладу. Аналіз статистичного матеріалу проводився з використанням методів математичної статистики.

На рисунку 21 представлена

діаграма характеру пошкоджень електродвигунів ВАСО на хімічних і нафтопереробних заводах України та середньої смуги Росії за період 2000–2005 рр. Таким чином встановлено, що «слабкою ланкою» конструкції електродвигунів ВАСО є підшипниковий вузол – пошкодження складають 73 %.

Відповідно до результатів аналізу середньомісячної інтенсивності відмов (табл. 3) встановлено, що інтенсивність відмов значно вище в найспекотніші та холодні місяці року.

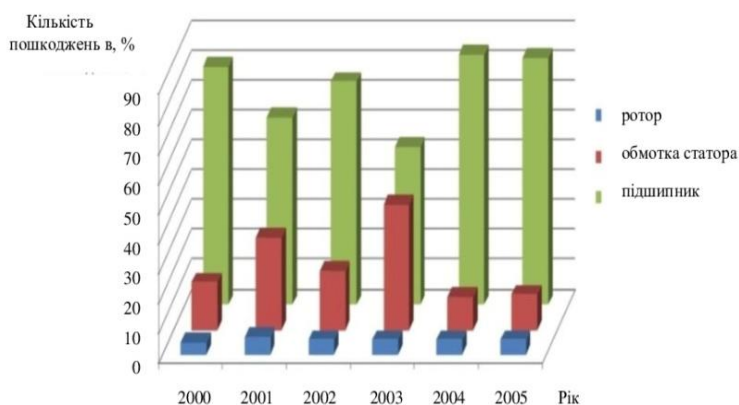


Рисунок 21– Діаграма характеру пошкоджень електродвигунів ВАСО на хімічних і нафтопереробних заводах України та середньої смуги Росії за п'ять років

Під час проведення комплексного аналізу статистичних даних щодо відмов АД виявлено домінування фактора вологості повітря порівняно з усіма іншими факторами, пов'язаними з кліматичними умовами.

З рисунку 22 видно, що є зимовий режим із великими негативними температурами навколишнього середовища, високою відносною вологістю повітря з увімкненнями - вимкненнями АД, що чергуються.

Таблиця 3 – Середньомісячні інтенсивності відмов електродвигунів ВАСО

Компоненти аналізу	Місяці											
	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	Листопад	грудень
Середня інтенсивність відмов $л \cdot 10^{-5}, ч^{-1}$	13,5	11,8	10,6	11,5	7,8	11,1	14,8	15,8	6,3	9,8	12,1	16,5
Коефіцієнт варіації інтенсивності відмов, %	77	47	61	49	79	40	56	36	97	73	56	59

Саме тому для електродвигунів серії ВАСО, що експлуатуються в Тюмені, через ненадійну роботу штатного ущільнення техногенний ризик наближається до верхньої межі терпимого ризику (категорія терпимого ризику  $30 \leq R \leq 125$ ), у цьому разі вже необхідно вживати заходи щодо зниження ризику.

Прояви пилових бур в Алмалику і Атирау певною мірою збільшують техногенний ризик. Упровадження МРГК у всіх розглянутих випадках дозволяє звести техногенний ризик до категорії незначного ( $15 \leq R$ ) шляхом практично повного запобігання потрапляння вологи всередину електродвигуна. Це дозволяє в 4–7 разів знизити рівень техногенного ризику ущільнювальних систем.

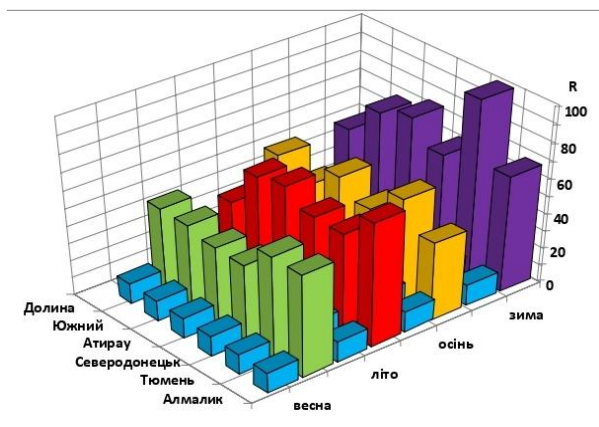


Рисунок 22 – Оцінка техногенного ризику АД серії ВАСО із застосуванням сальникових ущільнень та МРГК

Підібрати штатне ущільнення традиційної конструкції, що надійно експлуатувалося б на всіх режимах роботи електродвигуна (S1–S8), практично неможливо. Відповідно до оцінки техногенного ризику для основних режимів роботи: S1, S2 і S3 при комплектації електродвигунів ВАСО із сальниковими ущільненнями та МРГ отримані такі результати досліджень (рис. 23).

Проведено статистичний аналіз пошкоджень електродвигунів ВАСО на заводах, де вже тривалий час усі АД укомплектовано МРГ. На його підставі зроблено висновок, що підшипниковий вузол не є основною причиною передчасного виходу електродвигунів із ладу.

На рисунку 24 надано результати вивчення причини виходу з ладу електродвигунів за даними експлуатації ПАТ «Укртатнафта» (м. Кременчук) за 1994–1998 рр. (комплектація штатними ущільненнями) та 2011–2016 рр. (комплектація МРГ).

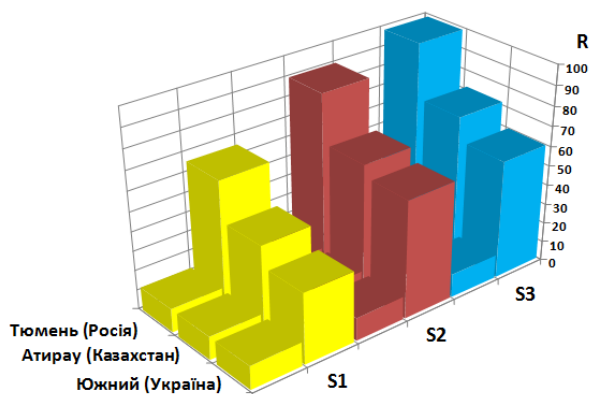
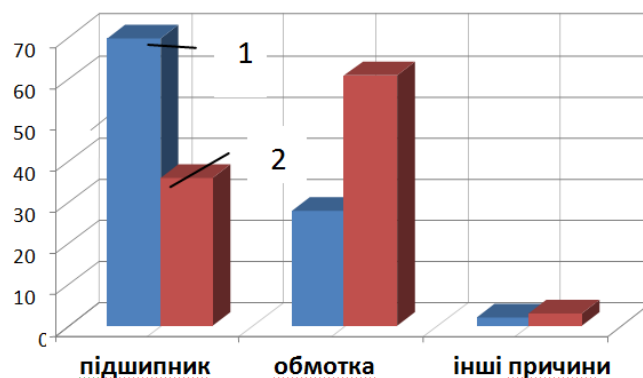


Рисунок 23 – Оцінка техногенного ризику АД серії ВАСО із застосуванням сальникових ущільнень та МРГ залежно від режимів роботи

Докладний аналіз експлуатації електродвигунів ВАСО з МРГК викликаний тим, що вони входять в комплектацію АПО. В свою чергу АПО є важливим елементом технологічних установок по



Пошкодження: 1 – за 1994 – 1998 рр.;  
2 – за 2011 – 2016 рр.

Рисунок 24 – Діаграма характеру пошкоджень електродвигунів серії ВАСО на ПАТ «Укртатнафта» (Кременчук) зі штатними ущільненнями та МРГ

видобутку газу, крекінгу нафти, виробництву аміаку. В результаті відмови електродвигуна установки по видобутку газу на поверхню землі можуть вириватися напірні струмені у вигляді фонтанів, які нерідко стають пожежами. Якщо викиди газу не обтяжені пожежами або вибухами, то в навколишньому середовищі він розсіюється в атмосфері під дією вітру та турбулентної дифузії. До негативних екологічних наслідків призводять викиди аміаку, вуглеводнів та продуктів їх горіння.

Отже, застосування МРГК дозволяє запобігти потраплянню вологи в середину електродвигуна, що приводить до зниження рівня техногенного ризику ущільнювальної системи при заміні сальникового ущільнення на МРГК в 4–7 разів. Впровадження МРГК підвищує працездатність і техногенну безпеку, забезпечуючи прийнятний рівень екологічності середовища.

У **сьомому розділі** проаналізовано екологічні та технологічні аспекти досвіду експлуатації МРГК на НВ. Рішення низки технічних завдань, пов'язаних із досягненням практично 100 % герметичності, на сьогодні виявляється неможливим без використання МРГ. Заміна традиційних штатних ущільнень на МРГК покращує технічні характеристики технологічного обладнання небезпечних виробництв, забезпечує необхідний рівень техногенної безпеки, а також необхідну екологічну обстановку навколо підприємств НВ.

Під час розробки конструкцій МРГК урахувалися три основні напрями їх впровадження на технологічне обладнання: заміна штатних ущільнень на МРГК у ході проведення планових ремонтів; поставка МРГК на заводи – виробники технологічного обладнання (електродвигуни, вугільні комбайни), які після всебічного вивчення досвіду експлуатації МРГК внесли їх як ущільнюючий вузол у свою продукцію; розробка МРГК для нового технологічного обладнання, де технічним завданням передбачено жорсткі вимоги до рівня герметичності та техногенної безпеки.

Більшість результатів теоретичних, експериментальних і проектних досліджень узагальнено відповідними технічними умовами, що сприяє їх широкому промислому впровадженню. Погоджено ТУ з провідними інститутами та заводами, що проектують і виготовляють обладнання, на яке встановлюються МРГК.

Запропоновані в роботі практичні рекомендації підтверджуються як експериментом, так і досвідом промислової експлуатації МРГК, створених на основі результатів виконаних досліджень. За двадцятирічний термін упроваджено понад 4000 МРГК на майже 200 промислових підприємствах небезпечних виробництв в Україні, Росії, Білорусі, Молдові, Узбекистані, Казахстані, Естонії. Здійснюваний протягом цих років авторський нагляд за експлуатацією МРГК підтверджує високу ефективність отриманих результатів.

На рисунку 25 зображено карту України із зазначенням місць упровадження МРГК.

Упровадження МРГК не пов'язане безпосередньо з такими показниками, як





Рисунок 25 – Впровадження МРГК в Україні

к.к.д., продуктивність тощо. У разі установки МРГК замість ущільнень традиційних конструкцій зростає ресурс роботи обладнання та його надійність.

Застосування МРГК дозволяє, по-перше, уникнути аварійні зупинки обладнання, пов'язані з незадовільною роботою ущільнень, по-друге, різко збільшити міжремонтний період експлуатації обладнання, по-третє, скоротити витрати, пов'язані з ремонтом – як витрати з демонтажу устаткування та доставки його до цеху, так і витрати для

заміни комплектуючих (підшипників тощо).

Фактично вище названі основні заходи, які необхідно вживати для зниження ризику виникнення аварійних ситуацій, а, отже, для підвищення техногенної та екологічної безпеки.

Аналіз основних типів конструкцій дозволив узагальнити накопичений досвід і розробити класифікацію МРГ, подану на рисунку 26.

У 2010 році для МРГК серії ВАСО, ВАСВ, АСВО погоджено ступінь захисту електродвигунів – не менше IP55 для приводу вентиляторів градирень і не менше IP65 для приводу АПО. Такий ступінь захисту відповідає кращим світовим зразкам електроприводу і дозволяє отримати підтвердження високої надійності МРГ і здатності збільшувати ресурс електродвигуна та загальний рівень техногенної безпеки.

Багаторічний контроль роботи МРГК для електродвигунів серії ВАСО, ВАСВ, АСВО показав збільшення терміну служби верхнього підшипникового вузла в 4–5 разів і як мінімум у 2 рази скорочення кількості капітальних ремонтів. У цьому ж діапазоні збільшується і рівень техногенної безпеки.

Таким чином, впровадження МРГК дозволяє виключити аварійні зупинки обладнання, пов'язані з незадовільною роботою ущільнень, різко збільшити (не менше ніж в 2 рази) міжремонтний період експлуатації обладнання, скоротити витрати, пов'язані з ремонтом. Позитивним у застосуванні МРГК є факт зростання як економічних, так і екологічних показників підвищення рівня техногенно-екологічної безпеки.

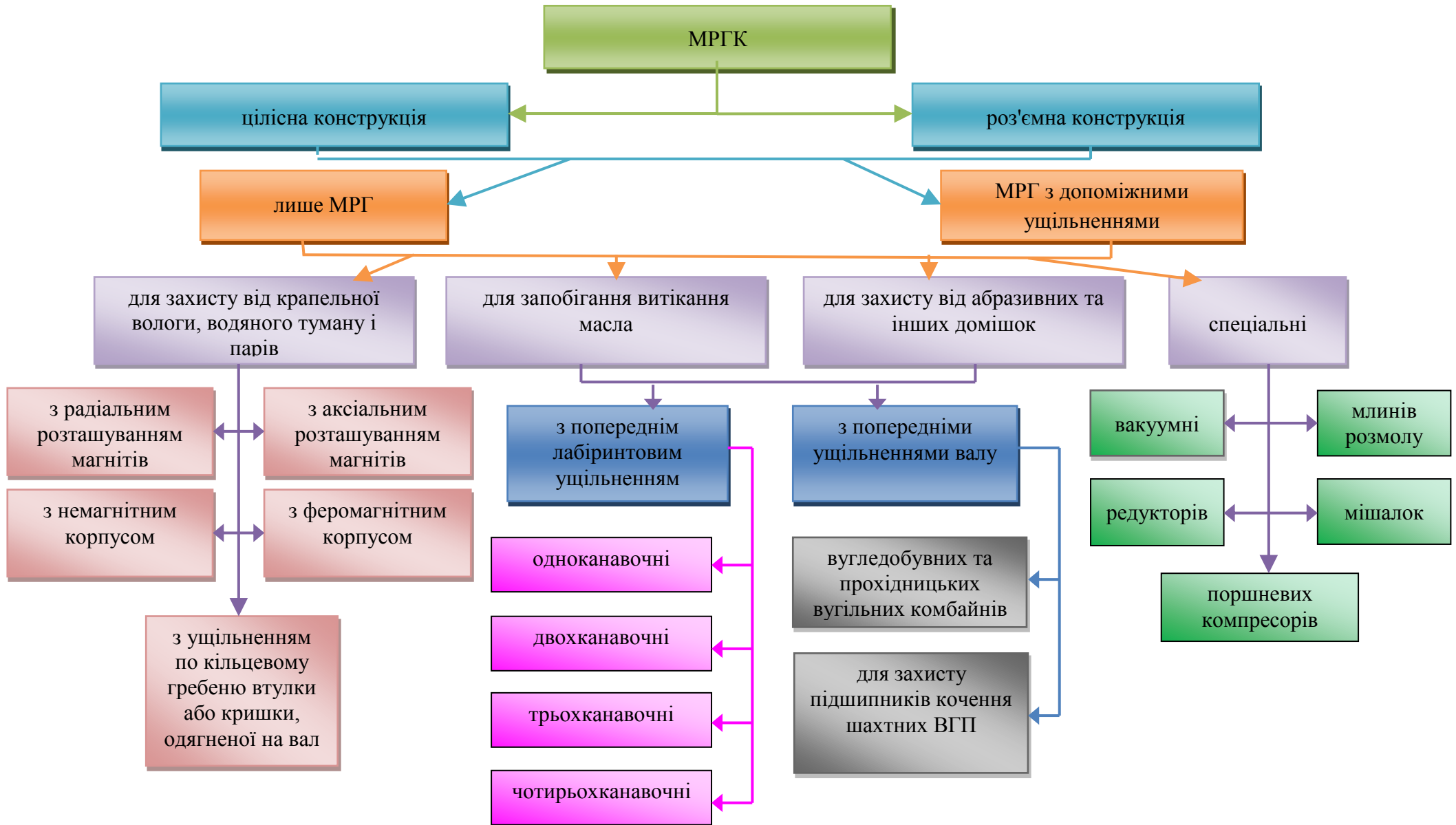


Рисунок26 – Класифікація МРГК для небезпечних виробництв

## ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна науково-практична проблема щодо підвищення рівня екологічної та техногенної безпеки небезпечних виробництв шляхом застосування магніторідинної герметизації відповідно до запропонованих науково-методичних і технологічних основ усунення відмов, аварійних ситуацій і загроз травматизму обслуговуючого персоналу під час експлуатації обладнання, положень розробленої концепції зменшення ризику техногенних аварій і катастроф для обладнання з широким інтервалом фізичного зносу та морального старіння. Реалізація результатів дисертаційного дослідження на практиці дозволяє досягти суттєвого підвищення рівня екологічної безпеки технічно навантажених виробництв в умовах раціонального використання природних ресурсів із забезпеченням дотримання нормативів викидів шкідливих речовин, що сприяє збереженню природного стану компонентів навколишнього середовища.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному.

1. Уперше визнано за необхідне з позицій екологічної безпеки застосування магніторідинної герметизації для посилення надійності «вузьких місць» небезпечних виробництв в умовах відмови допоміжного елемента та виходу з ладу технологічного обладнання, нездатності штатних ущільнювальних систем забезпечити повну абсолютну герметичність, що призводить до виникнення та розвитку аварійних ситуацій.

2. Уперше обґрунтовано науково-методологічний підхід з позицій системного аналізу до вирішення проблеми про недопущення накопичення дефектів у технологічному обладнанні та подальшого розвитку подій, за яких технічна система переходить в аварійний стан з реалізацією небезпечної екологічної ситуації, що уникається шляхом застосування магніторідинних герметизуючих комплексів. Встановлено необхідність забезпечення системної узгодженості працездатності та техногенно-екологічної безпеки для зниження ризику виникнення нештатних аварійних ситуацій, що забезпечується при застосуванні МРГК.

3. Удосконалено оцінку ризиків з урахуванням системного багаторівневого аналізу на основі методу Файн-Кінні для трирівневої ієрархічної системи «МРГК-технологічне обладнання-техногенна безпека», що використано для оцінки рівня техногенної безпеки під час застосування різних ущільнювальних систем.

4. Подальшого розвитку набули питання теоретичного обґрунтування й експериментального дослідження теплових процесів при магніторідинній герметизації, а саме встановлено, що температурний розігрів технічних магнітних рідин за всіх швидкостей зсуву, коли магнітні сили домінують над відцентровими, не перевищує 5 °С. У роботі запропоновано варіант оцінки рівня екологічності безпечних процесів в зазорі магніторідинного герметизатора без врахування складних теплових взаємодій, але з високим рівнем достовірності.

5. Уперше розроблено узагальнену математичну модель взаємозалежних магнітних, електричних і гідромеханічних полів у робочому зазорі МРГ на основі мультифізичного моделювання. Проведені за наданою моделлю дослідження

дозволили суттєво розширити сферу застосування МРГК і отримати такі наукові результати, підтверджені потім експериментально та шляхом узагальнення досвіду експлуатації МРГК:

- експлуатація МРГК можлива при величинах зазорів, що значно перевищують 0,3 мм; урахування процесів, що відбуваються в активній зоні герметизатора, та внесення конструктивних змін дають змогу збільшити величину робочого зазору до 0,8 мм;

- вихрові структури, що виникають у магнітній рідині та утворені радіальним і азимутальним компонентами швидкості, дозволяють забезпечити стійку працездатність МРГК до лінійних швидкостей порядку 35 м/с;

- електропровідність технічних магнітних рідин як мінімум на три порядки нижче того значення електропровідності, за якого можливий розігрів валу, виникнення анодних струмів тощо.

Отримані результати проведених досліджень працездатності МРГК показали високу ефективність їх застосування для підвищення рівня техногенної безпеки, відзначили можливості розширення сфери впровадження даного виду герметизації на виробництві.

6. Уперше розроблена математична модель процесів, що відбуваються в робочому зазорі МРГК під час додавання феромагнітних мікронних частинок, дала підстави довести, що підвищення рівня техногенної безпеки технологічного обладнання з МРГК при робочих зазорах до 1 мм можливо шляхом самокорекції робочого зазору за допомогою додавання феромагнітного мікронного порошку з концентрацією 1 г на 10 мл МР. Отримані теоретичні результати обґрунтовано експериментально, підтверджено висновками з аналізу досвіду експлуатації МРГК. За даним напрямом роботи отримано патент України на винахід на конструкцію магніторідинного ущільнення з автоматичною корекцією робочого зазору.

7. Уперше встановлено, що для магнітних рідин, температура затвердіння яких перевищує кімнатні, їх температурна залежність магнітної сприйнятливості має гострий максимум в області температур затвердіння, що пояснюється блокуванням броунівських ступенів свободи найбільш великих часток. Зроблено висновок, що причиною виникнення пологого максимуму в області низьких температур, де зразок знаходиться у твердому стані, є зміна механізму релаксації магнітного моменту основної кількості однодомених частинок, а саме перехід цих частинок із феромагнітного стану в суперпарамагнітний у разі підвищення температури.

8. Уперше доведено, що дія магнітного поля уповільнює випаровуваність магнітної рідини порівняно з її дисперсійним середовищем. Теоретично й експериментально доведено, що магнітна рідина із середнім розміром частинок до 8 нм і кількістю кластерів і агрегатів, сумарний внесок яких у початкову магнітну сприйнятливості МР не перевищує 5 %, зберігає седиментаційну стійкість протягом не менше 25 років у разі дотримання правил її зберігання, що підвищує довговічність і ресурс МРГК, таким чином підвищує рівень екологічної та техногенної безпеки відповідно.

9. Уперше розроблено метод експрес-аналізу динамічних характеристик

магнітної рідини, в основі якого лежить силовий вплив неоднорідного магнітного поля на феромагнітні частинки в рідині. Встановлено, що седиментаційною стійкістю відзначатиметься така МР, зміна магнітної сили якої протягом 10–15 хв не перевищить 3 %. Таким чином, підприємства, що експлуатують МРГК, отримують можливість швидко контролювати якість МР, забезпечуючи при цьому надійність МРГК та дотримання вимог екологічної безпеки навколишнього середовища.

10. Уперше запропоновано використовувати відносну в'язкість магнітної рідини як критерій якості МР, що дозволяє проводити її перевірку в місці експлуатації та за рахунок цього підвищити надійність МРГК і рівень техногенної безпеки. Відношення в'язкості, заміряної в рідині, вміщеній у магнітне поле і поза ним, не перевищує коефіцієнт 2,5.

11. Практична цінність отриманих результатів дисертаційної роботи визначена на основі аналізу досвіду експлуатації електродвигунів серій ВАСО та СДН:

- інтенсивність відмов електродвигунів ВАСО із комплектацією штатними ущільненнями залежить від сезонних змін кліматичних умов і досягає максимального значення в зимовий період, при застосуванні МРГК не відзначено такої залежності, їх експлуатаційні показники є стабільними протягом року;

- експлуатація електродвигунів серії ВАСО з МРГК не залежить від режимів їх роботи, а в разі комплектації штатними ущільненнями найважчим є повторно-короткочасний режим S3;

- застосування МРГК дозволяє знизити рівень техногенного ризику ущільнювальної системи в 4–7 разів, при цьому відзначено перерозподіл відмов електродвигуна з пошкоджень підшипникових вузлів на пошкодження обмоток статора зі зниженням абсолютних величин цих відмов;

- аналіз оцінки ризиків для синхронних електродвигунів серії СДН виробництва ТОВ «ЗКЕМ» (м. Нова Каховка) за різних умов експлуатації, потужності й обертах валу засвідчив зниження техногенного ризику під час упровадження МРГК у діапазоні 1,5–4 рази.

12. Більшість результатів теоретичних, експериментальних і проектних досліджень узагальнено у відповідних положеннях технічних умов, які погоджені з провідними інститутами та заводами, що проектують і виготовляють обладнання, на яке встановлюються МРГК й затверджені. Це дозволило мати можливість розширити межі запровадження МРГК у промислове виробництво.

13. Практична цінність запропонованих у роботі рекомендацій підтверджуються як експериментом, так і досвідом промислової експлуатації МРГК, створених на основі результатів виконаних досліджень. За більш ніж двадцятирічний термін упроваджено понад 4000 МРГК на майже 200 промислових підприємствах небезпечних виробництв в Україні, Росії, Білорусі, Молдові, Узбекистані, Казахстані, Естонії. Проведений протягом цих років авторський нагляд за ефективністю отриманих результатів проведених досліджень при експлуатації МРГК мав позитивний ефект. П'ять електромашинобудівних заводів України і Росії серійно випускають електродвигуни, до складу яких входить МРГК, серійно встановлюються МРГК на поворотних редукторах шахтних комбайнів.

14. Теоретично обґрунтовано та практично доказано, що впровадження МРГК дозволяє запобігти аварійним зупинкам обладнання, зумовлених незадовільною роботою ущільнень; різко збільшити (не менше, ніж у 2 рази) міжремонтний період експлуатації обладнання; скоротити витрати, пов'язані з ремонтом: як витрати з демонтажу устаткування, так і витрати для заміни комплектуючих (наприклад, підшипників до 4 разів). Позитивним є факт зростання економічних показників результативності екологічної безпеки при застосуванні МРГК.

Таким чином, техніко-економічний ефект запропонованих новітніх рішень науково-прикладного характеру визначається зниженням кількості аварійних ситуацій з негативними наслідками (до 4 разів), причиною яких була незадовільна робота ущільнювальних систем, що сприяє підвищенню екологічних показників технологічного обладнання небезпечних виробництв.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Марцинковський В.А., Тарельник В.Б., Антошевський Б., Марцинковський В.С., Радіонов О.В., Коноплянченко Е.В., Гапонова О.П., Позовній О.О. Екологічна безпека експлуатації компресорного і насосного обладнання: монографія, за ред. О.В. Радіонова. Суми: Сумський державний університет, 2018. 282 с.

*Здобувачу належить розділ 1 «Підвищення рівня техногенної безпеки при використанні магніторідинних герметизуючих комплексів в процесах експлуатації електродвигунів».*

2. Радионов А.В. Магнитожидкостные устройства в холодильной технике. *Холодильная техника и технология*. 1999. № 62. С. 126–131.

3. Радионов А.В., Красников Г.В., Гасюк А.А., Чащин В.В. Герметизация выходных валов электродвигателей типа ВАСО. *Взрывозащищенное электрооборудование: сборник научных трудов УкрНИИВЭ*. Донецк: Юго-Восток. 2001. С. 44–49.

*Здобувач розробив науково-технічні основи конструктивного виконання МРГ для електродвигунів типу ВАСО.*

4. Радионов А.В., Белый В.Ф., Виноградов А.Н. НПП «Феррогидродинамика» – десять лет работы с предприятиями металлургической промышленности. *Теория и практика металлургии*. 2001. №1(21). С. 60–63.

*Здобувач узагальнив досвід експлуатації МРГ на підприємствах металургійної промисловості.*

5. Радионов А.В., Виноградов А.Н. Влияние центробежной силы на работоспособность высокоскоростного магнитожидкостного герметизатора. *Збірник наукових праць УДМТУ. Миколаїв, УДМТУ*, 2001. №4 (376). С. 119–129.

*Здобувач надав аналітичний аналіз взаємовпливу відцентрових і магнітних сил у робочому зазорі МРГК.*

6. Радионов А.В., Селезов И.Т. Анализ возможности применения магнитожидкостных устройств в космической технике. *Космична наука і технологія*. 2002. Додаток № 2, Том 8. С. 375–380.

*Здобувач розробив аналітичну модель, що враховує вплив відцентрових сил у зазорі МРГК.*

7. Радионов А.В., Чашин В.В., Красников Г.В., Гасюк А.А., Семенидо Б.Е. Асинхронные двигатели серии ВАСО4 с магнитожидкостными герметизаторами. *Взрывозащищенное электрооборудование. сборник научных трудов УкрНИИВЭ*. Донецк: Юго-Восток. 2004. С. 73–81.

*Здобувач обґрунтував вибір раціональних конструктивно-технологічних схем МРГК.*

8. Радионов А.В., Виноградов А.Н., Мельниченко А.А., Хабазня А.С. Магнитожидкостные герметизаторы выходных валов для поворотных редукторов комбайнов. *Уголь Украины*. 2005. №2. С. 20–22.

*Здобувач проаналізував вплив умов експлуатації в шахтах на працездатність МРГК вугільних комбайнів.*

9. Радионов А.В., Виноградов А.Н. Комбинированные магнитожидкостные герметизаторы – эффективная альтернатива бесконтактным уплотнениям подшипниковых узлов с жидкой смазкой. *Науково - технічний збірник "Збагачення корисних копалин"*. 2008. Вип. 35 (76). С. 148–155.

*Здобувач обґрунтував можливість заміни лабіринтових ущільнень на МРГК для виносних підшипникових стійок великих електричних машин.*

10. Радионов А.В. Использование магнитожидкостных герметизаторов на углеобогадательных предприятиях. *Науково - технічний збірник "Збагачення корисних копалин"*. 2010. Вип. 41 (82)–42 (83). С. 295–308.

11. Хабазня А.С., Радионов А.В., Виноградов А.Н., Казакуца А.В. Особенности проектирования магнитожидкостных герметизаторов шахтного оборудования. *Уголь Украины*. 2010. №12 (648). С. 29–33.

*Здобувач розробив рекомендації для проектування МРГ шахтного устаткування.*

12. Селезов И.Т., Радионов А.В. Моделирование температурного поля феррожидкости в зазоре. *Науковий збірник "Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології"*. 2011. Вип. 14. С.143–152.

*Здобувач розробив аналітичну модель розподілу температурних полів у зазорі МРГ.*

13. Радионов А.В. Опыт эксплуатации магнитожидкостных герметизаторов в промышленной энергетике. *Науково-технічний збірник "Гірнична електро-механіка та автоматика"*. Дніпропетровськ. 2011. Вип. 87. С. 134–139.

14. Радионов А.В., Подольцев А.Д., Рыжков С.С. Магнитные и электрические процессы в объеме вала, вращающегося в постоянном магнитном поле магнитожидкостного герметизатора. *Вісник НУК імені адмірала Макарова*. 2012. № 1. С. 15–23.

*Здобувач проаналізував дані комп'ютерного експерименту.*

15. Радионов А.В. О повышении надежности аппаратов воздушного охлаждения. *Сталий розвиток и штучний холод. Збірник наукових праць VIII Міжнародної наук.-техн. конф.* Херсон: Гринь Д.С., 2012 (додаток до журналу «Холодильна техніка і технологія (вип. 4 (138), 2012). С. 226–231.

16. Радионов А.В., Борцов А.С. Компьютерное моделирование магнитных и гидродинамических процессов в зависимости от величины зазора

магнитожидкостного герметизатора. *Науково-технічний збірник "Збагачення корисних копалин"*. 2013. Вип. 52 (93). С. 24–33.

*Здобувач проаналізував залежності магнітної індукції в робочому зазорі МРГ від його величини.*

17. Радионов А.В., Рыжков С.С. Магнитожидкостные герметизирующие комплексы. *Збірник наукових праць НУК*. 2013. №4. С. 44–51.

*Здобувач обґрунтував введення терміна – магніторідинні герметизуючі комплекси.*

18. Радионов А.В., Подольцев А.Д., Вишняков В.Ф. Магнитожидкостные герметизаторы и их применение в электроэнергетическом оборудовании. *Гідроенергетика України*. 2013. №3–4. С. 33–36.

*Здобувач проаналізував застосування МРГ в електроенергетиці.*

19. Радионов А.В. Повышение промышленной и экологической безопасности шахтных вентиляторов главного проветривания. *Вісник НУК імені адмірала Макарова*. 2013. №4. Електронне видання. Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.15589/evn20130408>

20. Радионов А.В., Куникин С.А., Полежаева С.А. Повышение техногенной безопасности эксплуатации оборудования с увеличенными радиальными зазорами. *Вісник НУК імені адмірала Макарова*. 2014. № 1. Електронне видання. Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.15589/evn20140108>

*Здобувач розробив шляхи підвищення техногенної безпеки під час експлуатації МРГ зі збільшеними зазорами.*

21. Радионов А.В., Подольцев А.Д. Магнитожидкостные герметизаторы как средство повышения экологической безопасности технологического оборудования ГЭС. *Гідроенергетика України*. 2014. № 2–3. С. 58–62.

*Здобувач проаналізував шляхи підвищення працездатності магніторідинних герметизаторов для підвищення рівня екологічної безпеки.*

22. Радионов А.В. О повышении надежности технологического оборудования предприятий ТЭК при использовании магнитожидкостных герметизирующих комплексов. *Журнал інженерних наук*. 2014. Том 1, № 1. С. 8–15.

23. Радионов А.В., Подольцев А.Д. Электрические процессы в зазоре магнитожидкостного герметизатора. *Вісник НТУУ «КПІ»: Серія машинобудування*. 2014. № 2 (71). С. 103–110.

*Здобувач проаналізував електричні процеси у робочому зазорі МРГ.*

24. Радионов А.В. Повышение экологической безопасности оборудования газоперекачивающих станций. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2014. № 4 (38). С. 46–51

25. Радионов А.В. Влияние режимов работы асинхронных электродвигателей на их работоспособность. *Вісник СНАУ. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. Вип. 10/1 (29). 2016. С. 156–161.

26. Радионов А.В., Харламова Е.В. Повышение уровня экологической безопасности при использовании магнитожидкостных герметизаторов и частотных преобразователей в процессах эксплуатации электродвигателей серии ВАСО. *Науковий журнал "Екологічна безпека"*. №2 (22). 2016. С. 9–15.



*Здобувач обробив статистичні матеріали і оцінив техногенний ризик під час спільного використання МРГ і частотних перетворювачів.*

27. Радионов А.В. Влияние магнитовязкого эффекта на работоспособность и безопасность магнитожидкостных герметизаторов. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2016. № 4 (46). С. 19–23.

28. Радионов А.В., Радионова А.А., Подольцев А.Д. Экспериментальное исследование динамических процессов в магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле герметизатора вращающегося вала. *Технічна електродинаміка*. 2017. №2. С. 77–82. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач проаналізував експериментальні дані.*

29. Радионов А.В., Гуляев А.А. Повышение эксплуатационной надежности аппаратов с мешалками путем применения магнитожидкостных герметизаторов. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2017. № 3 (49). С. 25–29.

*Здобувач розробив науково-технічні основи конструктивно-технологічного виконання МРГ для апаратів із мішалками.*

30. Тарельник В.Б., Гапонова О.П., Радионов А.В. Повышение уровня экологической безопасности при использовании интегрированных способов повышения качества стальных деталей. *Міжсвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк: 2018. Вип. № 63. С. 214–221.

*Здобувач проаналізував шляхи підвищення рівня екологічної безпеки.*

31. Plyatsuk L.D., Tarelnyk V.B., Kundera Cz., Radionov O.V., Gaponova O.P. Ecologically Safe Process for Sulfo-Aluminizing Steel Parts. *Journal of Engineering Sciences*. 2018. Vol. 5, Iss. 1. P. 16–21.

*Здобувач проаналізував немагнітопровідні матеріали за критеріями екологічної безпеки.*

32. Глыва В.А., Подольцев А.Д., Болибрух Б.В., Радионов А.В. Тонкий электромагнитный экран композиционной структуры, выполненный на основе магнитной жидкости. *Технічна електродинаміка*. 2018. №4. С. 14–18. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач обґрунтував вибір типу МР для проведення досліджень.*

33. Радионов А.В., Подольцев А.Д., Печкис Г. Особенности работы высокоскоростных магнитожидкостных герметизирующих комплексов. *Международный научно-технический журнал «Mechanics and Advanced Technologies»*. 2018. Вып. № 2 (83). С. 57–63.

*Здобувач проаналізував вплив високих лінійних швидкостей у зазорі МРГК на його працездатність.*

34. Радионов А.В., Жарков П.Е., Тарельник В.Б. Анализ нестационарного температурного поля при запуске магнитожидкостного герметизатора. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2018. № 1(51). С. 6–12.

*Здобувач розробив аналітичну модель розподілу температурних полів за нестационарного режиму.*

35. Кода Н.А., Радионов А.В. Повышение надежности работы электродвигателей градиентной оборотной технической воды. *Сталь*. 1998. № 4. С. 76–77. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач проаналізував досвід експлуатації МРГ на коксохімічних заводах.*

36. Radionov A.V., Kirillyuk A.F., Gursky N.I.. Pilot experimental tests of magnetic fluid sealing for Raimond type mill. *Магнитная гидродинамика*. 1998. Т. 34, № 4. P. 396–400. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач обґрунтував можливості використання МРГ для ущільнення середовищ, що містять абразивні частинки.*

37. Радионов А.В., Виноградов А.Н., Горнов В.А., Чащин В.В., Красников В.Г., Гасюк А.А., Семенидо Б.Е., Вайсман В.Е. Асинхронные двигатели серии ВАСО4 с магнитожидкостными герметизаторами. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2004. №3. С. 29–32. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач розробив науково-технічні основи конструктивної схеми МРГК під час проектування нового електродвигуна.*

38. Гладких Д.В., Диканский Ю.И., Балабанов К.А., Радионов А.В. О влиянии структурной организации на релаксацию магнитного момента дисперсных частиц в магнитной жидкости. *Журнал технической физики*. 2005. Том 75, Вып. 10. С.139–143. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач здійснив аналіз експериментальних даних, обговорив та узагальнив результати.*

39. Radionov A., Podoltcev A., Zahorulko A.. Finite – Element Analysis of Magnetic Field and the Flow of Magnetic Fluid in the Core of Magnetic – Fluid Seal for Rotational Shaft. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 39. P. 327–338. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач розробив мультифізичну модель.*

40. Chiricov D., Iskakova L., Zubarev A., Radionov A. On the theory of rheological properties of bimodal magnetic fluids. *PHYSICA A*. 2014. Vol. 406. P. 298 – 307. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач розробив моделі взаємодії мікронних і наночастинок ферромагнітного матеріалу.*

41. Lopez – Lopez M.T., Zubarev A., Chirikov D., Radionov A. Viscoelastic properties of Magnetic fluids with fiberline particles. *Magnetohydrodynamics*. 2014. Vol. 50, No. 4. P. 389–396. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач обґрунтував можливість застосування моделі взаємодії мікро- і наночастинок для стрижневих наночастинок.*

42. Диканский Ю.И., Гладких Д.В., Куникин С.А., Радионов А.В. Магнитная восприимчивость магнитной жидкости на кремнийорганической основе в электрическом и магнитном полях. *Письма в журнал технической физики*. 2015. Том 41, Вып. 4. С. 96–102. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач здійснив аналіз та узагальнення експериментальних даних.*

43. Диканский Ю.И., Испирян А.Г., Куникин С.А., Радионов А.В. О природе максимума температурной зависимости магнитной восприимчивости магнитных жидкостей. *Журнал технической физики*. 2015. Том 85, вып. 8. С. 100–104. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач здійснив аналіз та узагальнення експериментальних даних.*

44. Пшеничников А.Ф., Лебедев А.В., Радионов А.В., Ефремов Д.В. Маг-

нитная жидкость для работы в сильных градиентных полях. *Коллоидный журнал*. 2015. Том 77, № 2. С. 207–213. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач проаналізував структуроутворення в МР на основі вакуумного масла ВМ-3.*

45. Dikansky Yu., Ispiryayn A., Kunikin S., Radionov A. Effects of a superparamagnetic state of particles of a paraffin based magnetic colloid. *Solid State Phenomena*. 2015. Vol. 233–234. P. 297–301. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач обґрунтував проведення досліджень магнітної рідини на парафіновій основі, проаналізував експериментальні результати.*

46. Радионов А.В. Применение магнитожидкостных герметизаторов для повышения надежности аппаратов воздушного охлаждения. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2015. №7. С. 27–31. (**Scopus, Web of Science**).

47. Radionov A.V., Podoltsev A.D., Radionova A.A. Express-method for determining the quality of a magnetic fluid for operation in the working gap of a magnetic fluid seal. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 233 (2017) 012038 doi: 10.1088/1757 – 899X/233/1/012038. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач обґрунтував достовірність експрес-методу визначення якості МР.*

48. Диканский Ю.И., Испирян А.Г., Куникин С.А., Радионов А.В. Особенности намагничивания магнитных коллоидных наносистем на парафиновой основе. *Журнал технической физики*. 2018. Том 88, Вып. 1. С. 58–63. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач здійснив узагальнення та аналіз експериментальних досліджень.*

49. Radionov A. Magnetic fluid sealing complexes for bearing assemblies of mine main ventilation fans. *Magnetohydrodynamics*. 2018. Vol. 54, No. 1–2. P. 109–114. (**Scopus, Web of Science**).

50. Radionov A., Podoltsev A., Peczkis G. The specific features of high velocity magnetic fluid sealing complexes. *Open Engineering*. 2018. Vol. 8, Issue. 1. P. 539–544. (**Scopus, Web of Science**).

*Здобувач проаналізував результати комп'ютерного експерименту й обґрунтував технологічну схему МРГК.*

51. Радионов А.В. Применение магнитожидкостных устройств в холодильной технике. *Вестник Международной Академии Холода*. 1999. № 4. С. 45 – 49.

52. Радионов А.В., Белый В.Ф. Магнитожидкостные герметизаторы. *Сборка в машиностроении и приборостроении*. 2001. № 7(13). С. 32 – 35.

*Здобувач розробив науково-технологічні основи збору та монтажу МРГ.*

53. Радионов А.В., Уваров Н.В. Анализ опыта работы магнитожидкостных герметизаторов на СГПП «Объединение Азот». *Химическая техника*. 2003. № 9. С. 26–29.

*Здобувач здійснив техніко-економічний аналіз упродовження МРГ.*

54. Radionov A.V. Eksploatacja uszczelnien z cieczy magnetyczna w ukraińskich i rosyjskich zakładach przemysłu chemicznego. *Hydraulika i Pneumatyka*. 2004. № 5. S. 21–26. (на польській мові).

*Здобувач проаналізував досвід експлуатації МРГ.*

55. Радионов А.В., Виноградов А.Н. Особенности разработки магнито-

жидкостных герметизаторов для уплотнения сыпучих абразивных сред. *Химическая техника*. 2006. № 9. С. 16–19.

*Здобувач обґрунтував застосування МРГ для ущільнення сиучих середовищ.*

56. Радионов А.В., Виноградов А.Н. Комбинированные высокоскоростные магнитожидкостные герметизаторы взамен бесконтактных уплотнений подшипников скольжения. *Химическая техника*. 2008. № 12. С. 14–18.

*Здобувач обґрунтував можливість застосування МРГ замість безконтактних ущільнень.*

57. Радионов А.В., Виноградов А.Н. Повышение надежности подшипниковых узлов редукторов привода вентиляторов градирен NEMA. *Химическая техника*. 2012. № 2. С. 12–15.

*Здобувач проаналізував надійність МРГ для редукторів градирень NEMA.*

58. Радионов А.В., Виноградов А.Н., Слепченко А.И., Ивашин А.А. Магнитожидкостные герметизаторы подшипников привода компрессора диоксида углерода. *Химическая техника*. 2013. № 9. С. 24–27.

*Здобувач проаналізував досвід експлуатації МРГ для приво́ду компрессора карбаміду.*

59. Радионов А.В., Курок А.В. Повышение промышленной безопасности технологического оборудования путем применения магнитожидкостных герметизаторов. *Охрана труда и социальная защита*. 2015. № 1. С. 54 – 58.

*Здобувач проаналізував вплив МРГ на рівень техногенної безпеки технологічного обладнання.*

60. Радионов А.В. Опыт эксплуатации магнитожидкостных герметизаторов на нефтеперерабатывающих заводах стран СНГ. *Химическая техника*. 2015. №10. С. 11–17.

61. Радионов А.В., Панченко А.А., Шумейко А.П. Внедрение магнитожидкостных герметизаторов для электродвигателя типа СТД – 3150 в ПАО «Укртатнафта». *Химическая техника*. 2016. № 9. С. 20–24.

*Здобувач розробив методологію створення МРГК за високих лінійних швидкостей у робочому зазорі.*

***Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації:***

62. Radionov A.V., Vinogradov A.N. The application of magnetic fluid seals in refrigerating engineering. *Advances in the Refrigeration Systems, Food Technologies and Cold Chain. Abstracts of International Conference*. Sofia, Bulgaria, 1998. P. 599–604.

63. Radionov A.V., Vinogradov A.N. Magnetic fluids seals for bearing units of largesize electrical machines. *Abstracts of 9<sup>th</sup> International conference on Magnetic Fluids: Abstracts*. Bremen, Germany, 2001. P. 418.

64. Radionov O.V., Leitara S.V., Kirichkov A.V., Vinogradov O.N., Radionova N.V., Bilotserkivets G.I. The study of the density of heat in the gap of a high-speed magnetic fluid seal. *Abstracts of International workshop on recent advances in nanotechnology of Magnetic fluids (RANMF – 2003)*. New Delhi, India, 2003. P. 134–136.

65. Radionov O.V., Vinogradov A.N. Economical Aspects of Magnetic Fluid Seal Application. *Seals and sealing Technology in Machines and Devices: collection of scientific papers of X<sup>th</sup> International Conference*. Wroclaw-Polanica Zdroj. Wroclaw:

SIMP Osrodek Doskonalenia Kadr, 2004. P. 311–318.

66. Радионов А.В. О применении магнитожидкостных устройств в энергетике. *Проблемы энергосбережения, безопасности, экологии в промышленной и коммунальной энергетике: материалы XV Международной конференции.* Ялта, 2005. С. 32–35.

67. Radionov A.V., Kosarev I.V. The characteristics of magnetic fluid seal assembly for chemical production. *Abstracts of 11<sup>th</sup> International Conference on Magnetic Fluids ICMF11.* Kosice, Slovakia. 2007. P. 702.

68. Radionov A.V. The application of magnetic fluid seals in cogenerative plants. *Seals and Sealing Technology of Machine and Device: collection of scientific paper of XI<sup>th</sup> International Scientific – Technical Conference.* – Wroclaw-Kudowa Zdroj. Wroclaw: Osrodek Doskonalenia Kadr SIMP, 2007. P. 170–173.

69. Radionov A.V., Vinogradov A.N. The Application of Magnetic fluid seals for ventilators and pumps drives. *Wentylatory I Pompy Przemyslowe: Prace naukowe. VII Miedzynarodowa Konferencja.* Szczyrk.Gliwice, 2007. P. 251–257.

70. Радионов А.В. Анализ наиболее рациональных областей применения магнитожидкостных герметизаторов. *Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machiner: collection of scientific paper of 12<sup>th</sup> International Scientific and Engineering Conference.* Kielce-Przemys I. Vol. II. Kielce: Wydawnictwo Politechniki Swietokrzyskiej, 2008. P. 55–65.

71. Radionov O., Gurskyi A., Vinogradov O., Kazakutsa O. The increase of the working gap in magnetic fluid seals of bearing units for largesize electrical engines. *Abstracts of 12<sup>th</sup> International Conference on Magnetic Fluids. ICMF12.* Sendai, Japan. 2010. P. PS1–1039.

72. Радионов А.В., Хабазня А.С., Виноградов А.Н., Казакуца А.В. Особенности проектирования магнитожидкостных герметизаторов шахтного оборудования. *Сборник научных трудов 14-ой Международной Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям. сентябрь 2010.* Иваново: ИГЭУ, 2010. С. 360–367.

73. Зубарев А.Ю., Чириков Д.Н., Радионов А.В. К теории реологических свойств бидисперсных магнитных суспензий. *Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем: сборник научных трудов IV Всероссийской научной конференции.* Ставрополь: ГОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», 2013. С. 101–106.

74. Радионов А.В. Повышение экологической безопасности при эксплуатации шахтных стационарных установок. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції.* Миколаїв: НУК, 2014. С. 50–53.

75. Радионов А.В. Оценка техногенного риска при эксплуатации судового электрооборудования. *Суднова енергетика: стан та проблеми: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. Ч. 1.* Миколаїв: НУК, 2015. С. 185–187.

76. Радионов А.В. Опыт эксплуатации магнитожидкостных герметизаторов на нефтеперерабатывающих заводах стран СНГ. *Основные направления повышения*

*энергоэффективности нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий: материалы совещания.* М.: ООО «НТЦ при Совете главных механиков», 2015. С. 144–158.

77. Радионов А.В. Влияние климатических факторов на техногенный риск уплотнительных систем асинхронных двигателей. *Проблеми екологічної безпеки: збірник тез доповідей XIV Міжнародної науково-технічної конференції.* Кременчук: КрНУ, 2016. С. 135.

78. Радионов А.В. Системный анализ техногенной безопасности уплотнительных систем электродвигателей. *Проблеми екологічної безпеки: збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції.* Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2017. С. 59–60.

79. Радионов А.В. Модернизация технологического оборудования как путь повышения техногенной безопасности опасных производств. *Проблеми екологічної безпеки: матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції.* Кременчук: КрНУ, 2018. С. 78–79.

***Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:***

80. Виноградов А.Н., Радионов А.В., Чащин В.В., Гасюк А.А., Красников Г.В. Электрическая машина: патент на изобретение 2161851 Россия: (51)7H02K5//24,F16J15/43, № 99110785/09; заявл. 24.05.1999; опубл. 10.01.2001, Бюл. № 1. 10с.

81. Радіонов О.В., Виноградов О.М., Білий В.Ф., Казакуца О.В., Махов Г.Г., Луговской В.Г., Мельниченко О.О., Хабазня О.С. Магніторідинне ущільнення: патент на винахід 72005 Україна: (51)7F16J15/43, № 2002043663; заявл. 30.04.2002; опубл. 17.01.2005, Бюл. № 1. 6с.

82. Радіонов О.В., Виноградов О.М. Магніторідинне ущільнення : патент на винахід 80898 Україна: (51) МПК (2006) F16J15/00, № а 2006 00916; заявл. 01.02.2006; опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12. 6с.

83. Радіонов О.В., Виноградов О.М., Казакуца О.В., Тихонов А.С., Гурський А.М. Магніторідинне ущільнення та спосіб виготовлення магніторідинного ущільнення: патент на винахід 83876 Україна: (51) МПК (2006) F16J15/40,F16J15/43 (2008.01), а 2006 05990; заявл. 30.05.2006; опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16. 8с.

84. Радіонов О.В., Виноградов О.М., Казакуца О.В., Тихонов А.С. Магніторідинне ущільнюючий пристрій: патент на винахід 85068 Україна: (51) МПК (2006) F16J15/40, а 2006 05742; заявл. 25.05.2006; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24. 6с.

85. Радіонов О.В., Виноградов О.М. Магніторідинне ущільнення з автоматичною корекцією робочого зазору: патент на винахід 106420 Україна: (51) МПК (2014.01) H01F7/00, H01F7//28 (2006.01), а 2012 12720; заявл. 08.11.2012; опубл. 26.08.2014, Бюл. № 16. 7с.

## АНОТАЦІЯ

**Радіонов О. В. Наукові та прикладні основи магніторідинної герметизації, що забезпечує екологічну безпеку шкідливих виробництв. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. – Сумський державний університет, Суми, 2020. Спеціалізована вчена рада Д 55.051.04.

Дисертаційна праця присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми зниження рівня техногенного навантаження небезпечних виробництв шляхом створення умов їхньої безаварійної роботи, усунення відмов на устаткуванні, що експлуатується, а також загроз травматизму обслуговуючого персоналу шляхом застосування в елементах технічних систем магніторідинних герметизуючих комплексів.

Виявлені основні проблеми і причини виходу з ладу технологічного обладнання, зокрема нездатність штатних ущільнювальних систем забезпечити повну герметичність. Обґрунтовано науково-методологічний підхід до вирішення проблеми про недопущення накопичення дефектів та подальшого розвитку аварійних ситуацій шляхом застосування магніторідинних герметизуючих комплексів, що дозволило підвищити рівень екологічної безпеки небезпечних виробництв.

Проведені дослідження фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей магнітних рідин і магніторідинних герметизаторів. Отримані такі наукові результати: температурний розігрів технічних магнітних рідин за всіх швидкостей зсуву, коли магнітні сили домінують над відцентровими, не перевищує 5°C; забезпечення надійної експлуатації при збільшених зазорах відбувається шляхом самокорекції за допомогою додавання феромагнітного мікронного порошку; розроблена мультифізична математична модель дала можливість дослідити процеси та явища різної фізичної природи, та підстави обґрунтувати можливість збільшення зазору до 0,8 мм і забезпечення стійкої працездатності до лінійних швидкостей 35 м/с.

Вперше обґрунтовано та реалізовано принцип оцінки рівня техногенної безпеки небезпечних виробництв, який розвиває методологію системних досліджень в екологічній безпеці та уможливорює створення комплексних підходів до зниження ризику техногенних аварій шляхом розроблення конструктивних рішень МРГК, що дозволило до 7 разів зменшити величину техногенного ризику.

Практична значущість роботи підтверджена результатами впровадження екологічно безпечних конструктивних і технологічних рішень із проектування МРГК, що дало можливість організувати експлуатацію близько 4000 МРГК на майже 200 промислових підприємствах небезпечних виробництв у семи країнах, а також патентами України на винахід.

**Ключові слова:** екологічна безпека, техногенне навантаження, магнітна рідина, магніторідинний герметизуючий комплекс, небезпечне виробництво, системний аналіз, електродвигун, математична модель.

## АННОТАЦИЯ

**Радионов А.В. Научные и прикладные основы магнитожидкостной герметизации, обеспечивающей экологическую безопасность вредных производств. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 21.06.01–экологическая безопасность. – Сумский государственный университет, Сумы, 2020. Специализированный ученый совет Д 55.051.04.

Диссертационная работа посвящена решению научно-прикладной проблемы снижения уровня техногенной нагрузки опасных производств путем создания условий их безаварийной работы, устранения отказов на эксплуатирующемся оборудовании и угроз травматизма обслуживающего персонала путем применения в элементах технических систем магнитожидкостных герметизирующих комплексов.

Определены основные проблемы и причины выхода из строя технологического оборудования, в частности неспособность штатных уплотняющих систем обеспечить полную герметичность. Обоснован научно-методологический подход к решению проблемы о недопущении накопления дефектов и дальнейшего развития аварийных ситуаций путем применения магнитожидкостных герметизирующих комплексов, что позволяло повысить уровень экологической безопасности опасных производств.

Проведены исследования физико-химических и эксплуатационных свойств магнитных жидкостей и магнитожидкостных герметизаторов. Получены такие научные результаты: температурный разогрев технических магнитных жидкостей при всех скоростях сдвига, когда магнитные силы превосходят центробежные, не превышает  $5^{\circ}\text{C}$ ; возможность обеспечения надежной эксплуатации при увеличенных зазорах путем самокорректировки с помощью добавления ферромагнитного микронного порошка; разработанная мультифизическая математическая модель позволила исследовать процессы и явления различной физической природы и обосновать возможность увеличения зазора до 0,8 мм и обеспечения устойчивой работоспособности до линейных скоростей 35 м/с.

Впервые обоснован и реализован принцип оценки уровня техногенной безопасности опасных производств, развивающий методологию системных исследований в экологической безопасности и позволяющий создать комплексные подходы к снижению риска техногенных аварий путем разработки конструктивных решений МЖГК, обеспечивших до 7 раз уменьшение величины техногенного риска.

Практическая значимость работы подтверждена результатами внедрения экологически безопасных конструктивных и технологических решений по проектированию, на основании которых была организована эксплуатация около 4000 МЖГК на почти 200 промышленных предприятиях опасных производств в семи странах, а также патентами Украины на изобретение.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, техногенная нагрузка, магнитная жидкость, магнитожидкостный герметизирующий комплекс, опасное производство, системный анализ, электродвигатель, математическая модель.



## ABSTRACT

**Radionov O.V. Scientific and applied fundamentals of magnetic fluid sealing, ensuring the environmental safety of hazardous industries. – Qualifying scientific work on the manuscript right.**

Thesis for the degree of Doctor of Engineering Sciences in the specialty 21.06.01 – ecological safety. – Sumy State University, Sumy, 2020. Specialized Scientific Council D 55.051.04.

The thesis work is devoted to solving scientific and applied problems of increasing the level of technogenic safety of hazardous industries by creating conditions for their trouble-free operation, eliminating failures in operating equipment and threats of injury to the operating personnel when using magnetic fluid sealing complexes in technical system elements.

The main problems and reasons for the failure of technological equipment, in particular the inability of standard sealing systems to ensure complete tightness, are identified. The scientific and methodological approach to solving the problem of preventing the accumulation of defects and the further development of emergencies through the use of magnetic fluid sealing complexes was substantiated, which allowed to increase the level of environmental safety of hazardous industries.

The physicochemical and operational properties of magnetic fluids and magnetic fluid seals were studied in order to ensure their implementation on technological equipment, including physically and mentally worn ones

The following scientific results were obtained: the temperature heating of technical magnetic fluids at all shear rates, when the magnetic forces exceed the centrifugal, does not exceed 5 °C; the possibility of ensuring reliable operation with increased gaps by self-correction by adding a ferromagnetic micron powder; a multiphysical mathematical model has been developed to investigate processes and phenomena of various physical nature and to substantiate the possibility of increasing the size of the working gap to 0.8 mm and ensuring stable working capacity of MFSC up to linear velocities of 35 m/s.

For the first time, the principle of assessing the level of technogenic safety of hazardous industries is substantiated and implemented, developing the methodology of system research in environmental safety, which allows creating integrated approaches to reduce the risk of industrial accidents by evolving design solutions of MFSC, which reduce the amount of technological risk up to 7 times.

The practical significance of the work is confirmed by the results of the implementation of environmentally friendly design and technological solutions for the design of the MFSC, which made it possible to organize operation of about 4,000 MFSCs at nearly 200 industrial enterprises of hazardous production facilities in seven countries, has been further developed, as well as patents of Ukraine for invention.

**Keywords:** environmental safety, technogenic load, magnetic fluid, magnetic fluid sealing complex, hazardous production, system analysis, electric motor, mathematical model.