

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**РАДІОНОВ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 502/504:621.318:537.6/.8(043.5)

**ДИСЕРТАЦІЯ**

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

**ЧАСТИНА І**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Галузь знань – технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

О.В. Радіонов

Науковий консультант **Тарельник В'ячеслав Борисович**,  
доктор технічних наук, професор

Суми – 2020

## 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 національний аграрний університет Міністерства освіти і науки України, Суми, 2020.

Захист дисертації відбудеться на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04. Сумський державний університет Міністерства освіти і науки України, Суми, 2020.

У результаті проведення комплексу теоретичних і експериментальних досліджень у дисертації запропоновано та обґрунтовано нові наукові положення, висновки та рекомендації, використання яких дозволяє підвищити рівень екологічної та техногенної 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.

Результати роботи пройшли достатню апробацію та мають впровадження, що підтверджено відповідними актами.

Загалом у дисертаційній роботі одержано наступні результати.

Проаналізовано наукові та практичні аспекти попередніх досліджень із проблем техногенного навантаження на навколишнє середовище шкідливих виробництв. Доведено, що забезпечення екологічної безпеки промислових об'єктів залежить не тільки від правильної оцінки техногенної небезпеки, але і теоретичного узагальнення характерних небезпек технологічних процесів. Обґрунтовано, що екологічні умови забезпечення техногенної безпеки зводяться до безпечної та безаварійної роботи машин, механізмів і

технологічного обладнання, що узгоджується з основним принципом екологічної безпеки - принципом запобігання екологічної небезпеки до її зародження, який можна прогнозувати через оцінку екологічних ризиків. В Україні ситуація ускладнюється у зв'язку з тривалою системною кризою, результатом якої є значний знос і моральне старіння основних фондів.

Проведено аналіз великих техногенних катастроф останніх років, підтверджуючих, що в більшості випадків їх причинами були механічні несправності багатьох видів технологічного обладнання - особливо підшипникових вузлів. Розглянуто умови роботи підшипникових вузлів технологічного обладнання і, на підставі літературних даних, зроблено висновок, що до 90 % випадків аварійних руйнувань підшипників прямо або опосередковано викликано незадовільною роботою ущільнень. Обґрунтовано, що забезпечення високого рівня герметичності можна досягти шляхом застосування магніторідинних герметизаторів.

На основі результатів літературного огляду та логічного аналізу можна зробити висновок про те, що 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 небезпечних виробництв шляхом усунення експлуатаційних відмов і загроз травматизму обслуговуючого персоналу за допомогою магніторідинних герметизуючих комплексів (МРГК) є актуальною науково-прикладною проблемою.

Розроблено алгоритм наукових досліджень в дисертаційній роботі: розгляд процесів, що протікають в МРГК, спочатку аналітично для виявлення закономірностей і взаємозалежностей в загальних рисах; проведення адаптації відомих методів проведення експериментальних досліджень і розробка нових методів і експериментальних стендів для визначення характеристик магнітних рідин (МР) і МРГК; розробка мультифізичної моделі, яка враховує процеси різної фізичної природи в

зазорі МРГК; удосконалення методу Файн-Кінні для оцінки ризику техногенних аварій; впровадження результатів досліджень на підприємствах небезпечних виробництв. Для виключення ролі неконтрольованих фізико-хімічних факторів при технології приготування магнітної рідини була обрана єдина методика хімічного осадження з водних розчинів солей двох- і тривалентного заліза надлишком лугу. Вперше в одному дослідженні вивчалися фізико-хімічні та експлуатаційні властивості МР, виготовлені більш ніж на десяти різних дисперсійних основах, що дозволило поглиблено розглянути питання структуроутворення, седиментаційної стійкості МР, що важливо для забезпечення повної герметичності МРГК та високого рівня технобезпеки.

Вперше обґрунтовано науково-методологічний підхід до вирішення проблеми недопущення накопичення дефектів у технологічному обладнанні з позицій системного аналізу, що дозволило встановити причини техногенних відмов систем безпеки, надати рішення для підвищення рівня техногенної безпеки шляхом застосування магніторідинних герметизуючих комплексів. Встановлено необхідність системної узгодженості працездатності та техногенно-екологічної безпеки для зниження ризику виникнення нештатних аварійних ситуацій, що забезпечується при застосуванні МРГК.

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

Теоретично обґрунтовано й експериментально встановлено, що температурний розігрів технічних магнітних рідин за всіх швидкостей зсуву, коли магнітні сили домінують над відцентровими, не перевищує 5 °С, що дозволило провести дослідження екологічно безпечних процесів в зазорі

магніторідинного герметизатора без врахування складних теплових взаємодій, але з високим рівнем достовірності.

Уперше розроблено узагальнену математичну модель взаємозалежних магнітних, електричних і гідромеханічних полів у робочому зазорі МРГК на основі мультифізичного моделювання. Проведені за наданою моделлю дослідження дозволили суттєво розширити сферу застосування МРГК і отримати наступні наукові результати, підтверджені потім експериментально та шляхом узагальнення досвіду експлуатації МРГК:

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

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 аналізом досвіду експлуатації та виданим патентом України на винахід.

Досліджені особливості кінетики намагнічування технічних магнітних рідин, у тому числі й на основі парафіну, температура затвердіння якого перевищує кімнатні температури. Встановлено, що в області температур затвердіння таких зразків магнітних рідин їх температурна залежність магнітної сприйнятливості отримує гострий максимум, що пояснюється блокуванням броунівських ступенів свободи найбільш великих часток. Зроблено висновок, що причиною виникнення пологого максимуму в області низьких температур, що відповідають твердому стану зразка, є зміна механізму релаксації магнітного моменту основної кількості однодомених частинок – їх перехід із феромагнітного стану в суперпарамагнітний у разі підвищення температури.

Теоретично й експериментально доведено, що магнітна рідина із середнім розміром частинок не більше 8 нм і кількістю кластерів і агрегатів, сумарний внесок яких у початкову магнітну сприйнятливість МР не перевищує 5 %, зберігає седиментаційну стійкість протягом не менше 25 років у разі дотримання правил її зберігання, що підвищує довговічність і ресурс МРГК, а також рівень екологічної та техногенної безпеки відповідно.

Уперше визначено вплив експлуатаційних властивостей МР на умови забезпечення надійної безпеки життєдіяльності людини з урахуванням критичних ситуацій, що виникають під час техногенних аварій. Доведено, що дія магнітного поля уповільнює випаровуваність магнітної рідини порівняно з її дисперсійним середовищем.

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 та МР, зміна магнітної сили

для якої протягом 10 – 15 хв не перевищить 3 %. Таким чином, підприємства, що експлуатують МРГК, отримують можливість просто та швидко контролювати якість МР, забезпечуючи при цьому надійність МРГК та дотримання вимог екологічної безпеки навколишнього середовища.

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.

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, а під час комплектації МРГК не змінюється протягом року;

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

- застосування МРГК дає змогу 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.

Більшість результатів теоретичних, експериментальних і проектних

досліджень узагальнено відповідними технічними умовами, це дозволило мати можливість розширити межі запровадження МРГК у промислове виробництво.

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 експлуатацією МРГК підтверджує високу ефективність отриманих результатів. П'ять електромашинобудівних заводів України і Росії серійно випускають електродвигуни, до складу яких входить МРГК. Також МРГК серійно встановлюються на поворотних редукторах шахтних комбайнів.

Упровадження 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 (підшипників тощо). Позитивним є факт зростання як економічних, так і екологічних показників при застосуванні МРГК.

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



## 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.

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., Чашин В.В. Герметизация выходных валов электродвигателей типа ВАСО. *Взрывозащищенное электрооборудование: сборник научных трудов УкрНИИВЭ*. Донецк: Юго-Восток. 2001. С. 44–49.

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

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.

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

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.

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.

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.

10. Радионов А.В. Использование магнитожидкостных герметизаторов на углеобогатительных 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.

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.

13. Радионов А.В. Опыт эксплуатации магнитожидкостных герметизаторов в промышленной энергетике. *Науково-технічний збірник "Гірнична електромеханіка 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.

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

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

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

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>

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

22. Радионов А.В. О повышении надежности технологического оборудования предприятий ТЭК при использовании магнитоожидкостных 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.

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.

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).

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.

30. Тарельник В.Б., Гапонова О.П., Радионов А.В. Повышение уровня экологической безопасности при использовании интегрированных способов

повышения качества стальных деталей. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк: 2018. Вип. №63. С. 214–221.

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.

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).

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.

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.

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

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).

37. Радионов А.В., Виноградов А.Н., Горнов В.А., Чашин 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).

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).

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).

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).

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).

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).

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).

44. Пшеничников А.Ф., Лебедев А.В., Радионов А.В., Ефремов Д.В. Магнитная жидкость для работы в сильных градиентных полях. *Коллоидный журнал*. 2015. Том 77, №2. С. 207–213. (Scopus, Web of Science).

45. Dikansky Yu., Ispiryanyan 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).

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).

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).

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).

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.

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

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).

55. Радионов А.В., Виноградов А.Н. Особенности разработки магнитожидкостных герметизаторов для уплотнения сыпучих абразивных сред. *Химическая техника*. 2006. №9. С. 16–19.

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

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

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.

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.

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.

***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.

62. 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.

63. Radionov O.V., Leitar 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.

64. 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.

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

66. 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 ICMF 11*. Kosice, Slovakia. 2007. P. 702.

67. 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.

68. 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.

69. Радионов А.В. Анализ наиболее рациональных областей применения магнитожидкостных герметизаторов. *Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery: 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.

70. 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. ICMF 12.* Sendai, Japan. 2010. P. PS1–1039.

71. 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.

72. 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.

73. 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.

74. 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.

75. 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.

76. 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.

77. 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.

78. 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:***

79. 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.

80. 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.

81. 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.

82. 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.

83. 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.

84. 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.

## 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.

Dissertation for a Doctor of Engineering Sciences Degree in specialty 21.06.01 – "Ecological safety". – Sumy National Agrarian University. Ministry of Education and Science of Ukraine, Sumy, 2020.

The defense of the dissertation will be held at the Specialized Academic Council D 55.051.04 meeting. Sumy State University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Sumy, 2020.

As a result of a complex of theoretical and experimental studies, new scientific statements, conclusions and recommendations were introduced and substantiated in the thesis, the use of which allows to increase the level of environmental and technogenic safety of hazardous industries by creating conditions for trouble-free operation, eliminating failures on equipment that is operated, and threats injuries of service personnel when using magnetic-fluid sealing complexes in the elements of technical systems.

The results of the work have been sufficiently tested and have been implemented, which is confirmed by the relevant acts.

The following results were obtained in the thesis.

The scientific and practical aspects of previous research on the problems of technogenic safety of harmful industries are analyzed. It is substantiated that the environmental conditions for ensuring technogenic safety are reduced to safe and trouble-free operation of machines, mechanisms and technological equipment, which is consistent with the basic principle of environmental safety - the principle of preventing environmental hazards before they originate, which can be predicted through an environmental risk assessment. It is shown that the problem of ensuring technogenic safety occupies a special place among the global problems of all world

states. In Ukraine, the situation is aggravated due to a long-term systemic crisis, which results in significant depreciation and obsolescence of main assets.

The analysis of large-scale technogenic disasters of recent years has been carried out, confirming that the most cases their causes were mechanical failures of many types of technological equipment, especially bearing assemblies. The working conditions of the bearing units of the process equipment are examined and, according to literature data, it has been concluded that up to 90 % of cases of accidental destruction of bearings are directly or indirectly caused by unsatisfactory seals. It is substantiated that ensuring a high level of tightness can be achieved through the use of magnetic fluid sealing complex.

Based on the results of the literature review and logical analysis, we can conclude that the creation of the concept of reducing the risk of technogenic accidents and disasters for technological equipment with a wide interval of physical deterioration and obsolescence and its implementation at hazardous production facilities by eliminating operational failures and threats Injuries to maintenance personnel with the help of magnetic fluid sealing complex (MFSC) is a pressing scientific and applied problem.

The concept of studies in the dissertation has been developed: a review of the processes occurring in the MFSC, first analytically to identify general patterns and interdependencies in general terms; adaptation of the known methods of experimental studies and the development of new methods and experimental stands for the characterization of magnetic fluids (MF) and MFSCs; development of a multiphysical model that takes into account processes of different physical nature in the gap MFSC; improvement of the Fine-Kinney method to assess the risk of technogenic accidents; implementation of research results at hazardous production facilities. To exclude the role of uncontrolled physico-chemical factors in the technology of preparation of magnetic fluid, a single method of chemical precipitation from aqueous solutions of salts of divalent and trivalent iron with an excess of alkali was chosen. For the first time in one study, the physicochemical

and operational properties of the MF, made on more than ten different dispersion bases, were studied, which allowed in-depth consideration of the questions of structure formation, sedimentation stability of the MF, and certain regularities were revealed.

For the first time, from the standpoint of system analysis, a scientifically-methodological approach to solving the problem of preventing the accumulation of defects in process equipment and further developments in which the technical system ceases to obey a person and an unfavorable outcome is possible is justified by applying magnetic-liquid sealing complexes.

To compare the level of technogenic safety in the application of various sealing systems, the risk assessment has been improved taking into account the system multilevel analysis based on the Fain-Kinney method for the three-level hierarchical system “MFSC- technological equipment-technolgenic safety”.

Theoretically substantiated and experimentally established that the temperature heating of technical magnetic fluids of all shear rates, when the magnetic forces dominate the centrifugal ones, does not exceed 5 °C.

A mathematical model of interrelated magnetic, electric and hydromechanical fields in the working gap of the MFS based on multiphysical modeling has been developed. Conducted with its help, research has allowed to significantly expand the scope of MFSC and to obtain the following scientific results, then confirmed experimentally and by summarizing the operating experience of MFSC:

- despite established views, it has been proven that the operation of the multi-stage generator system is possible at gaps that significantly exceed 0.3 mm. Accounting for the processes occurring in the active area of the seal, and in the device allows you to increase the size of the working gap to 0.8 mm;

- analysis of the vortex structures arising in the MF and formed by the radial and azimuthal components of the velocity, proves the stance of the operative function of the MFSC to linear velocities of the order of 35 m/s;

– The conditions are formulated under which electric currents arise in the volume of a rotating shaft through interaction with a magnetic field. It is shown that the electrical conductivity of magnetic fluids used is at least three orders of magnitude lower than the value of electrical conductivity at which shaft heating, the occurrence of anode currents, and the like are possible.

This made it possible to expand the scope of MFSC to increase the level of technogenic safety.

The developed mathematical model of the processes occurring in the working gap of MFSC with the addition of ferromagnetic micron particles gave grounds to prove that increasing the level of technological safety of technological equipment with MFSC with working gaps up to 1 mm is possible by self-correction of the working gap by adding 1 g ferromagnetic powder on 10 ml of MF. Further, this scientific result is substantiated experimentally, as well as by analyzing the operating experience, confirmed by the patent of Ukraine.

For the first time, to determine the influence of the quality of magnetic fluids on the reliability of the MFSC and the level of technogenic safety of the technological equipment used with it, the results of studies of the magnetic susceptibility of technical magnetic fluids on many different dispersion bases of different chemical composition were used. The results show that the temperature and frequency characteristics of MF can determine the degree of ordered state of particles and relaxation of magnetic moments, which is important for ensuring the efficiency and environmental safety of equipment.

The features of the magnetization kinetics of technical magnetic fluids, including those based on paraffin, whose solidification temperature exceeds room temperature, are investigated. It has been established that in the region of solidification temperatures of such samples of magnetic fluids, their temperature dependence obtains a sharp maximum, which is explained by the blocking of the Brownian degrees of freedom of the largest particles. It was concluded that the cause of the sloping maximum at low temperatures corresponding to the solid state



of the sample is the change in the relaxation mechanism of the magnetic moment of the main number of single-domain particles — their transition from the ferromagnetic state to the superparamagnetic state with increasing temperature.

It is theoretically and experimentally proven that magnetic fluid with an average particle size of no more than 8 nm and the number of clusters and aggregates, the total contribution of which to the initial magnetic susceptibility of MF does not exceed 5 %, retains sedimentation stability for at least 25 years while observing its storage rules, which increases longevity and resource of MFSC, and accordingly the level of environmental and technological safety.

For the first time, the influence of the operational properties of MFSC on the conditions for ensuring reliable safety of human life, taking into account critical situations arising during man-made accidents, has been determined. Substantially important scientific propositions: for MF with high sedimentation stability under the action of a magnetic field, evaporation slows down, and by the nature of the change in MF viscosity, its quality can be diagnosed.

A method has been developed for express analysis of the dynamic characteristics of a magnetic fluid, which is based on the force effect of a non-uniform magnetic field on ferromagnetic particles in a liquid. It was found that MF sedimentation stability is also noted, the change in magnetic force for which within 10–15 min will not exceed 3 %, which allows enterprises operating MFSCs to fairly easily and quickly control the quality of the MF, while ensuring the reliability and technogenic safety of MFSC.

It has been established experimentally that for industrial MFs that have undergone an operational inspection as part of the MFSC and confirmed their performance, the ratio of viscosity measured in a liquid placed in and outside the magnetic field does not exceed a 2.5 coefficient. The relative viscosity of the MF can be used as a criterion for the quality of the fluid.

For the first time, the principle of assessing the level of technogenic safety of dangerous manufactures is substantiated and implemented, which develops the

methodology of system research in environmental safety, making it possible to create integrated approaches to reducing the risk of technogenic accidents by developing design solutions of the MFSC.

Based on the analysis of operating experience of electric motors of the VASO series, it was proved by comparing the assessment of the level of technogenic safety with the use of MFSC and standard seals:

- the failure rate of these electric motors with a complete set of standard seals depends on seasonal changes in climatic conditions and reaches a maximum value in the winter period, and during the completion of the MFSC does not change during the year;

- operation of electric motors of the VASO series with MFSC does not depend on the operation modes, and in the case of completion with standard seals, the intermittent mode S3 is difficult;

- the use of MFSC allows to reduce the level of technogenic risk of the sealing system in 4–7 times, while the redistribution of electric motor failures from damages of bearing units and stator windings during reduction of absolute values of these indicators is noted;

- The analysis of risk assessment for synchronous electric motors of the SDN series manufactured by JSC "ZKEM" (Nova Kakhovka) under different operating conditions, power and revolutions of the rotary shaft showed a decrease in technogenic risk during the introduction of MFSC in the range of 1,5–4 times.

The development and implementation of schematic and constructive decisions on the design of the MFS has been further developed. The classification of MFSC has been developed. The concept of MFSC was introduced, where the role of the main seal is performed by the MFS, and methods of enhancing the positive properties of the main and auxiliary seals are proposed.

Most of the results of theoretical, experimental and design studies are generalized and legalized by the corresponding technical conditions, which promotes their wide industrial implementation. They are coordinated with leading

institutes and factories that design and manufacture equipment for which MFSCs are installed.

The proposed practical recommendations are confirmed both by experiment and by the experience of industrial exploitation of MFSCs, created on the basis of the results of the performed research. For more than twenty years, more than 4,000 MFSCs have been introduced to nearly 200 industrial enterprises of hazardous industries in Ukraine, Russia, Belarus, Moldova, Uzbekistan, Kazakhstan, and Estonia. During these years, the author's supervision over the operation of the MFSCs confirms the high efficiency of the results obtained. Five electric machine-building plants of Ukraine and Russia serially produce electric motors, which include MFSCs. Also, MFSCs are serially installed on rotary gearboxes of mine combines.

Implementation of MFSCs allows preventing emergency stop of equipment due to unsatisfactory work of seals; sharply increase (no less than 2 times) inter-repair period of equipment operation; reduce the costs associated with the repair: both the cost of dismantling the equipment, and the cost of replacing components (bearings, etc.). As a result, this leads to an increase in the level of technogenic and environmental safety.

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

### List of publications:

#### Scientific works, in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Martsinkovsky V.A., Tarelnik V.B., Antoshevsky B., Martsinkovsky V.S., Radionov O.V., Konoplyantschenko E.V., Gaponova O.P., Pozovny O.O. Ecological safety of operation of compressor and pumping equipment: monograph, ed. O.V. Radionov. Sumy: Sumy State University, 2018. 282 p.
2. Radionov O.V. Magnetic fluid devices in refrigeration technology. *Refrigeration Technique and Technology*. 1999. №.62. P. 126–131.
3. Radionov O.V., Krasnikov G.V., Gasyuk A.A., Chashchin V.V. Sealing of output shafts of electric motors of BACO type. *Explosion-protected electrical equipment: collection of scientific works of UkrNIIVE*. Donetsk: South-East. 2001. P. 44–49.
4. Radionov O.V., Belyi V.F., Vinogradov A.N. NPVP "Ferrohydrodynamica" – ten years of work with enterprises of the metallurgical industry. *Theory and practice of metallurgy*. 2001. №1 (21). P. 60–63.
5. Radionov O.V. Vinogradov A.N. The effect of centrifugal force on the performance of a high-speed magnetic fluid seal. *Collection of scientific works of UDMTU*. Nikolaev, UDMTU, 2001. №4 (376). P. 119–129.
6. Radionov O.V., Selezov I.T. Analysis of the possibility of application of magnetic fluid devices in space technology. *Space science and technology*. 2002. Supplement No. 2, Vol. 8. P. 375–380.
7. Radionov O.V., Chashchin V.V., Krasnikov G.V., Gasyuk A.A., Semenido B.E. Asynchronous motors of the series BACO4 with magnetic fluid seals. *Explosion-protected electrical equipment: collection of scientific works of UkrNIIVE*. Donetsk: South-East. 2004. P. 73–81.

8. Radionov O.V., Vinogradov A.N., Melnichenko A.A., Khabaznaya A.S. Magnetic-fluid seals for output shafts for rotary gear reducers of combines. *Coal of Ukraine*. 2005 №2. P. 20–22.

9. Radionov O.V., Vinogradov A.N. Combined magnetic fluid seals are an effective alternative to contactless seals of bearing units with fluid lubricants. *Scientific and technical collection "Enrichment of minerals resources"*. 2008. Vol. 35 (76). P. 148–155.

10. Radionov O.V. The use of magnetic fluid seals in coal preparation enterprises. *Scientific and technical collection "Enrichment of minerals resources"*. 2010. Vol. 41(82) – 42(83). P. 295–308.

11. Khabaznya A.S., Radionov O.V., Vinogradov A.N., Kazakutsa O.V. Features of the design of magnetic fluid seals mine equipment. *Coal of Ukraine*. 2010. №12 (648). P. 29–33.

12. Selezov I.T., Radionov O.V. Modeling of the temperature field of ferrofluid in the gap. *Science collection "Physico-mathematical model and information technologies"*. 2011. Vol 14. P. 143–152.

13. Radionov O.V. Operating experience of magnetic fluid seals in industrial energy. *Scientific and technical collection "Mining electromechanics and automatics"*. Dnipropetrovsk. 2011. Vol. 87. P. 134–139.

14. Radionov O.V., Podoltsev A.D., Ryzhkov S.S. Magnetic and electrical processes in the volume of a shaft rotating in a constant magnetic field of a magnetic-fluid sealer. *Herold of the Admiral Makarov NUS*. 2012. №1. P. 15–23.

15. Radionov O.V. On improving the reliability of air-cooling apparatus. *Sustainable development and artificial cold.. Collection of scientific works VIII International Scient.-Techn. Conf. Kherson: Grin D.S., 2012 (additional information to the journal "Refrigeration Technique and Technology. Vol. 4 (138), 2012)*. P. 226–231.

16. Radionov O.V., Bortsov A.S. Computer simulation of magnetic and hydrodynamic processes, depending on the size of the gap of the magnetic fluid

seal. *Scientific and technical collection "Enrichment of minerals resources"*. 2013. Vol. 52 (93). P. 24–33.

17.Radionov O.V., Ryzhkov S.S. Magnetic fluid sealing complexes. *Collection of scientific works NUS*. 2013. №4. P. 44–51.

18.Radionov O.V., Podoltsev A.D., Vishnyakov V.F. Magnetic fluid seals and their application in electric power equipment. *Hydropower of Ukraine*. 2013. №3-4. P. 33–36.

19.Radionov O.V. Enhancing the industrial and environmental safety of the main ventilation shaft fans. *Herald of the Admiral Makarov NUS*. 2013. No. 4. Electron edition, Access mode: <http://dx.doi.org/10.15589/evn20130408>

20.Radionov O.V., Kunikin S.A., Polezhaeva S.A. Increase of technogenic safety of equipment operation with increased radial clearances. *Herald of the Admiral Makarov NUS*. 2014. № 1. Electron edition, Access mode: <http://dx.doi.org/10.15589/evn20140108>

21.Radionov O.V., Podoltsev A.D. Magnetic fluid seals as a means of improving the environmental safety of technological equipment of hydroelectric power plants. *Hydropower of Ukraine*. 2014. No. 2-3. P. 58–62.

22.Radionov O.V. On improving the reliability of technological equipment of the enterprises of the fuel and energy complex using magnetic fluid sealing complexes. *Journal of Engineering Sciences*. 2014. Vol. 1, No. 1. P. 8–15.

23.Radionov O.V., Podoltsev A.D. Electrical processes in the gap of the magnetic fluidic sealer. *Herald of NTUU "KPI": Series of mechanical engineering*. 2014. №2 (71). P. 103–110.

24.Radionov O.V. Improving the environmental safety of gas pumping station equipment. *Compressor and power engineering*. 2014. №4 (38). P. 46–51

25.Radionov O.V. The influence of the operating modes of asynchronous electric motors on their performance. *The SNAU Herald, Series, "Mechanization and Automation of Production Processes"*. Vol. 10/1 (29). 2016. P. 156–161.

26. Radionov O.V., Kharlamova E.V. Increasing the level of environmental safety when using magnetic-fluid seals and frequency converters in the processes of operation of electric motors of the BACO series. *Scientific journal "Ecological safety"*. №2 (22). 2016. P. 9–15.

27. Radionov O.V. Influence of magnetic viscous effect on the performance and safety of magnetic fluid seals. *Compressor and power engineering*. 2016. №4 (46). P. 19–23.

28. Radionov O.V., Radionova A.A., Podoltsev A.D. Experimental study of dynamic processes in magnetic fluid in a non-uniform magnetic field of a rotating shaft sealer. *Technical electrodynamics*. 2017. №2. P. 77–82. (Scopus, Web of Science).

29. Radionov O.V., Gulyaev A.A. Improving the operational reliability of devices with agitators through the use of magnetic-fluid seals. *Compressor and power engineering*. 2017. No. 3 (49). P. 25–29.

30. Tarelnik V.B., Gaponova O.P., Radionov O.V. Improving the level of environmental safety when using integrated ways to improve the quality of steel parts. *Intercollegiate collection "Scientific Notes"*. Lutsk: 2018. Vol. No. 63. P. 214–221.

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.

32. Glyva V.A., Podoltsev A.D., Bolibrukh B.V., Radionov O.V. A thin electromagnetic screen of the composite structure, made on the basis of a magnetic fluid. *Technical electrodynamics*. 2018. №4. P. 14–18. (Scopus, Web of Science).

33. Radionov O.V., Podoltsev A.D., Pechkis G. Features of operation of high-speed magnetic fluid sealing complexes. *International scientific and technical journal "Mechanics and Advanced Technologies"*. 2018. Vol. No. 2 (83). P. 57–63.

34. Radionov O.V., Zharkov P.E., Tarelnik V.B. Analysis of non-stationary temperature field at the launch of a magnetic fluid sealer. *Compressor and power engineering*. 2018. Vol. No. 1 (51). P. 6–12.

35. Coda N.A., Radionov O.V. Improving the reliability of the electric motor cooling towers circulating process water. *Steel*. 1998 №4. P. 76–77. (Scopus, Web of Science).

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

37. Radionov O.V., Vinogradov A.N., Gornov V.A., Chashchin V.V., Krasnikov V.G., Gasyuk A.A., Semenido B.E., Vaisman V.E. Asynchronous motors of the BACO4 series with magnetic fluid seals. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2004. №3. P. 29–32. (Scopus, Web of Science).

38. Gladkikh D.V., Dikansky Y.I., Balabanov K.A., Radionov O.V. On the influence of structural organization on the relaxation of the magnetic moment of dispersed particles in a magnetic fluid. *Journal of Technical Physics*. 2005. T. 75, no. 10. P. 139–143. (Scopus, Web of Science).

39. Radionov O., 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).

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

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

42. Dikansky Y.I., Gladkikh D.V., Kunikin S.A., Radionov O.V. Magnetic susceptibility of a magnetic fluid on a silicon-organic basis in electric and



magnetic fields. *Letters to journal of Technical Physics*. 2015. Vol. 41. No. 4. P. 96–102. (Scopus, Web of Science).

43. Dikansky Y.I., Ispiryan A.G., Kunikin S.A., Radionov O.V. On the nature of the maximum temperature dependence of the magnetic susceptibility of magnetic fluids. *Journal of Technical Physics*. 2015. Vol. 85. No. 8. P. 100–104. (Scopus, Web of Science).

44. Pshenichnikov A.F., Lebedev O.V., Radionov O.V., Efremov D.V. Magnetic fluid for use in strong gradient fields. *Colloidal journal*. 2015. Vol. 77, No. 2. P. 207–213. (Scopus, Web of Science).

45. Dikansky Y., Ispiryan A., Kunikin S., Radionov O. 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).

46. Radionov O.V. The use of magnetic fluid seals to improve the reliability of air-cooling devices. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2015. №7. P. 27–31. (Scopus, Web of Science).

47. Radionov O.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).

48. Dikansky Yu.I., Ispiryan A.G., Kunikin S.A., Radionov O.V. Features of the magnetization of magnetic colloidal paraffin-based nanosystems. *Journal of Technical Physics*. 2018. Volume 88, No. 1. P. 58–63. (Scopus, Web of Science).

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

51.Radionov O.V. The use of magnetic-fluid devices in refrigeration. *Herald of the International Academy of refrigeration*. 1999. № 4. P. 45 – 49.

52.Radionov O.V., Belyi V.F. Magnetic fluid seals. *Assembly in engineering, instrument making*. 2001. No. 7 (13). P. 32 –35.

53.Radionov O.V., Uvarov N.V. Analysis of the experience of magnetic-fluid seals at the Association "Nitrogen". *Chemical technology*. 2003. №9. P. 26 – 29.

54.Radionov O.V. Operation of magnetic fluid seals in Ukrainian and Russian chemical industries. *Hydraulika i Pneumatyka*. 2004. №5. S. 21 – 26.

55.Radionov O.V., Vinogradov A.N. Features of the development of magnetic fluid seals for sealing loose abrasive media. *Chemical technology*. 2006. №9. P. 16–19.

56.Radionov O.V., Vinogradov A.N. Combined high-speed magnetic fluid seals instead of contactless sliding bearing seals. *Chemical technology*. 2008. No. 12. P. 14–18.

57.Radionov O.V., Vinogradov A.N. Improving the reliability of the bearing assemblies of the drive gears of the cooling tower fans NEMA. *Chemical technology*. 2012. №2. P. 12–15.

58.Radionov O.V., Vinogradov A.N., Slepchenko A.I., Ivashin A.A. Magnetic fluidic seals for carbon dioxide compressor drive bearings. *Chemical technology*. 2013. №9. P. 24–27.

59.Radionov O.V., Kurok O.V. Improving the industrial safety of process equipment through the use of magnetic fluid seals. *Work security and social protection*. 2015. №1. P. 54 – 58.

60.Radionov O.V. Operating experience of magnetic-fluid seals at oil refineries in CIS countries. *Chemical technology*. 2015. №10. P. 11 – 17.

61.Radionov O.V., Panchenko A.A., Shumeiko A.P. The introduction of magnetic fluid seals for electric motor type STD - 3150 in "Ukratnafta" Ltd. *Chemical technology*. 2016. №9. P. 20–24.

**Scientific works, testifying the approbation of dissertation materials:**

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

64. Radionov O.V., Leitar S.V., Kirichkov O.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). Abstracts*. 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. Radionov O.V. On the application of magnetic fluid devices in the energy sector. *Problems of energy saving, safety, ecology in industrial and municipal power engineering: materials of the XVI International Conference*. Yalta, 2005. P. 32–35.

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

69. Radionov O.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. Radionov O.V. Analysis of the most rational areas of application of magneto-fluid seals. *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-Przemysl. 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 large-size electrical engines. *Abstracts of 12<sup>th</sup> International Conference on Magnetic Fluids. ICMF 12. Sendai, Japan. 2010. P. PS1–1039.*

72. Radionov O.V., Khabaznya A.S., Vinogradov A.N., Kazakutsa A.V. Features of the design of magnetic fluid seals mine equipment. *Coll. of scien. papers. The 14th International Ples Conference on Nanodispersed Magnetic Fluids. September 2010. Ivanovo: ISEU, 2010. P. 360–367.*

73. Zubarev A.Y., Chirikov D.N., Radionov O.V. On the theory of rheological properties of bidisperse magnetic suspensions. *Physics-chemical and applied problems of magnetic dispersed nanosystems: coll. of scien. works IV All-Russian Scientific Conference. Stavropol: North-Caucasian Federal University, 2013. P. 101–106.*

74. Radionov O.V. Improving environmental safety in the operation of stationary mine installations. *Problems of ecology and energy saving in shipbuilding: materials of the IX International Scientific and Technical Conference. Mykolaiv: NUS, 2014. P. 50–53.*

75. Radionov O.V. Man-made risk assessment in the operation of shipboard electrical equipment. *Ship Energy: state and problems: materials of the VII International Scientific and Technical Conference. Part 1. Mykolaiv: NUS, 2015. P. 185–187.*

76.Radionov O.V. Operating experience of magnetic-fluid seals at oil refineries in CIS countries. *The main directions of improving the energy efficiency of oil refineries and petrochemical enterprises: proceedings of the meeting*. M: LLC Scientific and Technical Center at the Council of Chief Mechanics, 2015. P. 144–158.

77.Radionov O.V. Influence of climatic factors on the technogenic risk of sealing systems of asynchronous motors. *Problems of environmental safety: a collection of abstracts. XIV International Scientific and Technical Conference*. Kremenchuk: KrNU, 2016. P. 135.

78.Radionov O.V. System analysis of technogenic safety of the sealing systems of electric motors. *Problems of ecology of safety: a collection of abstracts of the XV International scientific and technical conference*. Kremenchuk: PP Shcherbatih O., 2017. P. 59 – 60.

79.Radionov O.V. Modernization of technological equipment as a way to increase the technogenic safety of hazardous industries. *Problems of environmental safety: materials of the XVI International Scientific and Technical Conference*. Kremenchuk: KrnU, 2018. P. 78–79.

**Scientific works, which additionally reflect the scientific results of the dissertation:**

80.Vinogradov A.N., Radionov O.V., Chashchin V.V., Gasyuk A.A., Krasnikov G.V. Electrical machine: patent for invention 2161851 Russia: (51) 7N02K5//24, F16J15/43, №99110785/09; stated. 24.05.1999; published 10.02.2001, Bul. No. 1. 10p.

81.Radionov O.V., Vinogradov O.M., Bilyi V.F., Kazakutsa O.V., Makhov G.G., Lugovskoy V.G., Melnichenko O., Khabazien O.S. Magnetic Fluid Seal: Patent for the invention 72005 Ukraine: (51) 7F16J15/43, No. 2002043663; stated. April 30.04.2002; published Jan 17, 2005, Bul. No. 1. 6p.

82.Radionov O.V., Vinogradov O.M. Magnetic Fluid Seal: Patent for invention 80898 Ukraine: (51) IPC (2006) F16J15/00, No. 2006 00916; stated. 02/01/2006; published 15.12.2006, Bul. No. 12. 6p.

83.Radionov O.V., Vinogradov O.M., Kazakuta O.V., Tikhonov A.S., Gursky A.M. Magnetic Fluid Seal and Method for Manufacturing Magnetic Fluid Seal: Patent for invention 83876 Ukraine: (51) IPC (2006) F16J15/40, F16J15/43 (2008.01), №2006 05990; stated. 30.05.2006; published 26.08.2008, Bul. No. 16. 8p.

84.Radionov O.V., Vinogradov O.M., Kazakuta O.V., Tikhonov A.C. Magnetic Fluid sealing device: Patent for invention 85068 Ukraine: (51) IPC (2006) F16J15 / 40, №2006 05742; stated. 25.05.2006; published 12/25/2008, Bull. No. 24. 6p.

85.Radionov O.V., Vinogradov O.M. Magnetic Fluid Seal with automatic correction of working gap: patent for invention 106420 Ukraine: (51) IPC (2014.01) H01F7/00, H01F7//28 (2006.01), №2012 12720; stated. 8.11.2012; published 26.08.2014, Bul. No. 16. 7p.

## ЗМІСТ

### ЧАСТИНА 1

Перелік умовних позначень, символів, одиниць вимірювань, скорочень.....	44
Вступ.....	48
<b>Розділ 1 Аналіз впливу технічної діяльності небезпечних виробництв на стан техногенно-екологічної безпеки.....</b>	<b>63</b>
1.1 Аналіз впливу технологічного обладнання небезпечних виробництв на формування загроз екологічної безпеки у техногенній сфері.....	63
1.1.1 Оцінка стану техногенної безпеки в Україні.....	63
1.1.2 Фактори, що впливають на ймовірність утворення промислових техногенних аварій.....	67
1.1.3 Напрямок оновлення основних засобів підприємств з метою запобігання ризику виникнення аварійних ситуацій.....	76
1.2 Вплив підшипнико-ущільнювальних вузлів технологічного обладнання на техногенну безпеку небезпечних виробництв.....	78
1.2.1 Умови експлуатації підшипнико-ущільнювальних вузлів.....	78
1.2.2 Огляд традиційних ущільнювальних систем, їх переваги та недоліки.....	80
1.2.3 Екологічні аспекти герметизації .....	86
1.3 Зв'язок процесів в магніторідинних герметизаторах з поліпшенням показників екологічної безпеки досліджуваних об'єктів.....	88
1.4 Огляд існуючих підходів і методів оцінки ризику техногенних аварій з екологічними наслідками.....	96
1.5 Висновки до розділу 1, обґрунтування мети і постановка задач дослідження.....	106
<b>Розділ 2 Об'єкти і методологія досліджень.....</b>	<b>111</b>

2.1	Метод системного аналізу аварійних ситуацій і процесів в магніторідинних герметизуючих комплексах .....	111
2.2	Теоретичний аналіз процесів в магніторідинних герметизуючих комплексах і їх екологічних наслідків .....	116
2.2.1	Методика аналізу впливу відцентрових сил на працездатність високошвидкісного магніторідинного герметизатора.....	117
2.2.2	Методика аналізу розподілу температурних полів в зазорі магніторідинного герметизатора.....	120
2.2.3	Модель взаємодії мікронних наночастинок феромагнітного матеріалу в вузькій щілині.....	125
2.3	Методи експериментальних досліджень процесів в обладнанні з магніторідинними герметизуючими комплексами.....	129
2.3.1	Досліджувані зразки магнітної рідини.....	129
2.3.2	Методики визначення магнітних, реологічних, електричних та експлуатаційних властивостей магнітних рідин.....	133
2.3.3	Методи та експериментальні установки для дослідження характеристик магніторідинних герметизаторів і проведення ресурсних випробувань.....	145
2.3.4	Програма випробувань і метод проведення дослідно-промислових випробувань і експлуатації магніторідинних герметизаторов.....	153
2.4	Математична мультифізична модель процесів магніторідинної герметизації .....	156
2.5	Метод оцінки техногенного ризику небезпечних виробництв.....	168
2.6	Висновки до розділу 2 .....	178
<b>Розділ 3 Результати аналітичних досліджень ефективності застосування магніторідинної герметизації для підтримки необхідного рівня екобезпеки на виробництві.....</b>		<b>180</b>



3.1 Аналіз впливу відцентрових сил і розподілу температурних по- лів в робочому зазорі на екологічну працездатність високошвидкісних магніторідинних герметизаторів.....	180
3.2 Аналіз впливу реологічних властивостей бідисперсних магнітних суспензій на екопрацездатність магніторідинних герметизаторів.....	194
3.3 Висновки до розділу 3.....	211
<b>Розділ 4 Експериментальні дослідження магніторідинної герметизації для підвищення працездатності і екологічної безпеки обладнання.....</b>	<b>213</b>
4.1 Експериментальні дослідження температурних і частотних зале- жностей магнітної сприйнятливості магнітної рідини.....	213
4.2 Експериментальне дослідження седиментаційної стійкості магні- тної рідини різних років виробництва.....	236
4.3 Дослідження структуроутворення в магнітних рідинах магніто- гранулометричним і кластерним аналізом.....	241
4.3.1 Магнітогранулометричний аналіз.....	243
4.3.2 Кластерний аналіз.....	247
4.4 Аналіз випаровуваності промислових магнітних рідин на підс- таві експериментальних досліджень.....	252
4.5 Експериментальні дослідження динамічних процесів в магнітній рідині в неоднорідному магнітному полі герметизатора.....	258
4.6 Експериментальні дослідження впливу розмірів наночастинок магнетиту на седиментаційну стійкість магнітної рідини.....	262
4.7 Експериментальні дослідження впливу магнітов'язкого ефекту на працездатність і безпеку магніторідинного герметизуючого комплексу.....	269
4.8 Критерії вибору типу магнітної рідини для забезпечення еколо- гічної безпеки технологічного обладнання.....	273

4.9 Аналіз стендових і ресурсних випробувань магніторідинних герметизуючих комплексів.....	277
4.10 Висновки до розділу 4.....	281
<b>Розділ 5 Результати математичного моделювання взаємодії фізичних полів у зазорі щодо умов техно-екобезпеки при магніторідинній герметизації.....</b>	<b>285</b>
5.1 Результати комплексного дослідження впливу магнітних, електричних і гідродинамічних полів в магніторідинному герметизаторі на його працездатність.....	285
5.2 Результати досліджень впливу фізичних полів і конструктивних елементів на екоефективність роботи магніторідинного герметизуючого комплексу.....	295
5.2.1 Вплив вибору матеріалів деталей магніторідинного герметизуючого комплексу на параметри магнітного поля в робочому зазорі.....	295
5.2.2 Вплив величини робочого зазору на параметри МРГК.....	298
5.2.3 Особливості роботи високошвидкісних магніторідинних герметизуючих комплексів.....	304
5.3 Аналіз результатів досліджень процесів у зазорі для проектування техно-екобезпечної магнітної герметизації.....	311
5.4 Висновки до розділу 5.....	313
<b>Розділ 6 Обґрунтування методології оцінки техногенного та екологічного ризиків при переході на магніторідинні герметизуючі комплекси.....</b>	<b>315</b>
6.1 Оцінка ризику техногенних аварій і екологічних наслідків для різних потужностей електродвигунів.....	315
6.2 Дослідження впливу кліматичних показників на рівень ризику техногенних аварій і екологічні наслідки.....	319

6.3 Дослідження залежності рівня безпеки від режимів роботи асинхронних електродвигунів серії ВАСО і частотних перетворювачів, їх вплив на оцінку ризику техногенних аварій.....	328
6.4 Висновки до розділу 6.....	333
<b>Розділ 7 Екологічні і технологічні аспекти досвіду експлуатації магніторідинних герметизуючих комплексів на небезпечних виробництвах.....</b>	<b>335</b>
7.1 Науково-методичні та технологічні підходи до впровадження магніторідинних герметизуючих комплексів з метою підвищення рівня техногенної безпеки небезпечних виробництв.....	335
7.2 Класифікація магніторідинних герметизуючих комплексів за особливостями рішень питань безпеки.....	340
7.3 Конструктивні рішення для магніторідинних герметизуючих комплексів із захисту від крапельної і дрібнодисперсної вологи.....	345
7.4. Магніторідинні герметизуючі комплекси з допоміжними попередніми ущільненнями для підвищення рівня екобезпечності.....	350
7.4.1 Магніторідинні герметизуючі комплекси з попередніми лабіринтовими ущільненнями.....	350
7.4.2 Магніторідинні герметизуючі комплекси з попередніми манжетними ущільненнями валу.....	352
7.5 Спеціальні магніторідинні герметизуючі комплекси для специфічного технологічного обладнання та умов роботи.....	363
7.6 Економічні аспекти застосування магніторідинних герметизуючих комплексів.....	366
7.7 Висновки до розділу 7.....	370
Висновки.....	372
Список використаних джерел.....	378

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАНЬ, СКОРОЧЕНЬ

### Умовні позначення

- $R$  – техногенний ризик; радіус вала, м;
- $E$  – ймовірність виникнення небезпечної ситуації;
- $A$  – ймовірність того, що небезпечна ситуація призведе до нанесення шкоди;
- $S$  – тяжкість наслідків;
- $V$  – швидкість, м/с;
- $H$  – напруженість магнітного поля, А/м;
- $M$  – намагніченість, А/м;
- $P$  – тиск, Па;
- $\chi$  – магнітна сприйнятливність;
- $T$  – температура, К;
- $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;
- $\omega$  – частота обертання, с<sup>-1</sup>;
- $d$  – діаметр вала; діаметр частинки, м;
- $W$  – інтенсивність тепловиділення, Дж/м<sup>3</sup>·с;
- $h$  – товщина шару рідини; зазор, м;
- $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с;
- $\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;
- $n$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;
- $k_i$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);
- $\sigma$  – стаціонарна в'язка напруга в суспензії, Па;
- $\delta$  – випаровуваність; робочий зазор, м;
- $B$  – магнітна індукція, Тл;

$B_r$  – залишкова індукція, Тл;  
 $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  
 $\mu$  – магнітна проникність;  
 $I$  – сила струму, А;  
 $\varphi$  – об'ємна частка мікронних частинок;  
 $\tau$  – час релаксації, с;  
 $V$  – об'єм мікронною частки, м<sup>3</sup>;  
 $\gamma$  – швидкість зсуву, с<sup>-1</sup>;  
 $m$  – маса, кг; магнітний момент наночастинки, А·м<sup>2</sup>;  
 $f$  – об'ємна густина магнітної сили, Н/м<sup>3</sup>;  
 $E$  – напруженість електричного поля, В/м;  
 $\nu$  – частота магнітного поля, Гц;  
 $f_e$  – частота електричного поля, Гц;  
 $\sigma$  – електропровідність, 1/(Ом·м);  
 $n$  – число частинок;  
 $H(t)$  – функція Хевісайда;  
 $L(t)$  – функція Ланжевена;

### Символи

$o$  – початкова;  
 $s$  – насичення;  
 $d$  – вал;  
 $f$  – ферорідина;  
 $l$  – частка;  
 $j$  – кластер;  
 $m$  – магнітне;

*про.* – оберти;  
*перед.* – граничне значення;  
*тах* – максимальне;  
*пор.* – середній.

### Критерії

$$Re = \frac{Vd}{\nu} - \text{число Рейнольдса};$$

$$Fr_m = \frac{\rho V^2}{R_{M_0} M_S |\nabla H|} - \text{магнітне число Фруда};$$

$$Br = \frac{\eta V^2}{KT} - \text{число Брінкмана};$$

$$Pr = \frac{\nu}{n} - \text{число Прандтля};$$

$$Pe = Pr \cdot Re - \text{число Пекле};$$

$$Ta = \frac{V \delta \sqrt{R / \delta}}{\nu} - \text{число Тейлора}.$$

### Скорочення

АД – асинхронний електродвигун;  
 АПО – апарат повітряного охолодження;  
 АРП – автоматичне регулювання посилення;  
 ВГП – вентилятор головного провітрювання;  
 ВМ – вакуумне масло;  
 ГДК – гранично допустима концентрація;

МР – магнітна рідина;  
МРГ – магніторідинний герметизатор;  
МРГК – магніторідинний герметизуючий комплекс;  
МП – магнітне поле;  
НВ – небезпечне виробництво;  
НС – навколишнє середовище;  
ПАР – поверхнево-активна речовина;  
ПЕС – поліетілсілоксан;  
ПКУ – природно-кліматичні умови;  
ПН – полюсний наконечник;  
ПЧ – частотний перетворювач;  
ТЕС – теплова електростанція;  
ТУ – технічні умови;  
УМГ – управління магістральних газопроводів;  
УПД – утримуваний перепад тиску;  
API – American Petroleum Institute;  
FMEA – Failure Mode and Effects Analysis.

### **Формули і назви хімічних сполук**

Nd-Fe-B – постійний магніт зі сплаву: неодим-залізо-бор;

$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH} = \text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$  – олеїнова кислота.

## ВСТУП

**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., Селєзов 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 - «Раціональне 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 промислового 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 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. Вони впроваджені на всіх українських заводах з виробництва аміачних мінеральних добрив в містах Черкаси, Горлівка, Кам'янське, Сєвєродонецьк, 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 впроваджувальне 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 (Додаток А). 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 Плесській конференції по магнітним рідинам, Плес, 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.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕХНІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВИРОБНИЦТВ НА СТАН ТЕХНОГЕННО-ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

#### 1.1 Аналіз впливу технологічного обладнання небезпечних виробництв на формування загроз екологічної безпеки у техногенній сфері

**1.1.1 Оцінка стану техногенної безпеки в Україні.** Нинішній рівень природно-техногенної безпеки України здебільшого зумовлений надмірним техногенним навантаженням на природне середовище протягом періоду розвитку в ХХ столітті.

Україна має цілий ряд промислових регіонів з високим рівнем промислового навантаження, що характеризуються наявністю зон з високим рівнем загроз виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Ці загрози постійно зростають внаслідок збільшення відносної частки застарілих технологій та обладнання, зниження темпів відновлення і модернізації виробництва, підвищення соціально-політичної напруги у суспільстві [1, 2]. Причиною порушень природного стану екосистем в складних об'єктах є природні чинники, але здебільше в останній час – це дія факторів техногенного навантаження на довкілля, посилення тенденцій незворотної деградації екосистем у разі вибуху акумульованої "негативної енергії, ентропії", підвищення інтенсивності соціально-економічного розвитку і його руйнівного впливу на навколишнє природне середовище [3].

Розглянемо більш детально основні чинники техногенної небезпеки України.

**Радіаційна небезпека.** В Україні існує високий рівень радіаційної небезпеки, зумовлений наявністю на її території діючих чотирьох АЕС і закритої 15.12.2000 р. Чорнобильської АЕС, двох дослідних ядерних реакторів та більше трьох тисяч підприємств, які використовують

різноманітні радіоактивні речовини, а також виробляють радіоактивні відходи.

Експлуатація АЕС чинить значний антропогенний вплив на навколишнє середовище за кількома напрямками: викид тепла (теплове забруднення), газоаерозольні викиди в атмосферу, напрацювання великої кількості відпрацьованого ядерного палива тощо.

Виникнення могутніх джерел тепла у виді градирень, водойм-охолоджувачів при експлуатації АЕС, звичайно, помітним образом змінює мікрокліматичні характеристики прилеглих районів. Рух води в системі зовнішнього тепловідводу, скидання технологічних вод, що містять різноманітні хімічні компоненти, впливають на популяції, флору і фауну екосистем [4].

**Хімічна небезпека та пожежовибухонебезпека.** На стан техногенної небезпеки України суттєво впливають близько 1,5 тис. промислових об'єктів, де зберігається або використовується понад 300 тис. тон небезпечних хімічних речовин, зокрема понад 9 тис. тон хлору, 200 тис. тон амоніаку [5].

При виникненні НС на хімічно-небезпечних об'єктах у зони можливого хімічного ураження можуть потрапити понад 250 адміністративно-територіальних одиниць, на яких мешкає понад 17 млн людей [6].

В Україні діє понад 1,5 тис. пожежовибухонебезпечних об'єктів, на яких зосереджено близько 13 млн тон твердих та рідких небезпечних речовин. Переважна більшість таких об'єктів розташована в центральних, східних та південних областях країни, де сконцентровані хімічні, нафто- і газопереробні, коксохімічні та металургійні підприємства, функціонує розгалужена мережа нафто-, газо-, аміакопроводів, експлуатуються вугільні шахти, нафтові та газові промисли. Найбільш ризикова щодо виникнення аварійних ситуацій – вугільна промисловість, зокрема вугільні шахти [7].

До найбільш поширених небезпечних хімічних речовин, наявних на підприємствах хімічної промисловості належать амоніак, хлор, діоксид азоту,



акрилонітрил, сірковий ангідрид, азотна кислота, сірчана кислота, метанол, бензол, карбамідоаміачні суміші, гідроксид натрію, формальдегід [8].

Значна кількість аміаку обумовлена розташуванням на території України Міжнародного аміакопроводу Тольятті-Одеса та великих підприємств хімічної промисловості в містах Черкаси, Кам'янське, Сєверодонецьк, Горлівка, Одеса, Рівне.

Оскільки на території України знаходиться приблизно 50 млн т нафти та нафтопродуктів, необхідно враховувати дане джерело небезпечних речовин у атмосфері.

При розгляді даного питання слід зазначити, що кількісний та якісний склад небезпечних речовин істотно різниться в залежності від регіонів України. Тому для оцінки безпеки розглядають не середній, а максимальний вміст шкідливої речовини, зареєстрований в атмосфері над територією України.

Аналіз статистичних даних дає можливість виділити найбільш характерні небезпеки хімічних виробництв [9–12]:

- утворення вибухонебезпечної хмари парогазоповітряних сумішей над територією підприємства та поблизу розміщених житлових районів, а також в об'ємі приміщень виробничих будівель;

- утворення вибухонебезпечних парогазових сумішей в апаратурі та ініціювання вибуху їх внутрішніми джерелами спалахування в апаратурі та трубопроводах;

- утворення рідких або твердих вибухонебезпечних продуктів та накопичення їх в апаратурі, а також ініціювання вибуху внутрішніми джерелами запалювання;

- утворення вибухонебезпечних пило-повітряних сумішей у виробничих приміщеннях та в апаратурі і ініціювання вибуху внутрішніми та зовнішніми джерелами спалахування;

- прояви зовнішніх джерел спалахування, ініціювання вибуху

парогазових та рідинних технологічних викидів.

Забруднення атмосфери – складний процес, пов’язаний з надходженням і розсіюванням забруднюючих речовин у приземний шар атмосфери. Значну роль у цих процесах грають метеорологічні умови. При однакових параметрах викидів в атмосферне повітря можуть виникати різні за величиною концентрації забруднюючих речовин. Їх величини залежать від швидкості й напрямку вітру, температурної стратифікації атмосфери, температури повітря в момент викиду, опадів та інших факторів. Максимальна приземна концентрація забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери виникає при несприятливих метеорологічних умовах – небезпечної швидкості вітру, максимальній температурі повітря в момент викиду.

Основою для оцінки якості довкілля за змістом хімічних забруднень служать ГДК – гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі населених місць, робочої зони, у воді водойм і річок, в ґрунті. При цьому тривалість дії для нормування чинників робочої зони складає період трудової діяльності, а для населених місць – тривалість життя людини.

В основу нормування ГДК покладена концепція, суть якої зводиться до того, що допустимою є концентрація забрудника в атмосферному повітрі, яка не чинить прямої або непрямой шкідливої або неприємної дії на людину, не знижує працездатності, не впливає на самопочуття або настрої, а неприпустимими є також концентрації шкідливих речовин в атмосфері, що несприятливо впливають на рослинність, клімат місцевості, прозорість атмосфери і побутові умови життя населення.

Аналіз антропогенного впливу на природні екосистеми свідчить про те, що швидкість деградації довкілля України набула загрозливого характеру. Розглядаючи погіршення стану здоров’я населення, як індикатора антропогенного навантаження на довкілля, можна зробити висновок про зростання абсолютних і відносних показників смертності населення, а також

про зниження рівня народжуваності [13].

За останнє десятиріччя відбуваються також значні зміни у структурі хвороб, що свідчить про зростання випадків захворювань, спричинених вживанням неякісної питної води та продуктів харчування, забрудненим повітрям, з поміж яких виділяються гепатит, легеневі й онкологічні хвороби [14].

**1.1.2 Фактори, що впливають на ймовірність утворення промислових техногенних аварій.** За минуле століття більше половини великих аварій відбулися за останнє десятиліття, що становило майже половину загиблих і 40 % поранених [15].

Вважається, що збиток від аварійності і травматизму при техногенних катастрофах досягає 10–15 % від валового національного продукту промислово розвинених держав, а екологічне забруднення навколишнього середовища і недосконала техніка безпеки є причиною передчасної смерті 20–30 % чоловіків і 10–20 % жінок [10].

Багато машин і апаратів слід розглядати як джерело підвищеної небезпеки для людей і навколишнього середовища. Практично завжди техногенні аварії істотно впливають на навколишнє середовище, саме тому техногенна безпека є невід'ємною частиною екологічної безпеки.

Традиційно промисловість України має галузеву структуру. Галузева структура передбачає виділення галузей у середині певного виду економічної діяльності та визначення характеру та сутності взаємозв'язків між ними.

Згідно з Законами України «Про основні положення (стратегію) державної екологічної політики на період до 2020 року» та «Про оцінку впливу на навколишнє середовище» значний вплив на екологічну обстановку своєю професійною діяльністю здійснюють підприємства гірничодобувної, металургійної, хімічної промисловості та паливно-енергетичного комплексу, які надалі будемо називати підприємствами небезпечних виробництв (НВ). Для реалізації концепції сталого соціально-екологічного розвитку, прийнятої

Другою Міжнародною конференцією ООН з навколишнього середовища і розвитку, важливе значення має вирішення питань, пов'язаних зі зниженням ризиків техногенних аварій і катастроф з метою створення умов надійної безпечної життєдіяльності людини. Екологічні умови забезпечення техногенної безпеки зводяться насамперед до безпечної та безаварійної роботи машин, механізмів і технологічного устаткування. Це узгоджується з основним принципом екологічної безпеки – принципом запобігання екологічної небезпеки до її зародження, що можна прогнозувати через оцінку екологічних ризиків.

Проблема безпечної експлуатації обладнання основних технологічних комплексів стала особливо актуальною в Україні в даний час, коли більша частина парку діючого обладнання виробила встановлений нормативний термін, а його оновлення в силу економічних причин неможливо. Фізичне та моральне старіння значно випереджають темпи заміни та оновлення [6, 16].

Незважаючи на те, що в більшості випадків обладнання працює з меншою інтенсивністю, продовжує збільшуватися аварійність, зростають витрати на підтримку працездатності обладнання, знижується рівень безпеки його експлуатації.

Знос основних виробничих фондів усіх галузей економіки на даний час складає близько 80 %, а темп відновлення фондів – всього 2,5 % [2]. Цьому сприяє зростання частки низькорівневої технологічної переробки сировини і матеріалів у порівнянні з високотехнологічним випуском готової продукції (частка чорної і кольорової металургії зросла з 9,4 % в 1990 р. до 25 % в 2010 р.) [17]. Протягом останніх десятиріч гірничо-металургійний комплекс забезпечував близько 25 % ВВП і більше 40 % валютних надходжень від експорту продукції. У найближчій перспективі експлуатація на НВ буде здійснюватися частково на існуючому обладнанні. Тому для збереження безвідмовності роботи обладнання необхідно поєднувати роботи по його повній заміні та проведенню розширених відновлювальних ремонтів із

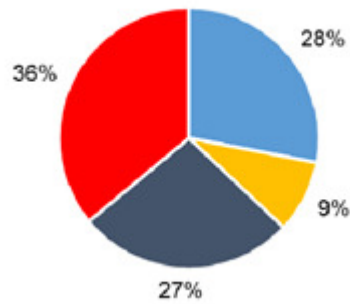
заміною окремих вузлів і деталей, впроваджуючи при цьому останні науково-технічні розробки.

Так, на підприємствах гірничодобувних галузей промисловості інтенсивна експлуатація машин і устаткування при фактично повному згортанні програм будівництва нових шахт і горизонтів, реконструкції основних технологічних комплексів призвела до того, що понад 60 % діючого парку обладнання відпрацювали від півтора до трьох і більше термінів експлуатації, встановлених заводами-виробниками [18], що гранично знизило безпеку експлуатації технологічних комплексів шахт в цілому.

Із загальної чисельності вугільних шахт в Україні (243 шахти станом на 01.01.2014, з яких діючих 150 шахт) 64 % мають термін служби більше 50 років, з них 28 % експлуатуються понад 70 років (рис. 1.1 а). Реконструкцію проходили 80 шахт або 57 %, із них 84 % – понад 20 років тому (рис. 1.1 б) [19].

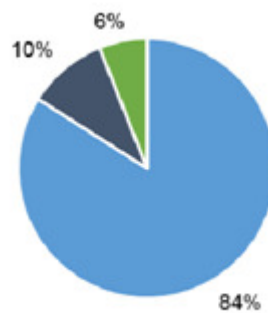
Якщо в 70–80 роки щорічно замінювалося 20–25 і ремонтувалося до 40 підйомних машин, то в останні десятиліття – не більш 3–5. Аналогічне становище склалося і з вентиляторами головного провітрювання (ВГП) та обладнанням енергозабезпечення шахт. Стан понад 140 вертикальних стволів оцінюється як аварійний, 125 шахтних копрів експлуатуються понад 50 років [10].

На вугільних шахтах України, за даними ВАТ «Науково-дослідний інститут гірничої механіки імені М.М.Федорова» на кінець 2013 року, експлуатується 570 одиниць підйомних машин, з яких 471 або 82,6 % парку виробили нормативний термін експлуатації. При тому, що різними заводами-виробниками підйомних машин встановлений нормативний термін служби від 10 до 25 років, 197 машин (34 % парку) експлуатуються понад 40 років, а 5 машин – понад 50 років.



■ більше 70 років ■ менше 30 років ■ 31-50 років ■ 51-70 років

а)



■ більше 20 років ■ менше 10 років ■ 11-20 років

б)

а) – за терміном експлуатації; б) – за часом після останньої реконструкції

Рисунок 1.1 – Діаграма структури діючого обладнання шахт

З 312 ВГП з простроченими термінами служби експлуатується 262 (84 %) вентиляторів. Нормативні терміни служби встановлено такі: 14 років для вентиляторів з діаметром робочого колеса до 3150 мм і 20 років - понад 3150 мм. П'ятдесят чотири вентилятори знаходяться в експлуатації більше 40 років. Серед великих техногенних аварій, що призвели до зупинки виробництва і загибелі людей, є кілька, безпосередньо пов'язаних з руйнуванням ВГП – ГП «Шахтоуправління» Південно-Донбаське №1 в 2001 р., шахта « Міусинська » ДП « Донбасантрацит » [20–22].

Такий стан обладнання і його внесок в формування екологічної ситуації на виробництві є незадовільним і в електроенергетиці.

Половина з 14 українських ТЕС були спроектовані понад півстоліття тому і введені в експлуатацію ще в 60-ті роки ХХ ст, а ще 6 ТЕС – в 70-ті роки. За офіційними даними Міністерства палива та вугільної промисловості України розрахунковий ресурс роботи (100 тис. год) відпрацювали всі енергоблоки вітчизняних ТЕС, а межу граничного ресурсу (170 тис. год) перевищили 94,1 % від їх загальної кількості та фізичного зносу (200 тис. год) – 87,3 %. Ці дані ілюструються діаграмою на рисунку 1.2.

Сучасні технології, що застосовуються на НВ, незалежно від географічних, геологічних і кліматичних умов, на всіх стадіях експлуатації не виключають потенційну небезпеку для навколишнього природного середовища та обслуговуючого персоналу [23–25].

Аналіз процесів діяльності на НВ свідчить про те, що абсолютна безпека цих об'єктів не може бути забезпечена в принципі, але є всі підстави для того, щоб знизити аварійність на них до соціально і екологічно прийнятних розмірів.

Вивчення причин та ходу розвитку великих аварій, що відбулися, показує, що незалежно від часу, типу виробництва і регіону вони виявляються разюче співпадаючими, якщо відволіктися від конкретних технічних деталей.

Зазвичай аварії передуює фаза накопичення будь-яких дефектів в обладнанні або відхилення від нормальних процедур ведення процесу. Стадії зародження і розвитку аварійної ситуації протікають, як правило, приховано і пов'язані з накопиченням руйнівного потенціалу [26, 27].

Аналіз причин великих аварій (за даними ООН) показує, що в більшості випадків їх безпосередніми причинами були механічні несправності та людський фактор (рис. 1.3) [10, 28].

На практиці основними причинами 67 % аварій, зареєстрованих в базі даних Системи звітності по великим аваріям (Major Accidents Reporting System – MARS, функціонує під егідою Європейської Комісії в Об'єднаному

дослідницькому центрі в Іспрі (Італія)), були: низький рівень виробничої безпеки та неефективність управління системами екологічної безпеки [29].

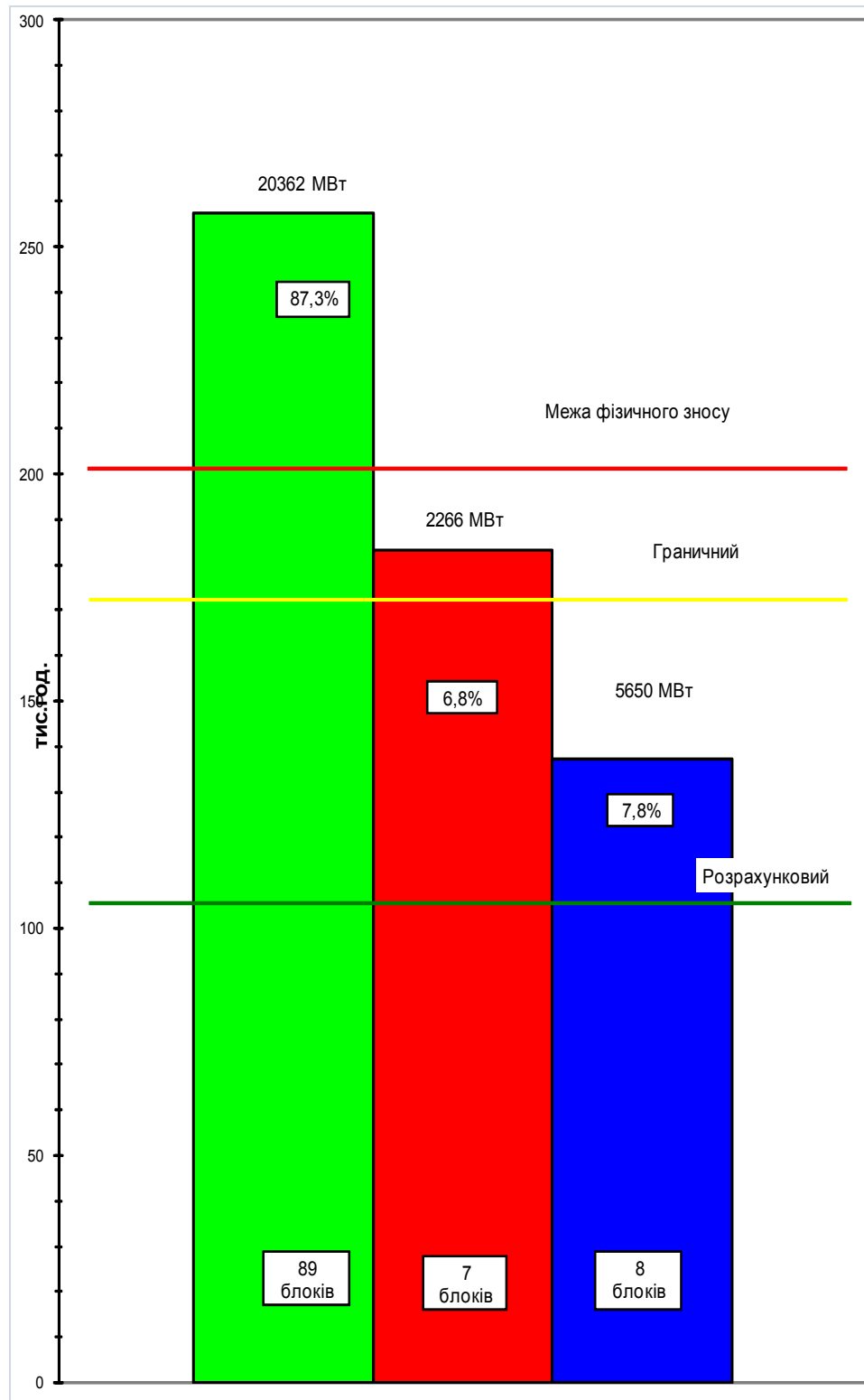


Рисунок 1.2 – Технічний стан енергоблоків за ресурсом роботи



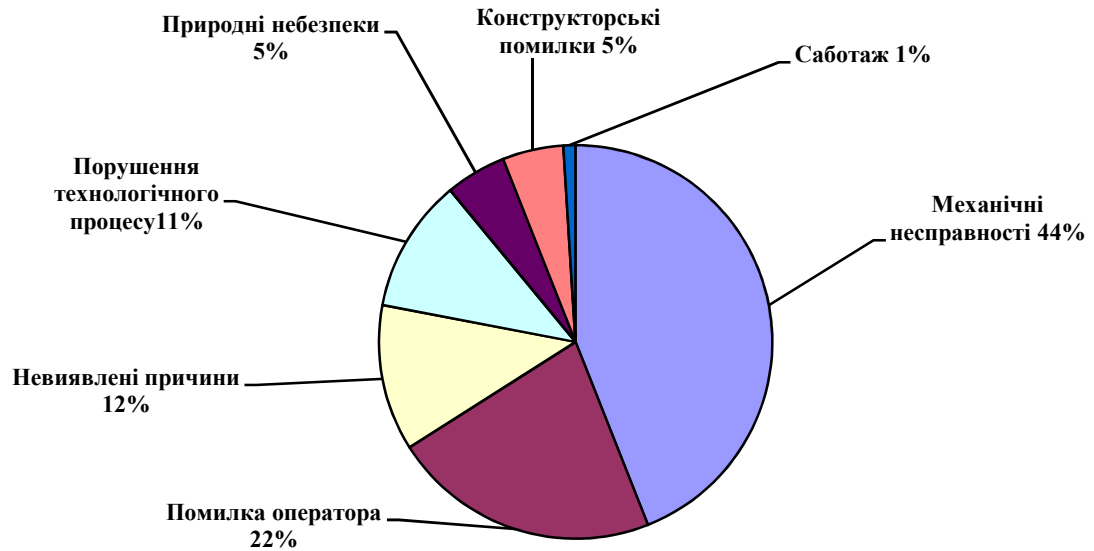


Рисунок 1.3 – Причини великих аварій в світі на підприємствах НВ

Загальний аналіз показує, що основними причинами великих техногенних аварій є:

- відмови технічних систем;
- помилкові дії операторів технічних систем;
- концентрація виробництв різного призначення в промислових зонах без належного вивчення їх взаємовпливу;
- високий енергетичний рівень технічних систем;
- зовнішні негативні впливи на об'єкти НВ.

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

Особливість небезпечних виробництв полягає у високій концентрації машинних агрегатів – насосних, компресорних, апаратів повітряного

охолодження, димососів і т.д. з одиничними потужностями від десятків кВт до одиниць МВт, що є основною причиною виникнення виробничих неполадок і аварійних ситуацій. Тому першочерговим завданням є дослідження впливу безвідмовності, працездатності і надійності електрообладнання НВ на техногенну безпеку [15, 30].

Система електрообладнання є частиною складної технічної системи, від працездатності якої залежить ефективна робота об'єкта в цілому. Через вихід з ладу електрообладнання відбувається близько 11 % від загальної кількості вибухів і пожеж на хімічних підприємствах, а також несправності в електрообладнанні є однією з причин для ще приблизно 60 % аварій [31].

Практика експлуатації електродвигунів показує, що збільшення терміну служби і підвищення надійності роботи машин дає відносно більший економічний ефект, ніж поліпшення інших техніко-економічних показників: к.к.д., коефіцієнт потужності, коефіцієнт використання і т.д. [32].

Для електрообладнання, також як і для підприємств небезпечних виробництв України, характерно його моральне старіння. За найскромнішими оцінками знос електричних машин досягає 60–80 % [33].

Сумарне техногенне навантаження в районах розміщення небезпечних виробництв поєднує дві взаємозалежні групи впливів: порушення й забруднення. До першої групи відносяться геомеханічні, біоценотичні, технологічні порушення. До другої групи впливу відноситься забруднення кожного окремого компонента навколишнього природного середовища: літосфери, гідросфери, атмосфери, біооб'єктів.

Аварійна ситуація характеризується такими поняттями як криза, катастрофа і катаклізм [10]. Криза розглядається як явище, що свідчить про необхідність адаптації системи до помітних змін зовнішніх або внутрішніх умов. Вона визначається збереженням її найважливіших характеристик і незначним збитком елементам. Однак появу криз слід розцінювати як свідчення необхідності оновлення системи.

На відміну від кризи виникнення катастрофи зазвичай супроводжується значною і досить різкою зміною інтегральних показників системи внаслідок перетворення і докорінної перебудови її структури. Ще більш радикальні зміни спостерігаються при катаклізмах. Їх поява спричиняє припинення існування більшості систем.

З точки зору системного аналізу, криза – це різниця між існуючою і бажаною системою. Виходячи з цього, реальною проблемою, яку необхідно вирішити, є недопущення того, щоб накопичення дефектів в обладнанні або відхилення від нормального ходу технологічних процесів призвели до такого розвитку сценарію, після якого технічна система перестане підкорятися людині, і відбувається несприятливий результат.

Міжнародний "Центр досліджень епідеміології катастроф" (Center for Research on the Epidemiology of Disasters) протягом декількох десятиліть формує базу даних про різні катастрофи. Статистика показує, що кількість техногенних катастроф в світі різко збільшилася з кінця 1970-х років. До середини XXI століття може виявитися, що в сукупності вони будуть нівелювати зусилля з розвитку економіки. Тому більшість розвинених країн переходять на нову стратегію забезпечення безпеки, засновану на принципах прогнозування і попередження техногенних аварій.

Процеси функціонування складних технічних систем і процеси забезпечення їх безпеки багато в чому принципово відрізняються. Перші орієнтовані на досягнення головної виробничої мети, тому їм приділяється головна увага. В підсумку з'являються прецеденти, коли розробка завдань та вимог до системи безпеки не отримує необхідного обґрунтування і, як наслідок, виявляється, що показники та властивості розробленої системи не відповідають необхідним потребам складних об'єктів, для яких вони розроблялися.

Перш за все, управління складними об'єктами має бути системним, що слід трактувати як системну узгодженість оцінювання і коригування

працездатності та безпеки в процесі функціонування таких об'єктів не тільки за відповідними задачами і очікуваними результатами, а й по оперативності взаємодії в реальних умовах нештатної ситуації.

Розробка заходів щодо зниження наслідків техногенних аварій є фундаментальною науковою основою досягнення сталого розвитку суспільства.

**1.1.3 Напрямок оновлення основних засобів підприємств з метою запобігання ризику виникнення аварійних ситуацій.** На кожному підприємстві процес фізичного та морального зносу основних фондів повинен управлятися.

Відтворення основних фондів – це безперервний процес їх оновлення шляхом придбання нових, реконструкції, технічного переозброєння, модернізації та капітального ремонту.

З метою подолання промислової та екологічної кризи в Україні на всіх етапах відтворення основних фондів повинні впроваджуватися нові технічні розробки, які відповідають кращим світовим зразкам.

Необхідно відзначити, що за останні роки створені нові розробки і технології, які можуть дозволити істотно підвищити ефективність технологічного обладнання. При цьому вони не вимагають серйозних капітальних витрат при впровадженні та великих змін конструкцій. Ці зміни цілком можна провести при плановому ремонті устаткування, одночасно здійснивши і його модернізацію.

Така модернізація повинна забезпечити поліпшення споживчих властивостей агрегату або установки в жорстких рамках існуючої конструкції. Це повністю вписується в основну концепцію розвитку інфраструктури нафтогазового і паливно-енергетичного комплексів, де пріоритетним є підвищення надійності, продуктивності і економічності обладнання при одночасному зниженні експлуатаційних витрат [34, 35].

Цей шлях вважається більш привабливим, ніж поширена в наш час практика продовження ресурсу обладнання [36, 37]. По-перше, цей захід аж ніяк не дешевий, так як вимагає витрат на систему діагностики та моніторингу, а також кваліфікованого персоналу і спеціалізованих організацій, що мають право такий дозвіл видавати. По-друге, він вже практично себе вичерпав. Ще в 2009 р на термін до 5 років продовжено експлуатацію тільки для 4,2 % шахтних вентиляторів головного провітрювання від усього обсягу обстеження [21]. По-третє, таке рішення проблеми закладає майбутнє відставання як в ефективності виробництва, так і в промисловій та техногенній безпеці.

Позитивною рисою модернізації з впровадженням останніх технічних досягнень є автоматична їх апробація в важких експлуатаційних умовах, що в майбутньому дозволить закладати високоефективні наукомісткі технології в серійні зразки нової техніки.

Модернізаційний підхід має і ряд інших переваг, основними з яких є:

- можливість поетапного впровадження нових технічних рішень і удосконалень в конструкцію технологічного обладнання;
- можливість впровадження нових технічних рішень, що підвищують рівень техногенної безпеки під час ремонтів обладнання, яке було в експлуатації.

Статистичні дані свідчать, що для електродвигунів напрацювання на відмову найчастіше визначається надійністю підшипникових вузлів.

Згідно літературних даних, до 90 % випадків аварійних руйнувань підшипникових вузлів електродвигунів прямо або побічно викликано незадовільною роботою ущільнень [38]. Таким чином, необхідно розглянути потенційні можливості штатних ущільнень, що застосовуються в підшипникових вузлах електричних машин.

## **1.2 Вплив підшипнико-ущільнювальних вузлів технологічного обладнання на техногенну безпеку небезпечних виробництв**

### **1.2.1 Умови експлуатації підшипнико-ущільнювальних вузлів.**

Надійність підшипникових вузлів залежить від форми і якості поверхневого шару деталей, від наявності мастильного матеріалу, створення процесу змащення, відведення продуктів зносу і тепла, але насамперед від забезпечення герметичності підшипникового вузла в цілому [39]. Навіть незначне порушення герметичності підшипникових вузлів в умовах експлуатації машин знижує надійність їх роботи, підвищує витрати мастильних матеріалів і потребу в запасних частинах, а також необхідність виконання позапланових ремонтних робіт.

Менше 30 % підшипників насосів повністю відпрацьовують закладений виробником термін служби. Більшість з них виходять з ладу в результаті потрапляння в корпус забруднень з навколишнього середовища. Наявність всього лише 0,1 % вологи в корпусі підшипника скорочує його ресурс на 90 % [40].

Відзначається, що близько 91 % підшипників кочення, які використовуються у світовій промисловості, не досягають закладеного виробником базового розрахункового ресурсу [41]. Цей параметр передбачає, що лише 10 % виробів з групи ідентичних підшипників, що працюють в однакових умовах, можуть не досягти розрахункового ресурсу без появи перших ознак втоми металу одного з кілець або тіл кочення.

Численні дослідження показали, що основною проблемою виходу підшипників з ладу є забруднення їх мастила. Найбільша кількість забруднень потрапляє в корпус підшипників через місця виходу валу і вентиляцію корпусу.

Специфіка експлуатаційного режиму підшипникових вузлів визначається наступними факторами: наявністю інерційних навантажень, викликаних коливальним рухом підшипника разом з машиною; високими

питомими навантаженнями, високими частотами обертання при наявності биття, еліпсності валів; запиленістю і забрудненням навколишнього середовища абразивними частинками, вологою і т.д. [42].

Досвід експлуатації підшипникових вузлів показує, що в них проникає значна кількість пилу, сторонніх часток, в тому числі абразивних і агресивних, вологи, водяного туману та ін., що викликає передчасне зношення і наступне руйнування самого підшипника, а потім і всього агрегату в цілому [43].

Висока запиленість повітря виникає при розробці та перевантажуванні сипучих порід в умовах сухого повітря і дії вітру. Частинки і пил, потрапляючи в мастило, забруднюють його, дряпають металеву поверхню, викликаючи абразивне зношення. Осадження пилу на обмотках електричних машин погіршує тепловіддачу, викликаючи їх перегрів. Пил з високим вмістом вугілля і руди стає електропровідним, осідаючи на оголені струмоведучі елементи, може викликати витік струму або коротке замикання. Інтенсивність виділення пилу в вугільному забої досягає 50 г/с.

Гірничі машини, що працюють в підземних умовах, піддаються впливу шахтних вод, які в залежності від порід розроблюваних родовищ можуть бути кислотними або лужними, що викликають корозію обладнання. Проникаючи в редуктори, вони викликають корозію підшипників і зубчастих передач, а разом з пилом – абразивне зношення. У присутності вологи ущільнення на валу є мініатюрною батареєю. Електричний потенціал від корпусу ущільнення до валу становить 0,3 В.

В процесі експлуатації обладнання схильне численним температурним коливанням: день / ніч, спокій / робота. При підвищенні температури тиск в замкнутому просторі корпусу підшипників збільшується, при зниженні – зменшується. Для вирівнювання тиску з атмосферним застосовуються сапуни і/або стандартні лабіринтові ущільнення, через які забруднення потрапляють

в корпус і мастило підшипників, що серйозно скорочує тривалість їх служби та призводить до виходу обладнання з ладу.

У зв'язку з цим ущільнення повинні:

- забезпечити повну герметичність;
- добре утримуватися в підшипниковому вузлі;
- забезпечувати мінімальне тертя і зношення;
- володіти необхідною механічною стабільністю;
- бути стійкими в експлуатації до впливу підвищених позитивних і

негативних температур, навантажень, кисню, повітря, вологи, пилу і агресивних компонентів;

- працювати за високих швидкостей обертання валу;
- мати просту конструкцію і не пред'являти підвищених вимог до

чистоти оброблення;

- мати високу ремонтпридатність.

Ключовою вимогою є забезпечення повної герметичності. Застосування відомих типів ущільнень часто не приводить до вирішення поставлених технічних завдань. Зупинимося докладніше на перевагах і недоліках традиційних типів ущільнень.

**1.2.2 Огляд традиційних ущільнювальних систем, їх переваги та недоліки.** Установка ущільнення передбачає:

1) виключення витоків мастильної рідини з підшипника або робочого середовища з корпусу машини в місці виходу валу, що обертається;

2) захист вкладишів підшипників від попадання в них пилу, бруду, металевих частинок, а також і небажаних продуктів робочого середовища - кислот, лугів і різних парів.

Конструктивно ущільнення можуть бути безпосередньо пов'язані з підшипниками, а також перебувати від них на відстані, якщо підшипники розташовані всередині корпусу механізму або пристрою.

Витік мастильного матеріалу, викликаючи руйнування масляної плівки,



призводить до металевого контакту в підшипниках, в результаті чого різко зростають тертя і зношення контактуючих поверхонь. Абразивні частинки, які проникають з навколишнього середовища в зону контакту, також викликають знос; нарешті, неабразивні чужорідні тіла, руйнують масляну плівку і теж стають причиною підвищеного зносу поверхонь кочення.

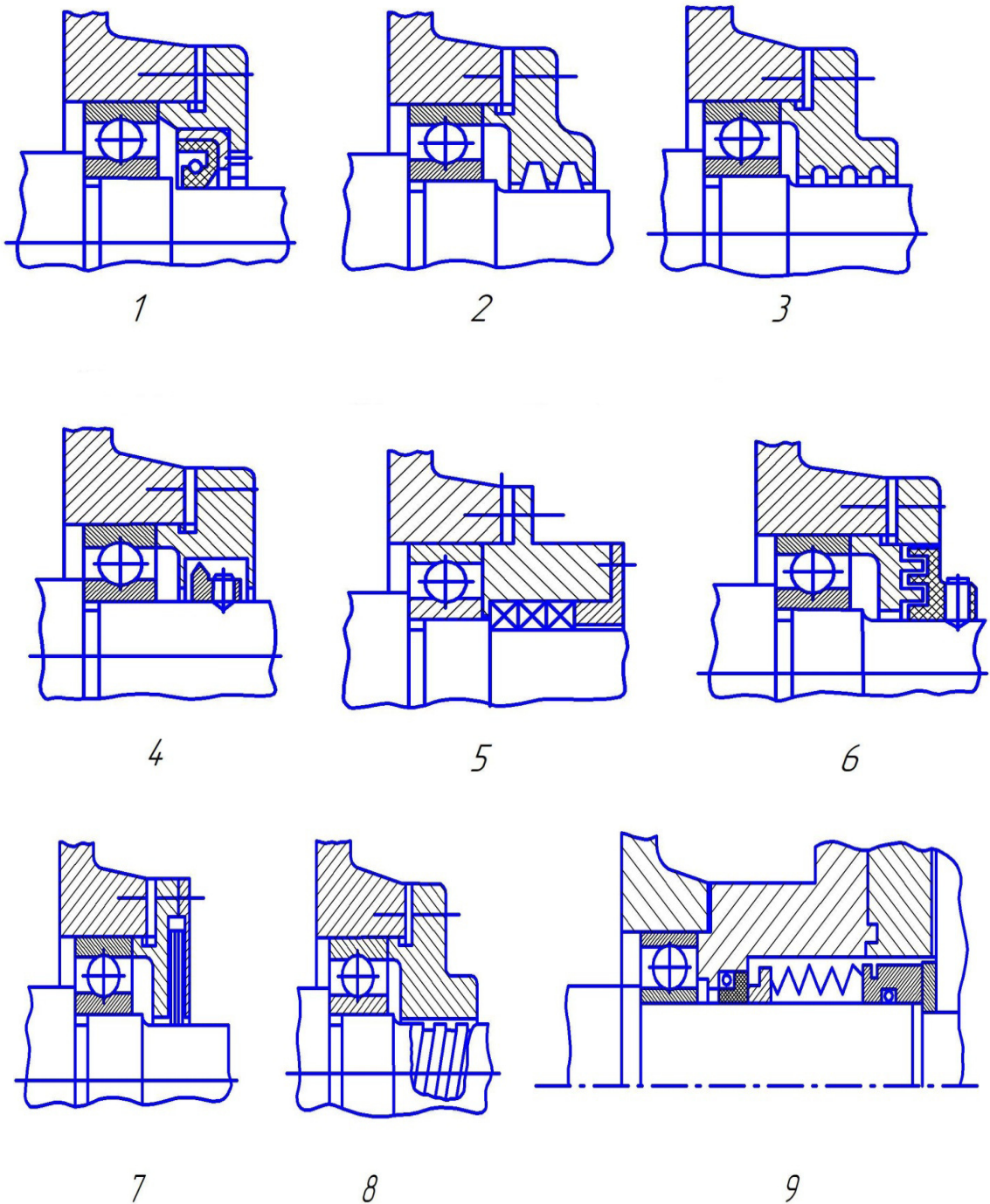
Відмінною особливістю умов експлуатації ущільнень підшипникових вузлів є також і те, що ці ущільнення не можуть бути оглянуті без зупинки агрегату протягом усього міжремонтного періоду. Про стан ущільнень можна судити тільки за зовнішніми ознаками. Ця обставина накладає додаткову вимогу до їх надійності [44].

Зазвичай всі типи ущільнень валів діляться на дві групи [45–48]: контактні ущільнення валів (сальникові, манжетні, торцеві та ін.) і безконтактні ущільнення валів (щілинні, лабіринтові, плаваючі кільця, динамічні, гвинтові та ін.).

Гідність такої класифікації – простота поділу по конструктивним виконанням вузлів ущільнень і способам герметизації. Але при сучасному розвитку ущільнювальної техніки такий поділ не відображає різноманіття створених ущільнень. Так, невідомо, до якої групи віднести, наприклад, щіткові ущільнення або магніторідинні герметизатори.

Більш прийнятна класифікація приведена в роботі [49], де пропонується розділити всі типи застосовуваних вузлів ущільнень валів на чотири основні групи: контактні, контактні-щілинні, безконтактні щілинні (з розподілом на 2 підгрупи: безумовно-безконтактні і умовно-безконтактні) і затворні.

У таблиці 1.1 наведені параметри застосовності і величини витоків для всіх типів ущільнень, що знайшли застосування в підшипникових вузлах і належать до перерахованих груп. Основні типи ущільнюючих пристроїв показані на рисунку 1.4.



1 – манжетне; 2 – із застосуванням фетрових кілець; 3 – із застосуванням кільцевих проточувань; 4 – із застосуванням масловідбійних кілець; 5 – сальникове; 6 – лабіринтове; 7 – щіткове; 8 – гвинтове; 9 – торцеве

Рисунок 1.4 – Ущільнюючі пристрої підшипникових вузлів

Таблиця 1.1 – Параметри застосовності і величини витоків ущільнень підшипникових вузлів

Група вузла ущільнення (підгрупа)	Тип вузла ущільнення	Перепад тиску $\Delta p$ , МПа	Швидкість ковзання, м/с	Витік
1	2	3	4	5
1. Контактні	Манжетні	0,05 – 0,15	$\leq 25$	Питомі витіки на одиницю довжини контакту $< 10^{-9}$ л/(мм • с)
	Сальникові	Тиск затворного середовища вище ущільнюваного на 0,05 – 0,1 МПа	$\leq 30$	$(1 - 5) \cdot 10^{-3}$ л/с затвора рідкого середовища
	Торцеві з аксіально-рухомим підпружиненим блоком	$\leq 15$	до 300	0 – 0,035 л/с для рідких середовищ; 0,1 – 5 нл/с для газових середовищ
2а. Щілинні (безумовно-безконтактні)	Щілинні прямоточні з гладким каналом	Не обмежений	Не обмежена	$(1 - 20) \cdot 10^{-6}$ л/(мм • с) для рідких середовищ
	Щілинні гребінкові			У порівнянні з 2а.1 нижче на 15 – 20 % для рідких середовищ; в кілька разів - для газових середовищ
	Лабіринтові одноярусні	Обмежений міцністю гребінкових елементів	Не обмежена	У порівнянні з 2а.1 нижче на 20 – 30 % для рідких середовищ; в кілька разів - для газових середовищ

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
26. Щілинні (умовно-безконтактні)	Статорні цільні плаваючі кільця	Для тривалого ресурсу $\Delta p \leq 0,2$ МПа	Не обмежена	Менше, ніж для п.2а.1 в 2 – 5 разів
	Статорні розрізні (сегменти) плаваючі кільця	Обмежений деформацією сегментних елементів	Обмежена зазором в радіальній щілині	Менше, ніж для цільних плаваючих кілець в 2 – 4 рази
	Стільникові	Обмежений міцністю стільникових елементів	Не обмежена	У порівнянні з п.2а.1 нижче в кілька разів для рідких і газових середовищ
3. Контактно-щілинні	Роторні пружно-розтискні плаваючі кільця	$\leq 0,1$ на ступені	$\leq 200$	Кілька г/с
	Щіткові	$\leq 2$	$\leq 500$	У порівнянні з п.2а.3 витік газового середовища нижче в 2 – 7 разів
4. Затворні	Гвинтові і лабіринтно-гвинтові	Визначається окружною швидкістю і розмірами гвинта, в'язкістю середовища	Обмежена температурою середовища в вузлі ущільнення	Від 0 до допустимої розрахункової величини
	Імпелерні	Визначається окружною швидкістю імPELLера	Обмежена температурою середовища в вузлі ущільнення	
	Магніто-рідинні	Від $10^{-4}$ Па до 1 МПа	До 30 м/с, обмежена температурою середовища в вузлі ущільнення	Практично дорівнює нулю

Переваги і недоліки розглянутих типів ущільнень за їх еколого-економічними показниками зведено в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Переваги і недоліки ущільнень підшипникових вузлів.

Тип ущільнювача вузла	Переваги	Недоліки
1	2	3
1. Манжетні	Простота виконання; невисока вартість; невеликі габаритні розміри, стійкість до агресивних середовищ, ресурс роботи до 5000 годин	Низькі параметри по навантаженню; низькі швидкості ковзання в парі тертя
2. Сальникові	Простота виконання, можливість заміни вузла без розбирання машини; ресурс роботи до 5000 годин	Низькі швидкості ковзання в парі тертя
3. Горцеві	Більш висока (в порівнянні з п.1 та п.2) ущільнююча здатність, швидкість ковзання в третьовій парі і ресурс роботи	Висока вартість виготовлення і обслуговування
4. Щіткові	Компактність конструкції, простота обслуговування	Технологічна складність виготовлення, значний знос ущільнюючих поверхонь, необхідність ефективного охолодження через небезпеку підгоряння або оплавлення щетинних стрижнів
5. Щілинні	Можливість розвантаження радіальної сили в щілинному каналі	Великі радіальні зазори, значна величина витоку
6. Лабіринтові	Можливість виготовлення на універсальному станочном обладнанні	Виникнення осьової сили на роторі, складність збирання-розбирання, значні витоки
7. З плаваючими кільцями	Низький витік (в порівнянні з п.5 та п.6), мала поздовжня довжина вузла ущільнення, низька чутливість до радіальних і кутових зсувів поздовжньої осі вала	Складність вузла, небезпека осьового затиснення між корпусом і валом при осьовому зсуві ротора
8. Гвинтові	Надійне створювання розрахункового перепаду тиску між порожнинами машини при обертанні вала, на функціонування вузла не впливають осьові зміщення ротора	Можливість застосування тільки для рідких середовищ, здатність ущільнювати тільки при обертанні вала, розігрів ущільненого середовища, велика споживана потужність

## Продовження таблиці 1.2

1	2	3
9. Магніторідинні	Низькі експлуатаційні витрати, висока надійність і довговічність, забезпечення практично 100% герметичності (в тому числі при герметизації вакуумних порожнин), відсутність зношування, низькі втрати на тертя	Низький утримуваний перепад тиску, чутливість до хімічного складу ущільнюваного середовища, а також до температури середовища при нагріванні, недостатньо висока швидкість ковзання, обумовлена взаємодією відцентрових і магнітних сил

Проведений аналіз переконливо доводить, що потенційні можливості традиційних ущільнень в значній мірі себе вичерпали, і забезпечити абсолютну герметичність вони не в змозі.

У зв'язку з цим актуальним є більш детально розглянути магніторідинні герметизатори, відмінною рисою яких є досягнення практично повної абсолютної герметичності.

**1.2.3 Екологічні аспекти герметизації.** Сучасні ущільнення є складними тріботехнічними системами. Вони акумулюють у собі новітні досягнення різних галузей науки і техніки: трібомеханіки, матеріалознавства, теплопередачі, теорії пружності, гідрогазодинаміки, теорії коливань, гідроаероупругості, теорії оптимізації гідромеханічних систем тощо.

Прогрес в тепловій та атомній енергетиці, гірничорудної та хімічної промисловості, суднобудуванні, авіації, космонавтиці неможливий без уміння виробляти надійні ущільнення нерухомих і особливо рухомих сполук. Технічним рівнем систем герметизації значною мірою визначається ефективність найрізноманітніших технологічних систем.

Особливої актуальності проблеми герметизації набувають у зв'язку з невідкладними завданнями захисту навколишнього середовища: за деякими даними близько 60 % викидів в атмосферу становлять неконтрольовані протікання через ущільнення [50].

У безаварійному і жорстко регламентованому стані промислові герметизуючі системи, як правило, з точки зору їх впливу на природу, екологічно рівноважні. Порушення рівноваги найчастіше відбувається при відмовах герметизуючих систем, причини яких були викладені раніше. Із зростанням масштабів виробництва стирається грань між екологічними наслідками таких відмов і стихійними лихами.

Ущільнення нерухомих і особливо рухомих з'єднань є найважливішими вузлами, що забезпечують надійність, економічність і безпеку технологічного обладнання. Саме аварійні відмови ущільнень найчастіше є причинами великих техногенних катастроф.

Для вирішення даної проблеми практично всі країни пішли шляхом створення інтегрованої системи, що включає наступні компоненти – якість, безпека, екологія, охорона праці. Вона регламентується міжнародними стандартами ISO серії 9000 (в галузі управління), серії 14000 (в області екологічної безпеки) і серії 18000 (в області професійної безпеки).

Згідно з цими документами загальні вимоги безпеки встановлюються як до експлуатаційного обладнання, так і до знову розробленого ще на етапі конструкторсько-технологічного опрацювання. Причому не тільки до обладнання, а й до елементів конструкції, монтажу, експлуатації та ремонту.

У розвиток стандартів серії ISO 14000 розроблені, наприклад, стандарти API (American Petroleum Institute) 610 «Відцентрові насоси для нафтової, хімічної з важкими умовами праці та газової промисловості» і API 682 «Ущільнюючі системи вала для відцентрових і роторних насосів». У цих стандартах відображені кращі, перевірені багаторічним досвідом експлуатації в екстремальних умовах рішення. Стандарти відрізняються практичністю, комплексністю, спрямованістю на підвищення герметичності, надійності і на зниження експлуатаційних витрат. Основна вимога згаданих стандартів зводиться до того, що надійність всіх елементів, включаючи ущільнення, повинна забезпечувати не менше як трирічну безремонтну експлуатацію

насосного устаткування. В Україні для виконання цих вимог необхідні величезні зусилля зі створення нових і вдосконалення існуючих методів і систем герметизації різних середовищ в різних умовах.

Підписавши угоду про асоціацію з ЄС, Україна взяла на себе зобов'язання протягом 5 років імплементувати основні положення щодо безпечної експлуатації обладнання з урахуванням екологічних вимог для діючих установок, а для тих, що розробляються, вони повинні вводитися негайно. Це викладено в Додатку до Глави 6 «Навколишнє природне середовище» в підрозділі «Промислове забруднення і техногенні загрози» (директиви № 2010/75 / ЄС та 2003/105 / ЄС, Регламент (ЄС) № 1882/2003).

Таким чином, екологічні аспекти герметизації, пов'язані з попередженням техногенного забруднення навколишнього середовища, дуже впливають на сучасний стан промислового виробництва і розвиток суспільства.

### **1.3 Зв'язок процесів в магніторідинних герметизаторах з поліпшенням показників екологічної безпеки досліджуваних об'єктів**

Магнітна рідина (МР) на основі гасу, створена в середині 1960-х років американським дослідником Пайпеллом [51], дала поштовх до розвитку якісно нових матеріалів, техніки і технологій. Розробки, спочатку розпочаті для створення магнітокерованого палива для космічних ракет [52] в умовах відсутності гравітації, вилилися в створення магніторідинних пристроїв. Поєднання унікальних властивостей нанодисперсних МР (намагніченість і рідкість) відкрило широкі перспективи для створення нових технологій, і в, першу чергу, магніторідинної герметизації [53–56].

У МРГ використовуються, в першу чергу, дві властивості магнітної рідини: вона втягується в область неоднорідного магнітного поля; на немагнітне тіло, занурене в магнітну рідину, діє виштовхувальна сила, яка

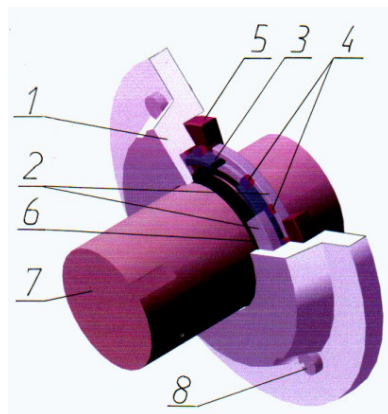


має магнітне походження (магнітолевітаційний ефект) [53, 57]. Тому в МРГ немагнітні частинки, які потрапляють в робочий зазор герметизатора, заповнений магнітної рідиною, виштовхуються з нього, при цьому сила виштовхування залежатиме від напруженості магнітного поля в зазорі і намагніченості насичення МР і перевищує силу тяжіння.

Спочатку були розроблені МРГ для космічних проектів. Пізніше вони знайшли застосування в біотехнології, фармацевтиці. Надійність і високий рівень герметичності МРГ робили їх популярними і привабливими для процесів з високими вимогами до стерильності, таких як виробництво вакцин, медичних препаратів, препаратів крові [55].

Аналіз більш ніж сорокарічного світового досвіду застосування МРГ [53–72] показує, що як в 70-ті роки, так і в даний час основним критерієм вибору МРГ була можливість забезпечення високого рівня герметичності.

Загалом, магніторідинний герметизатор складається з кільцевих магнітопроводів (полюсних наконечників) 2, що охоплюють вал 7, постійних магнітів 4, розташованих між магнітопроводами, і корпусу 1, що об'єднує частини в цільну конструкцію (рис. 1.5).



1 – корпус, 2 – полюсні наконечники, 3 – відокремлювальне кільце, 4 – магніти, 5 – кришка, 6 – МР, 7 – вал, 8 – кріпильний гвинт

Рисунок 1.5 – магніторідинний герметизатор

Магнітне поле (МП) замикається через вал і зазори між полюсними наконечниками і валом, утримуючи в них магнітну рідину. Цей шар магнітної рідини, будучи своєрідним рідким сальником, повністю заповнює зазори, надаючи герметизуючу дію і утримуючи перепад тисків по різні боки МРГ.

Насправді подібну конструкцію в чистому вигляді практично не вдається використовувати через досить складні умови експлуатації вузлів ущільнень, в яких передбачається застосування МРГ.

МРГ відносно широко використовуються в даний час для захисту дорогого промислового устаткування від попадання всередину вологи, пилу, абразивних частинок, а також у вакуумній техніці. При цьому вони успішно конкурують з традиційно застосованими манжетами, сальниками, торцевими, лабіринтовими ущільненнями тощо. [70, 73–75].

Пояснюється це тим, що МРГ мають ряд переваг перед традиційними конструкціями ущільнень. Ці переваги такі: практично повна відсутність витоків герметизуючого середовища при заданих умовах роботи; мінімальне зношення внаслідок чисто рідинного тертя в зазорі між рухливими і нерухомими елементами; відсутність необхідності в мастилі; низькі втрати потужності і малий момент опору; висока ремонтпридатність, простота обслуговування; працездатність в статиці і динаміці; самовідновлення в разі аварійного прориву ущільнюваного середовища [55, 65, 67, 70, 72, 73].

МРГ працюють при вібраційних і ударних навантаженнях, мають радіаційну стійкість. Позитивні властивості МРГ в порівнянні з властивостями традиційних ущільнень зумовлюють їх найширше розповсюдження в найближчому майбутньому і актуальність вдосконалення, моделювання і детального аналізу процесів, що відбуваються в МРГ, в даний час.

Це пов'язано з тим, що МРГ мають ряд серйозних недоліків, які істотно обмежують область їх застосування.

Основним недоліком МРГ є проблема сумісності МР і ущільнюваного середовища. Герметизатори гарно працюють при ущільненні газів, парів, аерозолів, дрібнодисперсних сипких середовищ, проте при ущільненні рідких середовищ можливо гідродинамічне перемішування ущільнюваного середовища і МР, що буде вести до порушення працездатності герметизатора. Ця проблема виникає за досить високих обертів валу.

При ущільненні рідких середовищ або повітря, що містить велику кількість рідини (наприклад, рідкого мастила при ущільненні підшипникових вузлів), необхідно вжити заходів, які мінімізують контакт ущільнюваного середовища з магнітною рідиною, що знаходиться в зазорі між валом і концентраторами магнітного потоку.

Інші недоліки МРГ визначаються порівняно невеликою сферою застосування цього типу ущільнень. Вони пов'язані з обмеженістю температурного діапазону та утримуваного перепаду тиску, що впливає з властивостей магнітних рідин і рідин взагалі.

Описані в літературі методи підвищення надійності, працездатності і довговічності МРГ не вирішують питань розширення області застосування МРГ. Крім того, їх складно реалізувати на практиці.

Так, створення різних буферних просторів і розділових газових обсягів, докладно описаних в [54], з метою зменшення витрати МР в крайовій області в місці її контакту з ущільнюваним середовищем або взагалі неможливо виконати в реальній конструкції, або конструкція ущільнення настільки ускладнюється, що робить майже неможливою його експлуатацію.

При цьому потрібно враховувати, що підбір немагнітної рідини, що добре працює в контакті з МР і виключає їх змішування, – важке завдання, особливо для високошвидкісних МРГ.

Методи, спрямовані на виключення гідродинамічної нестійкості, що виникає при обертанні вала ущільнення [69], вимагають змін щодо

конструкції технологічного обладнання, але під час проведення модернізації це неприпустимо.

В літературі відсутні дані про можливість експлуатації МРГ при робочих зазорах більше 0,3 мм. У той же час аналіз умов роботи технологічних установок, особливо гірничодобувних підприємств, показує, що цей параметр повинен бути збільшений як мінімум до 0,5 – 0,8 мм.

Одним з можливих шляхів розширення області застосування МРГ є створення комбінованих ущільнень, які об'єднують переваги традиційних і магніторідинних систем герметизації. Основною метою має бути забезпечення повної герметичності.

Тут доречно за аналогією з торцевими ущільненнями ввести поняття магніторідинного герметизуючого комплексу (МРГК), під яким будемо розуміти комбіновану герметизуючу систему, до складу якої входять магніторідинний герметизатор і допоміжні пристрої, що оптимізують умови його роботи.

Дані комплекси дозволяють підвищити надійність герметизуючої системи шляхом паралельного з'єднання її елементів. Основним елементом комплексу є магніторідинний герметизатор, за допомогою якого вирішується головне завдання – забезпечення повної герметичності. Спільно з ним працює одне або кілька допоміжних ущільнень, призначених для розвантаження основного від підвищеного перепаду тисків, зменшення плями контакту магнітної рідини з ущільнюваним середовищем і т. д.

До допоміжних елементів комплексу також необхідно віднести групу пристроїв для забезпечення нормального функціонування основного ущільнення (дозаправка магнітною рідиною, системи охолодження та ін.). У разі необхідності МРГК можуть бути оснащені системами аварійного захисту, приладами контролю і т. д.

У практиці застосування МРГ для герметизації агресивних середовищ або середовищ, які погано поєднуються з рідиною-носієм МР, прийнятні

результати дає поєднання МРГ і гідрозакрива [49, 76].

Корисно встановлювати МРГ після лабіринтних, щілинних, манжетних та інших широко використовуваних ущільнень, якщо вони компенсують значні перепади тисків екологічно шкідливих або агресивних середовищ. У цьому випадку використовується властивість практично повної герметичності МРГ, яке не дозволяє парам агресивних або шкідливих середовищ потрапляти в атмосферу, а перепад тиску утримується традиційним ущільненням [69, 70].

Основні характеристики МРГ визначаються параметрами магнітного поля в робочому зазорі і фізичними властивостями (насамперед седиментаційною і агрегативною стійкістю) магнітної рідини, що в ньому знаходиться.

Особливо важливо знати розподіл магнітного поля в робочому зазорі, тому що всі основні характеристики МРГ визначаються параметрами магнітного поля. З огляду на малу величину робочого зазору виміряти розподіл магнітної індукції фактично неможливо, тому що датчик Холла має більший розмір, ніж зазор в МРГ. Єдиною можливістю заміряти індукцію в зазорі – застосування датчиків Холла з ниткоподібних кристалів антімоніда індію [77], їх товщина складає 0,02–0,05 мм. Однак з їх допомогою теж складно домогтися повної картини розподілу магнітного поля, а з урахуванням того, що в робочій зоні МРГ магнітне поле є різко неоднорідним, то фактично неможливо. Аналітичні методи також не вирішують проблему зважаючи на складну геометрію в зазорі через наявність концентраторів магнітного потоку, нелінійних характеристик постійних магнітів, магнітопроводів і МР. Для розрахунку і аналізу поля використовуються методи, засновані на ряді припущень, відповідно вони дають результати з високою похибкою. Навіть застосування чисельних методів розрахунку не давало істотних результатів через велику складність розрахунків [78–81]. І тільки в останні роки рівень розвитку обчислювальної

техніки дозволив вирішувати такі завдання. Однак їх аналіз показав, що дослідження проводилися в області невеликих зазорів (до 0,1 мм) і невеликих діаметрах валів (до 50 мм) [54, 82–88]. Для високошвидкісних МРГ зі збільшеними зазорами дані щодо розподілу магнітного поля відсутні.

При дослідженні властивостей магнітних рідин, що забезпечують її довговічність і стійкість, необхідно враховувати наступні взаємозалежні фактори [53–56, 75, 89–106]:

- магнітні, в'язкі, теплофізичні, електричні, акустичні, оптичні та інші фізичні властивості МР залежать від концентрації наночастинок в МР;

- намагніченість, в'язкість і теплопровідність МР  $\epsilon$ , в загальному випадку, нелінійними функціями напруженості магнітного поля і температури;

- зміна параметрів зовнішнього магнітного поля і температури впливає на структурування магнітних частинок в МР. Можливе утворення агрегатів і ланцюжків, що змінює всі фізичні властивості МР, в гіршому варіанті призводить до її розшарування;

- МР прагне перетекти в область з більшою магнітною напруженістю магнітного поля;

- в МР, що рухається в магнітному полі, можуть виникати наведені ЕРС і електричні струми, які змінюють умови роботи;

- зміна параметрів магнітного поля викликає зміну в'язкості (магнітов'язкий ефект), теплоємності (магнітокалоричний ефект) і густини МР;

- форма поверхні, яку приймає МР, визначається розподілом магнітного поля, температури і прикладеним тиском;

- зміна форми і положення МР перерозподіляє магнітне і теплове поля, поле швидкостей.

Проблема оцінки стану МРГ зводиться до контролю якості МР і її стійкості по відношенню до небажаного емульгування з робочої зони

герметизатора. Контроль якості МР і її діагностика, як складної фізико-хімічної системи, ставить ряд технічних завдань. Перш за все – це завдання визначення параметрів якості для адекватної оцінки працездатності МР в тих чи інших конкретних умовах.

Відомо, що структура і стійкість МР як колоїдної системи істотно залежать від технології її виготовлення [102, 107]. Виходячи з цього, численні теоретичні дослідження пояснюють загальний характер стійкості, але застосувати їх для вибору на практиці типу МР важко [90, 101]. Тому питання про можливість застосування МР в кожному конкретному пристрої вирішується на основі непрямих даних, отриманих з реологічних, дифузійних і магнітних вимірювань, або шляхом випробувань на стендах, що моделюють реальні умови експлуатації МР.

Найчастіше для визначення колоїдальної стабільності МР використовуються методи магнітних вимірів [108, 109].

Реологічні методи [70, 110, 111] діагностики МР засновані на оцінці взаємозв'язку структуроутворення в МР з характером їх перебігу в присутності магнітного поля. У зв'язку з цим, визначивши за даними експерименту реологічні характеристики МР, можна знайти умови, при яких їх характер змінюється, а отже, змінюється і структура рідини.

У діагностичних цілях використовують і електричні характеристики МР [56, 69, 93, 102, 105, 112].

Усім вищеописаним методам притаманні дуже серйозні недоліки.

Переважає більшість робіт в цій галузі присвячена вивченню «класичних» МР типу магнетит в гасі, стабілізованих олеїновою кислотою. Однак на практиці набули поширення МР на інших, як правило, більш в'язких основах. При застосуванні таких МР в МРГ, вони піддаються зсувним напруженням і залучаються в обертання.

Для реалізації фізичних методів визначення колоїдальної стабільності і седиментаційної стійкості потрібне дороге дослідницьке і вузькопрофільне

приладове оснащення.

Проте, тільки фізичними методами практично не вдається оцінити експлуатаційні характеристики МР і прогнозувати ресурс роботи МРГ. Як правило, доводиться виконувати стендові або натурні випробування МР в умовах, наближених до експлуатаційних [70].

Ресурсні випробування також вимагають спеціально розробленого стендового обладнання, і значного часу на їх проведення.

Тому актуальним є розробка порівняно дешевого методу визначення якості МР і досить простого, щоб ним могли користуватися підприємства, що експлуатують магніторідинні пристрої.

Через вище проаналізовані проблеми, проектування МРГ в даний час в більшості випадків проводиться лише на основі досвіду і інтуїції інженерів, які застосовують при їх розробці загальні методи конструювання деталей машин. Однак такий підхід не дозволяє розробити найбільш раціональний пристрій герметизації з найкращими робочими характеристиками.

Рішення виділених у даному розділі завдань дозволить збільшити працездатність і довговічність МРГК, що підвищить надійність технологічного обладнання небезпечних виробництв і, відповідно, створить умови для забезпечення безпечної життєдіяльності людини.

Розвиток багатьох аварійних ситуацій починався через неспроможність ущільнювального пристрою забезпечити повну герметичність. Розширення області застосування МРГК сприяє покращенню стану техногенно екологічної безпеки.

#### **1.4 Огляд існуючих підходів і методів оцінки ризику техногенних аварій з екологічними наслідками**

Поняття безпеки має дві найважливіші властивості:



– небезпеку можна характеризувати впорядкованими множинами визначень, тобто говорити про більшу чи меншу небезпеку, що відповідно до загальної теорії вимірювань свідчить про вимірність цього поняття в кількісних характеристиках, які можуть бути як числами (або групами чисел), так і натуральними числами (рангові характеристики або класи небезпеки);

– небезпека має ймовірнісну природу, тобто серед характеристик небезпеки обов'язково повинні міститися параметри, що визначають імовірність або частоту реалізації шкоди.

Поняття безпеки є похідним від поняття небезпеки і вимагає для свого визначення уявлення про допустимий рівень небезпеки, який визнається прийнятним. Суб'єкти небезпеки, рівень небезпеки яких нижче допустимого, визнаються безпечними (по відношенню до тих об'єктів небезпеки, які підлягають захисту в рамках поставленого завдання забезпечення безпеки). Таким чином, безпека визначається як допустима (прийнятна, незначна) небезпека.

Будь-який живий організм реагує на зміну навколишнього середовища, на зовнішні впливи. Важливими особливостями цього процесу є [113–117]:

– нелінійність дозового ефекту різних чужих речовин на біосистеми, тобто дія малих доз часто є не пропорційно сильною;

– кумулятивний ефект будь-яких довгострокових впливів на природні об'єкти, тобто істотне збільшення і накопичення дії з часом, що приводить до різких якісних змін шляхом підсумовування слабких кількісних зсувів;

– синергічну дію різних факторів середовища на живі організми, яка нерідко призводить до несподіваних ефектів, що не є сумою відповідей на надані дії;

– індивідуальні відмінності живих організмів (в тому числі і людей) в чутливості до дії факторів середовища і в опірності до несприятливих змін;

– багатьом забрудненням характерні тригерні дії (те чи інше забруднення може викликати ланцюгову реакцію, що призводить в кінцевому підсумку до ураження цілої екосистеми).

Зазначені особливості властиві і технічним системам (дрібні відмови можуть в результаті провокувати значні наслідки; накопичення прихованих ушкоджень, старіння матеріалів, втомні динамічні процеси в конструкціях можуть призводити до різких якісних змін; спільна дія різних факторів в залежності від їх поєднання і послідовності впливу може призводити до різних наслідків; індивідуальні відмінності навіть однотипних технічних систем в силу "віку" і особливостей експлуатації до дії факторів середовища; той чи інший вплив, що знайшов "уразливу ланку" в технічній системі може призвести до ланцюгової реакції відмов і т.д.) [118–122].

Стратегія забезпечення безпеки людини ґрунтується на організованому впливі на систему "людина-машина-середовище" з метою усвідомленого перекладу її з одного небезпечного стану в інший – менш небезпечний.

Захист від аварій, катастроф і їх наслідків будується і розробляється на підставі теоретичних досліджень, які формують систему критеріїв безпеки.

До числа базових критеріїв безпеки в останні роки фахівці відносять ризики (соціальні, неприпустимі, економічні, прийнятні і т.д.), середню тривалість прогнозованого життя і долю ВВП на підвищення безпеки [123–126].

Для оцінки рівня техногенної безпеки потрібно проаналізувати ризики. Застосування поняття «ризик» дозволяє перевести безпеку в розряд категорій, які можна виміряти. Основна концепція оцінок ризику полягає в тому, щоб ідентифікувати ризики кількісно або хоча б в порівняльному вигляді (якісно).

Ризик є неминучим, супутнім фактором виробничої діяльності. Ризик об'єктивний, для нього характерні несподіванка, раптовість настання, що

передбачає прогноз ризику, його аналіз, оцінку і управління – ряд дій по недопущенню факторів ризику або ослаблення впливу небезпеки.

Аналіз ризику – це суб'єктивний процес, в ході якого враховуються не тільки кількісні показники, але і показники, що не піддаються формалізації, такі, як позиції і думки різних суспільних груп, можливість компромісних рішень, експертні оцінки і т.д. [15, 127].

Особливість аналізу техногенного ризику полягає в тому, що в ході його розглядаються потенційно негативні наслідки, які можуть виникнути в результаті відмови в роботі технічних систем, збоїв в технологічних процесах або помилок з боку експлуатаційного персоналу.

З урахуванням того, що неможливо створити абсолютно безпечні технології і забезпечити абсолютну безпеку, то, очевидно, слід прагнути до досягнення такого рівня ризику, з яким суспільство в даний період часу може погодитися. Тому для оцінки рівня техногенної безпеки слід прийняти концепцію прийнятного (допустимого) ризику. Це поняття походить від відомого в сучасній науковій літературі принципу ALARA (аббревіатура від "As Low As Reasonable Achievable": настільки низько, наскільки це досяжно в межах розумного) [127]. Прийнятний ризик поєднує в собі технічні, екологічні, соціальні аспекти і представляє певний компроміс між прийнятним рівнем безпеки і економічними можливостями його досягнення.

Аналіз ризику має ряд загальних положень незалежно від конкретної природи досліджуваних факторів ризику, методики аналізу та специфіки вирішуваних завдань. По-перше, визначення рівня ризику відбувається, як правило, в умовах недостатньої або неточної (неперевіреної) інформації, особливо коли це стосується нових технологічних процесів або нової техніки. По-друге, в ході аналізу зазвичай доводиться вирішувати ймовірнісні задачі, що може призводити до розбіжностей в одержуваних результатах. По-третє, аналіз ризику потрібно розглядати, як процес розв'язання багатокритеріальних задач, які зазвичай виникають через необхідність

знаходження компромісу між сторонами, зацікавленими в певних результатах аналізу.

Аналіз ризику повинен дати відповіді на три основні питання [15, 126]:

– що загрожує безпечній діяльності? (Ідентифікація небезпек);

– як часто виникають загрози? (Аналіз частоти);

– які можуть бути наслідки реалізації виявлених загроз? (Аналіз наслідків).

Проведений аналіз літературних джерел [15, 117, 126, 128–132] показав, що основна увага в наукових роботах приділяється питанням оцінки ризику при реалізації власне процесів життєвого циклу продукції. Слід зауважити, що питання оцінки ризиків, що виникають при розробці, впровадженні та/або модернізації технологічного обладнання та його елементів практично зовсім не розглядаються. Відповідно в літературі дуже мало висвітлюються питання кліматичних і екологічних особливостей розташування підприємств, а також існуючий технологічний рівень в даній галузі промисловості.

В роботі [125], виданої в 2014 р., прямо вказується, що мета подальших досліджень повинна складатися в оцінці ступеня впливу конкретних властивостей людино-машинної системи на умови прояву і величину техногенного ризику, що, в першу чергу, відноситься до властивостей технічних систем .

Визначається, що «найменш вивченим є питання формування екологічної небезпеки та управління безпекою в умовах постійно діючого техногенного навантаження, яке не носить яскраво вираженого екстремального характеру» [133].

Функція управління ризиком полягає в організації інженерно-технічних заходів, спрямованих на виключення факторів, що сприяють розвитку аварій. На рисунку 1.6 наведено типовий сценарій розвитку аварії [134].

Необхідно відзначити, що для обраних об'єкта (система "людина-

техніка-середовище") і предмета дослідження (об'єктивні закономірності попередження техногенних аварій) неможливо виконати прогноз інтегральних показників такої складної системи, не кажучи вже про траєкторії їх зміни. Ось чому основна увага в моделюванні процесів слід приділити з'ясуванню тих внутрішніх закономірностей і "вузьких" місць конкретної системи "людина - техніка - середовище", вплив на які виявиться найбільш результативним.



Рисунок 1.6 – Типовий сценарій розвитку аварії

На цю принципову особливість вперше вказав засновник теорії нечітких множин та теорії можливостей Л. Заде. Згідно сформульованого їм принципу несумісності: чим складніше система, тим менш правдоподібні точні кількісні передбачення її майбутньої поведінки; якщо ж складність системи перевершує деякий пороговий рівень, то точність кількісного прогнозу і практичний сенс стають майже виключаючими один одного характеристиками [135].

Звідси випливає фактична неможливість розгляду великих процесів в цілому і виникає доцільність їх декомпозиції до окремих виробничих або технологічних операцій. Така декомпозиція дозволяє відмовитися від макрорівневого розгляду досліджуваної системи «людина-техніка-середовище» і змінити його на мікрорівневий, а взаємний вплив окремих елементів врахувати за допомогою додаткових взаємозв'язків.

Неможливо визначити точний час наступу техногенної аварії, але мета досліджень повинна складатися в оцінці ступеня впливу конкретних властивостей системи "людина-техніка-середовище" та її елементів на умови прояву і величину техногенної небезпеки.

Очевидно, що при оцінці ризику техногенної небезпеки слід брати до уваги загальні принципи інтегрованої системи ризиків, що включає наступні компоненти – якість, безпека, екологія, охорона праці, які регламентуються міжнародними стандартами серії ISO 9000, 14000 і 18000.

При оцінці ризику техногенних аварій потрібно детально розглянути і вивчити два основних аспекти безпеки у техногенній сфері [9, 136, 137]:

- ступінь захищеності людини, об'єктів і навколишнього середовища (НС) від загроз, що виходять від створених і функціонуючих складних технічних систем при виникненні і розвитку аварійних і катастрофічних ситуацій;

- ступінь захищеності людини, суспільства, об'єктів і НС від загроз, пов'язаних з необґрунтованим створенням або не створенням технічних систем, технологічних процесів і матеріалів, що забезпечують досягнення основних національних інтересів країни.

Державні нормативні документи практично всіх Європейських країн наказують необхідність проведення аналізу ризику, але не вимагають суворого дотримання певних методів, залишаючи за підприємцями право створення своїх нормативів, які повинні враховувати загальні вимоги державних стандартів. У більшості зарубіжних документів щодо

застосування аналізу ризику на розсуд підприємця дозволяється використовувати один або кілька методів аналізу небезпеки та ризику: «що буде, якщо?» (What - if)»; лист перевірки (Check list); комбінацію двох методів: аналіз небезпеки і працездатності (HAZOP – Hazard and Operability Study); аналіз видів і наслідків відмов (FMEA – Failure Mode and Effects Analysis); кількісний аналіз виду, наслідків та критичності відмови (FMESA – Failure Mode and Event Criticality Analysis); аналіз дерева відмов (FTA – Fault Tree Analysis); аналіз дерева подій (ETA – Event Tree Analysis); аналіз шарів безпеки (захисту) (SLA – Safety Layers Analysis) і повний кількісний аналіз ризику (QRA – Quantitative Risk Analysis). З перерахованих методів аналізу ризику тільки QRA є суто кількісним методом, інші методи є такими частково. Власник виробництва є вільним у виборі методу аналізу ризику, але обраний ним метод повинен бути науково обґрунтований (повторюваний і контрольований), відповідати розглянутої системі, давати прозорі, легко зрозумілі результати і дозволяти створювати системи управління ризиком. [129, 130, 134, 138–143].

У монографії [129] справедливо зазначено, що «огляд наукових робіт, присвячених екологічним ризикам, показує, що основним акцентом в них є критичний аналіз сформованих підходів і вироблення рекомендацій щодо їх вдосконалення, що, звичайно ж, необхідно». Разом з тим, головна проблема полягає в тому, що відсутня загальноприйнята класифікація техногенних ризиків, а також структурування понятійної бази і системний підхід в їх аналізі.

Можна погодитися з висновком в роботі [36], що «незважаючи на численні дослідження в області оцінки та аналізу ризиків, завдання кількісного визначення рівня безпеки небезпечних виробничих об'єктів з урахуванням його особливостей поки не вирішена. Тобто аналіз і оцінка безпеки в сфері діяльності НВ носить скоріше декларативний, ніж аналітичний характер».

У статті [131] відзначили важливу тенденцію в розвитку методології оцінки екологічного ризику, а саме, тенденцію до інтеграції методів і підходів до оцінки ризику. У сферу інтеграції потрапляють розширення аналізу взаємозв'язків впливів і виробленого ефекту, спільний розгляд шкоди здоров'ю людини і негативних наслідків для екосистем, залучення інженерних ризиків, які, хоча і погано, піддаються прогнозу, в ряді випадків можуть мати домінуючу роль для виникнення екологічних ризиків, спільний розгляд множинних видів забруднення.

Забезпечення екологічної безпеки промислових об'єктів залежить не тільки від правильної оцінки техногенної безпеки об'єкта, але і знання характерних небезпек технологічних процесів.

При оцінці техногенного навантаження необхідно застосовувати інженерні методи, які базуються на теорії надійності. Необхідною умовою повинно бути виявлення можливих шляхів виникнення відмов на об'єктах підвищеної небезпеки з розрахунком ймовірності їх виникнення.

Аналіз застосовуваних у світовій практиці методів оцінки ризику показав, що найбільш прийнятним є метод аналізу видів і наслідків потенційних невідповідностей, FMEA. Близько 80 % розробок технічних виробів і технологій проводиться в даний час із застосуванням цього методу або його модифікацій [130].

Важливим для мети цього дослідження є те, що метод охоплює всі етапи життєвого циклу продукції і будь-які технологічні процеси. Причому метод дозволяє аналізувати складні технічні системи, як в цілому, так і їх складові [143].

Використовуючи кількісні показники ризику, можливо «вимірювати» потенційну небезпеку і навіть порівнювати небезпеки різної природи.

До таких методів відноситься різновид FMEA – метод Файн-Кінні (Fine & Kinney) [126, 128]. Згідно з методом Файн-Кінні техногенний ризик R розраховується за формулою:



$$R = E \cdot A \cdot S, \quad (1.1)$$

де  $E$  (Existence) – ймовірність виникнення небезпечної ситуації;

$A$  (Avoidance) – ймовірність того, що небезпечна ситуація призведе до нанесення шкоди;

$S$  (Severity) – тяжкість наслідків.

Фактичні величини, що входять в формулу, безперервні, однак на практиці використовують їх дискретні значення. Кожному фактору привласнюють значення за шкалою від 1 до 10 у відповідності з результатами оцінки, наведених в [126, 130, 142].

Величина техногенного ризику  $R$  в результаті може мати значення від 1 до 1000. Для  $R$  заздалегідь повинен бути встановлений критерій  $R_{\text{гран}}$  (граничне значення) техногенного ризику. Згідно з рекомендаціями [130] граничне значення  $R_{\text{гран}}$  задається в межах  $100 < R_{\text{гран}} < 125$  (як добуток середніх оцінок  $R_{\text{гран}} = 5 \cdot 5 \cdot 5 = 125$ ). Підприємства, які давно використовують цю методологію, в особливо відповідальних випадках працюють в діапазоні  $20 < R_{\text{гран}} < 40$  [126, 130].

Цей метод враховує також ступінь схильності людини впливу шкідливих факторів при техногенній загрозі, що й становило його вибір як основу для оцінки техногенного ризику.

При цьому необхідно враховувати основні недоліки FMEA-методу: використовувані в реальній практиці шкали оцінок бувають різко нелінійні, причому поєднання чинників (спільна їх взаємодія може бути також нелінійною [144]); іншою проблемою є можливість отримання одного і того ж значення  $R$  при різних поєднаннях показників  $E$ ,  $A$ ,  $S$ .

FMEA-метод найкраще підходить для аналізу техногенного ризику, якщо основою аналізу вважати не порівняння з критеріями прийнятності, а виявлення «вузьких» місць в системі функціонування об'єкта для подальшого

обґрунтування заходів безпеки. Робота щодо зниження ризику повинна спонукати до створення принципово нових технологій, матеріалів, конструкцій. Зі спливанням часу рівень техногенного ризику повинен знижуватися шляхом вдосконалення інженерних рішень і накопичення досвіду технічної експлуатації.

Кінцевою метою має бути перехід від техніки безпеки до безпечної техніки – гасло, яке поки ще залишається без наповненого змісту.

В даний час розробка і проектування обладнання, технологічних процесів починається з заданих або прийнятих вихідних вимог, таких як продуктивність, габарити, металоемність, технологічність виготовлення, уніфікованість вузлів і деталей, вартість тощо. І тільки потім постає питання безпечної експлуатації. І тільки тоді воно додатково комплектується так званими засобами безпеки. Створена таким чином техніка обростає гірляндами додаткових засобів безпеки, які органічно не пов'язані елементами єдиної конструкції. Саме таким чином створена техніка є технікою безпеки в теперішньому розумінні.

Створення ж безпечної техніки повинно ґрунтуватися зовсім на іншому підході. Головною початковою умовою має виступати вимога її безпечної експлуатації. Всі інші вимоги повинні бути похідними (підлеглими) вимогам безпеки. Безпека техніки повинна бути пріоритетом її техніко-економічних характеристик. При такому підході засоби безпеки і схеми функціонування їх є органічно пов'язаними в єдину конструкцію, в єдиний конструкторський задум.

## **1.5 Висновки до розділу 1, обґрунтування мети і постановка задач дослідження**

1. Обґрунтовано актуальність проблеми підвищення рівня техногенної безпеки небезпечних виробництв. Екологічні умови забезпечення

техногенної безпеки зводяться до безпечної та безаварійної роботи машин, механізмів і технологічного обладнання, що узгоджується з основним принципом екологічної безпеки - принципом запобігання екологічної небезпеки до її зародження, що можна прогнозувати через оцінку екологічних ризиків.

2. Проведено аналіз великих техногенних катастроф останніх років, що підтверджує, що в більшості випадків їх причинами були механічні несправності багатьох видів технологічного обладнання – особливо підшипникових вузлів. Розглянуто умови роботи підшипникових вузлів технологічного обладнання і, на підставі літературних даних, зроблено висновок, що до 90 % випадків аварійних руйнувань підшипників прямо або побічно викликано незадовільною роботою ущільнень.

3. На підставі аналізу досвіду експлуатації систем герметизації показано, що потенційні можливості традиційних ущільнень в значній мірі себе вичерпали і забезпечити практично 100 % герметичність вони не в змозі. Обґрунтовано, що забезпечення високого рівня герметичності можна досягти шляхом застосування магніторідинних герметизаторів. Визначено основні завдання, які потрібно вирішити для впровадження магніторідинних герметизуючих комплексів на зношеному технологічному обладнанні з метою його модернізації.

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

5. Частка техногенних небезпек у структурі ризику для життєдіяльності людини постійно зростає [145, 146]. Шлях екстенсивного розвитку людства себе вичерпав. Потенційна потужність створюваних ним засобів впливу на середовище проживання стала сумірною з силами природи планети і може привести до знищення цивілізації і навіть всього живого на Землі [147].

Проблема забезпечення техногенної безпеки займає особливе місце серед глобальних проблем всіх світових держав.

В Україні ситуація ускладнюється у зв'язку з тривалою системною кризою, в ході якої послабився контроль за виробництвом з боку державних органів, погіршилася підготовка фахівців і технологічна дисципліна, має місце значне зношення основних фондів, несвоєчасний і неякісний ремонт обладнання та ін. [2, 148].

Якнайшвидше відновлення парку діючого обладнання в силу економічних причин (насамперед нестабільність виробництва та відсутність обігових коштів) неможливо. Фізичне та моральне старіння обладнання всі останні роки значно випереджає темпи заміни та оновлення.

Зрозуміло, така модернізація з впровадженням МРГК вимагає великого обсягу досліджень, пов'язаних з вивченням взаємопов'язаних процесів різної фізичної природи, що протікають в робочому зазорі МРГК і їх впливом на техногенну безпеку.

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок про те, що створення 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, вирішенню якої присвячено пропоновану дисертаційну працю.

**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.

## РОЗДІЛ 2

### ОБ'ЄКТИ І МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Метод системного аналізу аварійних ситуацій і процесів в магніторідинних герметизуючих комплексах

Особливістю розвитку техногенного середовища за останній час є потенційна зміна її системних властивостей: виникнення ризиків, обумовлених довгими причинно-наслідковими зв'язками, міждисциплінарний характер ризиків, глобальні зміни техногенного характеру, висока чутливість до слабких впливів, скорочення можливостей прогнозування розвитку аварій і катастроф традиційними методами та ін. [15]. Сучасний стан технологічного простору характеризується як неорганізований або, за термінологією, прийнятою в філософській літературі, як хаос, але рукотворний і постійно мінливий [149].

Методологічною основою забезпечення безпеки системи «людина-техніка-середовище» є системний аналіз, оскільки він відрізняється міждисциплінарним характером досліджень, використанням як інтуїтивних, експертних, так і ймовірнісних, статистичних, а при необхідності інших математичних методів.

Доцільним є використання системного підходу до проектування та експлуатації складних потенційно небезпечних об'єктів, аналізу техногенної безпеки з використанням методів системного аналізу.

Техногенну безпеку визначають у такому разі як велику систему, що складається з ієрархічно пов'язаних між собою елементів, структур, підсистем, між якими існує тісний взаємозв'язок.

Аналіз останніх публікацій показує, що ефективність системного аналізу підтверджена практикою розробки складних систем і їх успішного впровадження в різні галузі економіки [10, 15, 150–155].

Системний аналіз забезпечує такий напрямок дослідження, де, з одного боку сприяє усуненню зайвої складності, а з іншого боку, допомагає усвідомити сутність складних проблем і приймати рішення на основі чіткого уявлення про взаємозв'язок різних процесів, тобто забезпечує основу для подання внутрішніх і зовнішніх чинників у вигляді інтегрованого цілого. Засновані на моделюванні методи системного аналізу узагальнюють новітні результати теорії і практики, представляючи тим самим сучасну точку зору на природу і способи вирішення завдання дослідження.

Слід зазначити, що забезпечення екологічної безпеки промислових об'єктів є складною задачею, тому що насамперед залежить не тільки від правильної оцінки техногенної небезпеки об'єкта, але і значення характерних небезпек технологічних процесів, поглибленого їхнього аналізу, виділення найбільш небезпечних об'єктів, виходячи з особливостей розвитку галузі в цілому. Розгляд процесів різної фізичної природи теж забезпечує системний аналіз.

Застосування системного аналізу до досліджуваних проблем техногенної безпеки базується на таких принципах [10]:

- при інтерпретації об'єкта як системи кожен елемент слід описувати з урахуванням його місця в системі;
- дослідження системи необхідно проводити невіддільне від дослідження навколишнього її середовища;
- центральним моментом системного аналізу має бути вивчення породження властивостей цілого з властивостей елементів і навпаки;
- в системному дослідженні слід прагнути встановлювати не тільки чисто причинні пояснення функціонування і розвитку об'єкта, а й їх доцільність;
- джерело перетворень системи слід шукати в ній самій;
- необхідними частинами системного аналізу потрібно вважати виявлення цілісності об'єкта, вивчення його внутрішніх і зовнішніх зв'язків,



структури і функцій, визначення системоутворюючих чинників, інтегральних властивостей і показників.

Оцінку захищеності складних технічних систем і вироблення захисних заходів припадає здійснювати в умовах високого рівня невизначеності щодо інтенсивності експлуатаційних навантажень і зовнішніх впливів на систему.

Застосування системного аналізу дозволяє вирішити питання, що виникають при впровадженні нових наукомістких технологій, до яких належить розробка МРГК. Основною проблемою тут є часовий чинник, що полягає в тому, що оцінка рівня техногенної безпеки відноситься до подій майбутнього, а наявні дані є результатом ретроспективного аналізу.

Задача прогнозування аварій для обладнання із застосуванням МРГК є слабоструктурованим завданням, ускладненим невизначеністю різного походження небезпек не тільки стохастичної, але і нестохастичної природи, пов'язаної з «людським фактором» [156].

Завдання дослідження оцінки ризику техногенної аварії при заміні на технологічному обладнанні штатних ущільнюючих систем на МРГК може розглядатися як процес, який повторюється при появі нової інформації або виникненні нової проблеми [156, 157]. При такій її постановці аналіз і оцінка техногенного ризику сприяють виявленню проблемних питань, вирішення яких вимагає уточнення даних, проведення додаткових досліджень з метою отримання більш повної інформації. З урахуванням нової інформації оцінки ризику змінюються, з'являються нові фактори та параметри, внесок яких в інтегральний ризик аварії стає визначальним. Знання окремих складових повного ризику аварії дозволяє сформулювати і обґрунтувати нові альтернативні технічні рішення (наприклад, застосування МРГК),

Внаслідок значного різноманіття причин аварій на НВ, сценаріїв їх виникнення і розвитку, широкого спектра можливих наслідків промислових аварій, встановлення абсолютно однакових для всіх НВ критеріїв

допустимого ризику аварії не представляється можливим: допустимий ризик аварії як міра прийнятної небезпеки не є абсолютним критерієм забезпечення промислової і техногенної безпеки [158, 159].

Доцільно оцінювати показники ризику аварій від окремих елементів складних технічних систем (якими є будь-яке технологічне обладнання НВ), потім їх ранжувати за ступенем небезпеки і обґрунтовувати пріоритети в заходах щодо забезпечення безпечного функціонування НВ. На основі порівняння показників ризику з середньостатистичним (фоновим) рівнем ризику аварій може визначатися ступінь небезпеки елементів складної технічної системи і встановлюватися необхідність і черговість впровадження організаційно-технічних заходів забезпечення і підвищення безпеки НВ, наприклад, заміна штатних ущільнень на МРГК [160, 161].

В аспекті даної проблеми метою системного аналізу є підвищення надійності, працездатності, довговічності, ефективності експлуатації і обслуговування технологічного устаткування шляхом заміни штатних ущільнень на МРГК.

Складність перебігу процесів в МРГ часто не дає можливості отримати точні рішення і відповіді на поставлені питання. Отримувані в деяких окремих випадках рішення в силу своєї локальності створюють мозаїчну картину, що утрудняє розуміння суті питання в цілому. Неоднозначність одержуваних рішень можна пояснити наступним. Магнітна рідина є новим матеріалом з невивченими до кінця властивостями. Складність, велика різноманітність і недосконалість технології отримання МР зумовлюють невизначеність деяких параметрів і досить великий розкид її характеристик і властивостей. МРГ є складною системою, що об'єднує в собі в процесі експлуатації різні виникаючі фізичні явища. Магнітні, теплові та механічні поля існують і взаємодіють одночасно. Саме спільний прояв взаємопов'язаних фізичних процесів - електромагнітних, теплових, силових - формує робочі властивості МРГ і визначає їх функціональну придатність.

З аналізу властивостей МР та вимог до умов її роботи можна зробити висновок, що для коректного прогнозування характеристик МРГК необхідно визначати розподіл різних фізичних полів (магнітних, теплових, концентраційних, полів розподілу швидкостей течії, деформацій положення і поверхні МР) з урахуванням того, що багато фізичних властивостей МР змінюється відповідно до зон, виділених в об'ємі МР, є взаємозалежними та впливають один на одного. Такі залежності враховані за допомогою представлення їх у вигляді зворотних зв'язків, що визначаються за результатами розрахунку взаємовпливаючих полів. Взаємозалежність фізичних явищ і впливів один на одного в МР ілюструється рисунком 2.1. Безумовно, деякі з цих залежностей можуть бути відсутніми, бути несуттєвими або мати досить обмежений характер використання в пристроях.

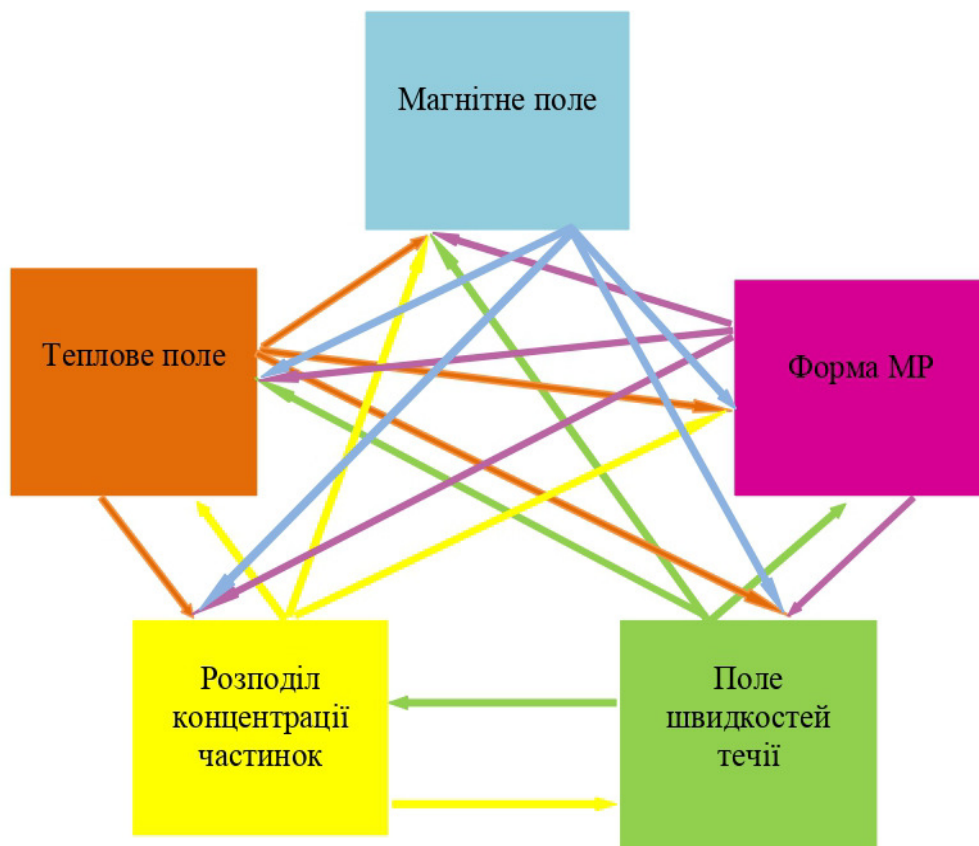


Рисунок 2.1 – Взаємовплив фізичних полів в магніторідинному герметизаторі

Взаємозв'язок між елементами виділеної системи здійснюється таким чином. Зростання температури знижує намагніченості постійного магніту і МР, коефіцієнти теплопровідності, в'язкості і магнітну сприйнятливості рідини. Одночасно намагніченості постійного магніту і рідини, магнітні властивості сталі магнітопроводів і МР залежать від параметрів магнітного поля. Крім того, величина індукції магнітного поля в робочому зазорі МРТ впливає на структуроутворення феромагнітних частинок в МР. Ці частинки, в свою чергу, визначають значення коефіцієнта теплопровідності і в'язкості, а значить, і втрати, що перетворюються в теплову енергію. Форма і положення МР залежать від прикладеного перепаду тиску і визначаються за розподілом магнітного поля, яке саме залежить від положення рідини.

При дослідженні МРТ необхідно також використовувати системний аналіз, в якому, при прийнятих припущеннях, всі процеси розглядаються в рамках загальної системи з урахуванням всіх супутніх факторів і їх взаємозв'язків.

Таким шляхом вдається створити найбільш повну модель МРТ, що забезпечує спільне вивчення процесів різної фізичної природи, їх особливостей і проявів у взаємозв'язку, який визначається закономірностями об'єкта (принципами роботи, конструкцією, параметрами).

## **2.2 Теоретичний аналіз процесів в магніторідинних герметизуючих комплексах і їх екологічних наслідків**

Складність процесів, що протікають в робочому зазорі МРТ, практично ніколи не дає можливості отримання точних рішень і відповідей на поставлені запитання. Це можна пояснити невивченими до кінця властивостями МР, складною технологією її отримання та полідисперсністю наночастинок. На магнітну рідину 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, що відбуваються у МРГ, розглянуто в загальних рисах для виявлення основних закономірностей, оцінки меж впливу тих чи інших факторів на роботу герметизатора, знаходження найбільш перспективних шляхів підвищення надійності та довговічності МРГК з метою створення умов для безпечної життєдіяльності людини, враховуючи на критичні ситуації, які можуть виникати під час техногенних аварій.

Спочатку представляється необхідним розглянути наступні процеси в МРГ: розігрів МР в робочому зазорі в початковий момент часу при звичайній експлуатації і при додаванні в зазор мікронних феромагнітних частинок; взаємовплив відцентрових і магнітних сил.

Як правило, одержувані чисельні результати позбавлені наочності, властивої аналітичним виразам, і втрачають спільність.

Тому для попереднього аналізу впливу відцентрових сил та розподілу температур обраний аналітичний метод, який базується на загальних рівняннях ферогідродинаміки [53, 55, 57, 58, 110].

**2.2.1 Методика аналізу впливу відцентрових сил на працездатність високошвидкісного магніторідинного герметизатора.** Фактори, незначні при невеликих швидкостях, зі збільшенням швидкості поверхні вала стають істотними для роботи МРГК. Вони впливають як на утримуваний герметизатором перепад тиску, так і на ресурс роботи МРГ.

Перш за все ускладнюється гідродинаміка МРГК. Причиною цього є той факт, що на утримання магнітної рідини в робочому зазорі герметизатора, починають впливати, крім магнітних, ще й відцентрові сили, а до осьового градієнту тиску, викликаного магнітною об'ємною силою, додається радіальний градієнт тиску, викликаний рухом рідини.

Цій проблемі в літературі приділяється мало уваги, так як в основному розглядається схема, коли вплив магнітних сил значно більше відцентрових.

Необхідно відзначити, що теоретичний аналіз магніторідинних пристроїв пов'язаний зі складністю рівнянь, що описують поведінку магнітних рідин. Тому розглядається наближений аналіз, який дозволяє отримати деякі якісні та кількісні результати.

У роботі [55] оцінку взаємовпливу відцентрових і магнітних сил проводять, вводячи магнітне число Фруда. Однак автори приймають лінійний закон зменшення швидкості рідини від рухомого вала до нерухомого полюсу.

Задача про стійкість течії між обертовими співвісними циліндрами (течія Тейлора-Куетта) являє собою класичну проблему гідродинамічної та магнітогідродинамічної стійкості.

Для течії Куетта зі складною геометрією робочого зазору на даний час не отриманий критерій, що дозволяє класифікувати обертання як стійке або як нестійке [162].

У припущенні, що середовище – в'язка нестислива рідина, а рух стаціонарний, рівняння, що описують рух магнітної рідини, подаються у такому формалізованому вигляді [53, 57]:

$$(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -\vec{\nabla}p + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \vec{V} + \chi \frac{1}{Fr_m} \rho H \vec{\nabla} H, \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0, \quad (2.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = 0, \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = 0, \quad (2.4)$$

де  $\vec{V}$  – вектор швидкості, м/с;

$\vec{H}$  – вектор напруженості магнітного поля, А/м;

$\vec{M}$  – вектор намагніченості, А/м;

$\rho$  – тиск, Па;

$\chi$  – магнітна сприйнятливність;

Re – число Рейнольдса;

$Fr_m$  – магнітне число Фруда, яке визначається за формулою [53, 55]:

$$Fr_m = \frac{\rho(V_{0\theta}^s)^2}{r_s \mu_0 M_s |\vec{\nabla} H|} = \frac{\rho(V_{0\theta}^s)^2 L}{r_s \mu_0 M_s h_{\max}} = \frac{\rho(V_{0\theta}^s)^2 L}{\Delta p_{ct} r_s}, \quad (2.5)$$

де  $|\vec{\nabla} H| \approx H_{\max} / L$ ;

$L$  – характерний просторовий розмір неоднорідності магнітного поля, м;

$$\Delta p_{ct} = \mu_0 M_s H_{\max};$$

$V_{0\theta}$  – швидкість поверхні вала, м/с.

У радіальному напрямку МРГ займає область, обмежену валом і зовнішнім корпусом, а в осьовому напрямку вільними поверхнями, утримуваними силами поверхневого натягу. Для оцінки впливу відцентрових сил в першому наближенні окремо розглянута задача для в'язкої рідини.

З огляду на те, що концентрація полів має місце в центральній зоні герметизатора, де вплив бічних меж мало вагомий для оцінки впливу відцентрових сил розглядається плоска задача.

У цьому випадку задача зводиться до інтегрування рівнянь Нав'є-Стокса в циліндричній системі координат  $(r, \theta, z)$ , які включають рівняння збереження імпульсу (впливає з (2.1)):

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_\theta^2}{r} = -\frac{\partial p_r}{\partial r} + \frac{1}{R_e} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} - \frac{V_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right], \quad (2.6)$$

$$V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r V_\theta}{r} = -\frac{1}{r \rho} \frac{\partial p_r}{\partial \theta} + \frac{1}{R_e} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} \right], \quad (2.7)$$

і рівняння нерозривності (впливає з (2.2)):

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} V_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} = 0. \quad (2.8)$$

На циліндричних поверхнях повинні виконуватися граничні умови:

$$V_r(r, \theta)|_{r=re} = 0, \quad V_r(r, \theta)|_{r=1} = 0, \quad (2.9)$$

$$V_\theta(r, \theta)|_{r=re} = 1, \quad V_\theta(r, \theta)|_{r=1} = 1, \quad (2.10)$$

$$p_r(r, \theta)|_{r=1} = \frac{p_0^s(\theta)}{\rho(V_{0\theta}^s(\theta))}, \quad (2.11)$$

$$\text{де } Re = \frac{r_s V_{0\theta}^s}{\nu}.$$

У разі, якщо немає девіації вала в зазорі, задача може розглядатися як осесиметрична, так що похідні шуканих функцій по дуговій координаті дорівнюють нулю  $\frac{\partial}{\partial \theta}(\cdot) \equiv 0$ . Крім того, поле швидкостей  $\vec{V}(r) = \{V_r, V_\theta, 0\}$  і тиск  $p$  запишемо у вигляді:

$$V_r = V_{0r}(r), \quad V_\theta = V_{0\theta}(r), \quad p = p_{0r}(r). \quad (2.12)$$

**2.2.2 Методика аналізу розподілу температурних полів в зазорі магніторідинного герметизатора.** Розширення температурного діапазону застосування МРГ прямо пов'язано з розширенням сфери їх застосування.

Незалежно від особливостей конструкції магнітний ланцюг будь-якого МРГ обов'язково включає джерело магнітного поля, в якості якого використовуються постійні магніти, і МР. Температурна стабільність постійних магнітів зі сплаву Nd-Fe-B не перевищує 150 °С, у магнітів зі сплаву SmCo<sub>5</sub> вона трохи вище. У цьому діапазоні температур практично не існує рідин, які б можна було використовувати в якості рідкої основи МР зважаючи на їх інтенсивне випаровування або повний розклад.

Здається природним при експлуатаційних температурах в діапазоні 100–200 °С або при зростанні тепловиділень за рахунок в'язкого тертя в



зазорі застосовувати в складі МРГК системи охолодження і, відводячи тепло, забезпечувати працездатність герметизатора. Однак, досвід впровадження МРГ показує, що такі системи досить важко встановити як технологічно, так і конструктивно [67, 68]. Система охолодження, яка відводить необхідну потужність з робочого зазору, не гарантує достатню температурну однорідність всередині шару МР.

При числі Брінкмана  $B_r \gg 1$  навіть одночасне охолодження і вала, і концентраторів магнітного потоку магнітопроводу не дасть бажаного результату, бо в центрі зазору рідина буде гарячою [55].

Досвід промислової експлуатації МРГ показує, що зростання температури в зазорі за рахунок сил в'язкого тертя незначне, рідко перевищує  $1 - 2 \text{ }^\circ\text{C}$  [67]. У промислових МРГ магнітні сили великі в порівнянні з усіма іншими силами, тому структурований стан МР практично не порушується. Це узгоджується з авторами, які обґрунтовують, що впорядкованість розташування магнітної фази в зовнішньому магнітному полі повинна зводити до нуля ефект незначних температурних перепадів [54].

При запуску обладнання неодноразово спостерігається різке підвищення температури в зазорі МРГ, що триває до моменту виходу на стаціонарний режим. Навіть короткочасний закид температури негативно впливає на МР, магнітні властивості постійних магнітів. З урахуванням того, що найбільше застосування МРГ отримали для захисту підшипникових вузлів, необхідно також враховувати наявність датчиків на підшипникових стійках і аварійного відключення обладнання з огляду на підвищену температуру.

Поведінка магнітних рідин в робочому зазорі МРГ досліджувалась із застосуванням чисельних методів у багатьох роботах, відзначимо [163–169].

Конвективні і дифузійні процеси, що мають безпосереднє відношення до поведінки МР в зазорі, розглядалися в роботах [53, 56, 170–173].

Для отримання якісних характеристик результатів роботи МР надано наближений аналіз діючої системи герметизації.

Традиційна модель ферогідродинаміки в разі в'язкого нестисливого середовища в ортогональній системі координат  $\vec{x} = \{x_1, x_2, x_3\}$  розглядається у вигляді такої системи рівнянь [53, 55, 174]:

$$\rho[\partial \vec{V} / \partial t + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V}] = -\vec{\nabla} \tilde{P} + \eta_d \nabla^2 \vec{V} + \mu_0 (\vec{M} \cdot \vec{\nabla}) \vec{H}, \quad (2.13)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0, \quad (2.14)$$

$$\partial T / \partial t + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})T = \chi \nabla^2 T + q(t), \quad (2.15)$$

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)], \quad (2.16)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = 0, \quad (2.17)$$

$$\vec{\nabla} = (\vec{H} + \vec{M}) = 0, \quad (2.18)$$

$$\vec{M} = M \vec{H} / H, \quad (2.19)$$

$$M = M_0 - K_p (T - T_0) + \chi_m (H - H_0). \quad (2.20)$$

Система рівнянь (2.13) – (2.20) записана в розмірному вигляді. Шукані функції в (2.13) – (2.20):  $\vec{V}$  – вектор швидкості, м/с;  $T$  – температура, К;  $P$  – тиск, Па;  $\vec{M}$  – вектор намагніченості, А/м;  $\vec{H}$  – вектор напруженості магнітного поля, А/м;  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>. Система (2.13) – (2.20) включає: (2.13) – рівняння збереження імпульсу; (2.14) – рівняння нерозривності; (2.15) – рівняння теплопровідності; (2.16) – рівняння стану; (2.17) – умова відсутності зовнішнього заданого струму; (2.18) – умова відсутності магнітних зарядів; (2.19) і (2.20) – рівняння, що визначають стан магнітної рідини.

У магнітних рідинах  $\vec{M}$  і  $\vec{H}$  колінеарні, як це видно з рівняння (2.19), а скалярна величина  $M/H$  в загальному випадку характеризує намагніченість ферорідини та визначається складною функцією  $M(H)$  і залежить також від

інших параметрів виразу (2.20). У деяких випадках при постійних величинах густини і температури з виразу (2.20) отримують  $\left(\frac{\partial M}{\partial H}\right)_{\rho,T} = \chi_r$  і тоді приймається  $\frac{M}{H} = \chi_r$  [39]. Більш докладний виклад наведено в роботах Розенцвейга [53, 175].

Далі розглядається осесиметрична задача в циліндричній системі координат  $r, \theta, z$ . У ній виділяємо три області (рис. 2.2):  $\Omega_1$  – вал,  $\Omega_2$  – шар рідини з зоною розігріву,  $\Omega_3$  – зовнішній корпус,  $h$  – товщина шару рідини,  $x$  – відповідає радіальній координаті  $r$ .

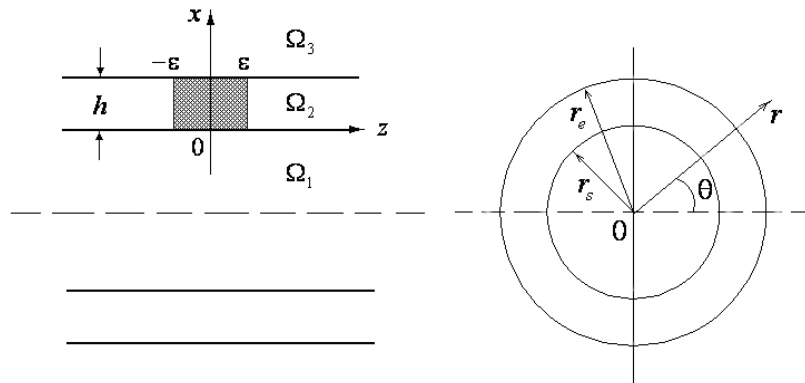


Рисунок 2.2 – Спрощена схема МРГ в циліндричних координатах

Система рівнянь (2.13) – (2.20) після зазначених вище спрощень без урахування конвективного члена  $(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V}$  в безрозмірних величинах, віднесених до радіусу вала  $r_s$  і його тангенціальної швидкості  $V_{0\theta}^S$ , записується у вигляді:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -\vec{\nabla}P + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \vec{V} + \chi_r (\vec{H} \cdot \vec{\nabla})H, \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\text{Pr Re}} \nabla^2 T + Cf(t), \quad (2.22)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = 0, \vec{\nabla} \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = 0, \vec{M} = M\vec{H} / H. \quad (2.23)$$

Величина  $q(t)$  з (2.15) записується в (2.22) як  $Cf(t)$ , де  $C$  – амплітудне значення функції розігріву  $C = \text{Br} \frac{1}{P} \dot{S}_{r\theta}^2$ ,  $\dot{S}_{r\theta}$  – тензор швидкостей деформації рідини, що обертається, а  $f(t)$  – зміна її в часі.

Тензор швидкостей деформації обчислюється на основі відомого рішення для обертової в'язкої рідини в зазорі [176] і усереднюється так, що початковий розподіл температури по товщині зазору рівномірний, і записується у вигляді постійної величини.

В (2.21) – (2.22) прийняті позначення:  $\text{Pr} = \frac{v_k}{\chi}$  – число Прандтля, яке описує гравітаційну конвекцію,  $v_k = \eta_d / \rho$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $\text{m}^2/\text{с}$ ;  $\eta_d$  – коефіцієнт динамічної в'язкості,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\chi = \frac{k_t}{\rho c_p}$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $k_t$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\text{Re} = \frac{V_{0\theta}^S r_s}{v_k}$  – число Рейнольдса, в результаті добутку чисел Рейнольдса і Прандтля виходить число, яке будемо позначати як  $P$ ,  $P = \text{PrRe}$ ;  $V_{0\theta}^S$  – тангенціальна швидкість поверхні вала,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\text{Br} = \frac{\eta_d V_{0\theta}^{S2}}{k_t T_0}$  – число Брінкмана, що характеризує теплообмін в шарі рідини (чисельник характеризує дисипативні тепловиділення в МР, знаменник – відведення тепла),  $T_0$  – початкова температура,  $\text{К}$ ;  $\chi_r$  – коефіцієнт, що враховує властивості магнітної рідини.

Наведена система (2.21) – (2.23) – це система 8 скалярних рівнянь для визначення 8 невідомих  $\tilde{P}$ ,  $T$ ,  $V_n$ ,  $T_n$ ,  $n=1, 2, 3$ . Вона включає два істотно

нелінійних члена і побудова аналітичних рішень проблематична.

Надалі при аналізі розігріву вплив магнітного поля на компоненти швидкості в (2.22) не враховується. При цьому вплив всіх параметрів враховується в амплітудному коефіцієнті  $C$ .

Максимальний розігрів від обертової рідини має місце в середині ущільнювача, так що можна знехтувати впливом торців і розглядати плоску задачу, вважаючи похідні по  $z$  рівними нулю. Після усереднення по товщині отримуємо функцію, залежну від часу  $t$  з коефіцієнтом  $C$ , що включає всі параметри задачі, які приймаються замороженими. У загальному випадку параметри залежать від магнітного поля та температури і в різних конкретних ситуаціях вони різні і коефіцієнт  $C$  теж різний. На цій основі формулюється початково-крайова задача поширення тепла вздовж радіальної координати  $r = x$ . Товщина шару набагато менше областей вала  $\Omega_1$  і корпусу  $\Omega_3$ ,  $h/r_s \ll 1$ ,  $h/r_e \ll 1$ , тому вони приймаються напівнескінченими при формулюванні задачі. Вісь  $O_x$  направлена від точки поверхні вала  $x=0$  до точки поверхні корпусу  $x=h$  і далі  $x>h$ . В межах малої середньої зони по  $z$ ,  $-\varepsilon < z < \varepsilon$ , задачу можна вважати плоскою зі зміною функцій уздовж радіальної координати  $r$ , тобто не враховувати відвід тепла в бічні області (похідні по  $z$  дорівнюють нулю). Надалі при формулюванні завдання радіальну координату  $r$  позначаємо як  $x$ ,  $r=x$ , а в якості характерної довжини приймаємо товщину зазору  $h=r_e-r_s$ . Температурна залежність функції розігріву приймається у вигляді функції Хевісайда, відповідної миттєвому включенню. Відомо, що рішення лінійної задачі для функції Хевісайда дозволяє отримати рішення для довільної функції розігріву за допомогою інтеграла Дюамеля.

**2.2.3 Модель взаємодії мікронних наночастинок ферромагнітного матеріалу в вузькій щілині.** Використання МРГК, як правило, доцільно при радіальному зазорі, що не перевищує 0,25 мм. При величинах, що

перевищують цю величину, в літературі відсутні дані як теоретичних, так і експериментальних досліджень.

Однак для багатьох видів технологічного обладнання робочий зазор повинен бути збільшений до 0,4 – 0,7 мм і навіть до 1 мм. Як приклад, можна привести шахтні вентилятори головного провітрювання.

Це пов'язано зі значними розмірами валів і підшипників, для яких власні радіальні зазори будуть зростати; з умовами експлуатації, коли при налипанні вологого пилу на лопатки робочого колеса вентилятора можливий його дисбаланс і поява вібрації механізму; а також з низькою якістю ремонтно-механічних робіт, наявним моральним і фізичним зносом ВГП.

При збільшенні робочого зазору буде відбуватися різке ослаблення магнітного поля і, як наслідок, погіршення ущільнюючих властивостей МРГ.

Одним із шляхів забезпечення надійної роботи МРГ і ВГП в цілому при збільшених зазорах є додавання в магнітну рідину перед заправкою мікронних частинок феромагнітного порошку при їх інтенсивному перемішуванні [177]. Це забезпечує їх введення в робочий зазор МРГ і осадження на поверхні концентраторів магнітного потоку в області найбільшої магнітної індукції. Таким чином можна зменшити величину робочого зазору. Необхідно відзначити, що навіть зіткнення вала з дисперсним магнітним порошком не є настільки критичним, як дотик валом магнітопроводу. Стимує розвиток цього методу невивченість процесів тепловиділення в зазорі МРГ. Найбільший практичний інтерес представляє момент запуску вентилятора, коли відбувається переміщення мікронних частинок до «зубців» магнітопроводу. Температура в робочому зазорі в цей час може значно перевищувати 100 °С. Після осадження мікрочастинок в зубцеву область магнітопроводу температура знижується практично до величини, яка була б і без додавання мікронних частинок. Однак навіть короткочасний закид температури негативно впливає на магнітну рідину,

магнітні властивості постійних магнітів. Також необхідно враховувати аварійне відключення механізму при підвищеній температурі.

Істотне зростання температури, що відзначається в стендових і натурних експериментальних дослідженнях, визначається магнітов'язкими ефектами в одержуваній бідисперсній магнітній суспензії, що складається з мікронних намагнічуваних частинок, зважених в нанодисперсній МР.

Цьому питанню присвячено ряд публікацій [89, 178–180], де досліджувалася гіпотеза про те, що присутність МР забезпечує підвищення седиментаційної стійкості мікронних частинок магнітореологічних суспензій [178]. У цих публікаціях розглядалися моделі при низьких значеннях швидкостей зсуву і напруженості магнітного поля. У робочій зоні зазору реальної конструкції МРГ швидкості зсуву вище на два порядки і як мінімум на порядок вище напруженість магнітного поля. В таких умовах про седиментаційну стійкість бідисперсної магнітної суспензії говорити не доводиться.

Реологічні властивості магнітних суспензій визначаються гетерогенними структурами, в які об'єднуються магнітні частинки під дією зовнішнього поля. Серед цих структур найбільш часто спостерігаються лінійні ланцюжки, детально розглянуті в згаданих роботах, особливо докладно в [89, 179].

Для пояснення магнітотеплових ефектів в зазорі МРГ необхідно вивчити механізм об'єднання мікронних частинок карбонільного заліза в лінійні ланцюгові агрегати методами статистичної гідромеханіки суспензій, основи якої закладені в [181, 182].

Основна гіпотеза пояснення магнітотеплових ефектів в зазорі МРГ полягає в тому, що частинки карбонільного заліза в зовнішньому полі об'єднуються в лінійні ланцюгові агрегати, аналогічно явищам в бідисперсних магнітних суспензіях, але відрізняються високими швидкостями зсуву і напруженістю магнітного поля в зазорі. Поява таких агрегатів призводить до

сильного збільшення ефективної в'язкості суспензії, що, в свою чергу, веде до зростання тепловиділення в середовищі.

Для таких мікронних частинок броунівські ефекти, як правило, несуттєві, і ними можна знехтувати.

Поблизу сферичної мікронної частки локальне магнітне поле неоднорідне: максимально поблизу полюсів частки і мінімально в її екваторіальній площині. В силу цього найбільші частки нанодисперсної МР можуть концентруватися поблизу полюсів мікронної частки. Така концентрація сильно впливає на особливості структурування та реологічні властивості мікронних частинок [178–180].

Для проведення подальшого аналізу поведінки мікронних частинок прийняті такі допущення:

1. Частинки нанодисперсної ферорідини однакові і настільки малі, що їх концентрація поблизу полюсів мікронних частинок несуттєва.

2. Ефектом взаємного підмагнічування мікронних частинок в ланцюжку нехтують. Розрахунок намагніченості мікронної частки  $M$  проводиться також, як і для ізольованою частки. Таке наближення часто використовується в теорії магнітореологічних суспензій [179].

Суспензію розглядають залученою в просту зсувну течію з градієнтом швидкості  $\dot{\gamma}$ ; напруженість магнітного поля  $H$  спрямована нормально градієнту швидкості течії (рис. 2.3).

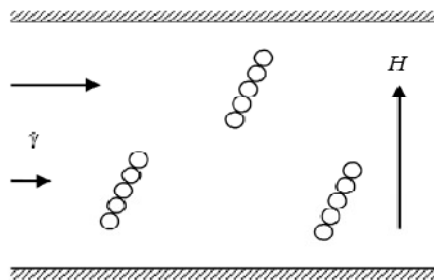


Рисунок 2.3 – Магнітна суспензія з ланцюжковими агрегатами



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

$$W = \int_0^{\gamma} \sigma d\gamma, \quad (2.24)$$

де  $\sigma$  – стаціонарна в'язка напруга в суспензії, Па;

$\gamma$  – швидкість зсуву,  $s^{-1}$ .

### **2.3 Методи експериментальних досліджень процесів в обладнанні з магніторідинними герметизуючими комплексами**

**2.3.1 Досліджувані зразки магнітної рідини.** Як зразки для дослідження були обрані різні типи МР, розроблених і виготовлених в ТОВ „НВВП „Ферогідродинаміка”.

Вони являють собою однорідну суспензію однодомених частинок магнетиту в різних дисперсійних середовищах, стабілізованих олеїною кислотою.

Основні характеристики МР наведені в таблиці 2.1 Ці рідини знайшли широке застосування в різних конструкціях МРГ. Для більш широкого узагальнення отриманих результатів в роботі досліджувалися також рідини на основі гасу і скипидару, які з огляду на специфічні фізико-хімічні властивості рідких основ поки не знайшли широкого застосування в МРГ. У той же час переважна кількість публікацій за фізичними властивостями МР відносяться до рідин на газової основі з огляду на низьку в'язкість і високу намагніченість насичення. Це давало можливість зіставляти результати дослідження з даними інших авторів.

Крім зазначених у таблиці 2.1 також досліджувалися вперше синтезовані МР на основі парафіну і епоксидних смол. Це було необхідно для вивчення магнітного впорядкування наночастинок при блокуванні броунівських ступенів свободи, що дозволило отримати додаткову інформацію про механізми релаксації магнітних моментів наночастинок, від чого в кінцевому рахунку залежить колоїдальна стабільність МР, а значить і працездатність, і техногенна безпека МРГ.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики досліджуваних магнітних рідин

Рідина - носій	Об'ємна концентрація, %	Намагніченість насичення, кА/м	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Динамічна в'язкість, мПа с
Вакуумне масло ВМ-3	11,0	42	1389	32
Поліетілсілоксан ПЕС-3	11,9	38	1329	18
Алкарен Д24С	8,9	29	1170	51
Аріезон АР201	11.0	33	1289	43
Трансформаторне масло ТКп	10.8	44	1315	28
Гас	12,5	62	1080	11
Скипидар	11,5	48	1115	12
Робоча рідина ЛЗ-МГ-2	11,9	28	1090	14
Гліцерин	12,2	31	1642	59

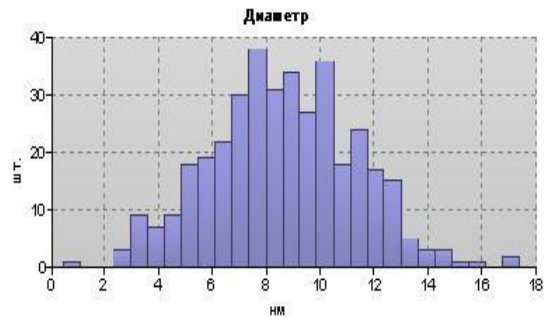
На рисунку 2.4 показані гістограми розподілу за розмірами магнітних частинок в рідині на основі гліцерину (рис. 2.4 а) і вакуумного масла (рис. 2.4 б). З нього видно, що середній розмір частинок в межах похибки однаковий і становить 6–10 нм. Такі магнітні рідини є найбільш стійкими і можуть зберігати однорідність і магнітні властивості протягом десятків років [183, 184].

На рисунку 2.5 представлені електронні фотографії наночастинок магнетиту на основі: гліцерину (рис. 2.5 а) і вакуумного масла (рис. 2.5 б).

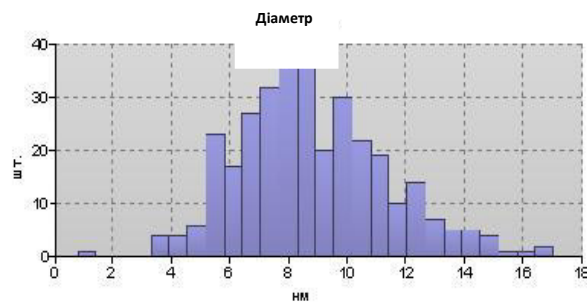
Масивний магнетит має кристалічну структуру типу зверненої шпінелі, його густина  $\rho_m = 5240 \text{ кг/м}^3$ , постійна кристалічної решітки  $d_m = 8 \text{ \AA}$  [185], точка Кюрі  $T_c = 858 \text{ К}$ .

Довжина молекули цис-ізомера олеїнової кислоти, обчислена за її структурною хімічною формулою  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ , становить 1,5 нм, за ефективну довжину зазвичай беруть 2 нм [186]. Густина олеїнової кислоти, згідно [187] при  $T = 293 \text{ К}$  дорівнює  $\rho_0 = 895 \text{ кг/м}^3$ . Молекула олеїнової кислоти має полярну головку і нейтральний хвіст. Під час стабілізації колоїду молекули олеїнової кислоти за рахунок хемосорбції закріплюються на поверхні магнетитової частки, при цьому нейтральні кінці звернені в рідину-носію.

У таблиці 2.1 вказані технічні характеристики при максимально можливої об'ємної концентрації стабілізованих наночастинок. Для зміни концентрації дисперсної фази проводилося її розведення дисперсійним середовищем, крім того в деяких випадках об'ємний вміст магнетиту підвищувався шляхом випаровування рідини-носія в сушільній шафі при температурі 60 – 100 °С.

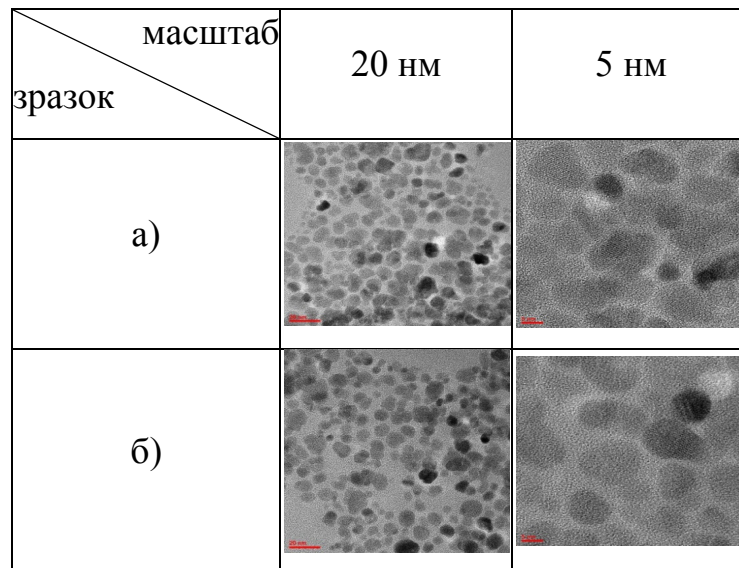


а)



б)

а) – МР на основі гліцерину; б) – МР на основі вакуумного масла VM-3  
 Рисунок 2.4 – Гістограма розподілу наночастинок магнітної рідини за розмірами

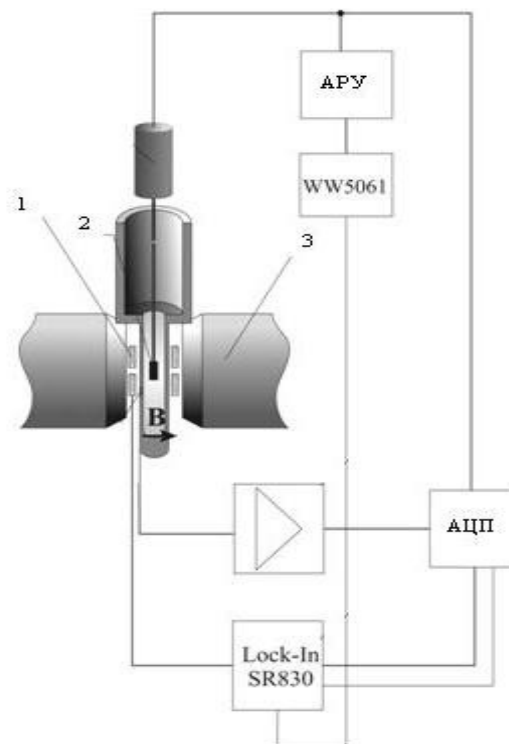


а) – МР на основі гліцерину; б) – МР на основі вакуумного масла VM-3  
 Рисунок 2.5 – Електронні фотографії наночастинок МР  
 (масштаб вказано на фотографіях червоною лінією)

### 2.3.2 Методики визначення магнітних, реологічних, електричних та експлуатаційних властивостей магнітних рідин

**Дослідження намагніченості магнітних рідин.** Для вимірювання намагніченості магнітних рідин в полях напруженістю від 0,1 кА/м до 900 кА/м, а також визначення намагніченості насичення (однієї з основних характеристик МР) використовувався метод з застосуванням вібраційного магнетометру фонеровського типу, аналогічний описаному в [90].

Вібраційний метод визначення намагніченості є відносним, тому для визначення справжнього значення намагніченості МР був використаний еталонний зразок нікелю з відомим магнітним моментом. Принципова схема використаного вібраційного магнетометра наведена на рисунку 2.6.



1 – вимірювальні котушки, 2 – контейнер з МР, 3 – електромагніт ФО-1

Рисунок 2.6 – Схема вібраційного магнетометра для дослідження магнітних властивостей магнітних рідин

Циліндричний контейнер 2 ( $d = 0,5$  см;  $l = 1,5$  см) з досліджуваною магнітною рідиною розташовувався на тонкому стрижні з немагнітного

матеріалу, який з'єднувався з вібраційною системою і міг коливатися із заданою частотою, перпендикулярно напрямку магнітного поля, що створюється електромагнітом 3. Контейнер з МР встановлювався між чотирма однаковими вимірювальними котушками 1, які нерухомо закріплювалися на полюсах електромагніту типу ФЛ-1. Котушки були намотані мідним дротом діаметром  $d = 0,06$  мм, містили 7103 витка та з'єднувалися попарно назустріч один одному по схемі Малінсона. Коливання штока з контейнером здійснювалося за допомогою вібратора, питомого звуковим генератором Tabor Electronics WW5061 на частоті 129 Гц. Амплітуда коливань контролювалася вольтметром Instek GDM – 8246 і підтримувалася постійною за схемою зворотного зв'язку шляхом запровадження системи автоматичного регулювання посилення. Вібратор зі штоком закріплювався на мікрометричному столику, за допомогою якого контейнер зі зразком МР встановлювався в потрібному положенні.

Напруга, пропорційна магнітному моменту зразка, надходила з вимірювальних котушок 1 на вхід фазового детектора Stanford Research SR830, який має великий коефіцієнт посилення і малі власні шуми. Для зменшення рівня шумів, що наводяться в вимірювальній котушці, вона з'єднувалася з підсилювачем згідно диференціальної схеми. Для більш детального дослідження лінійної ділянки кривої намагнічування використовувався балістичний метод.

Методика дослідження намагніченості МР балістичним методом в області полів до 60 кА/м докладно описана в дисертаційній роботі Ю.І. Диканського [188].

Похибка обох методів визначення намагніченості насичення МР не перевищує 3 % [188, 189].

**Дослідження магнітної сприйнятливості магнітних рідин.** Для вивчення внутрішнього стану магнітних колоїдів традиційно в якості досліджуваної магнітної характеристики вибирають магнітну

сприйнятливості. Це обумовлено тим, що вона є найбільш структурно-чутливим параметром, крім того результати її дослідження можуть також дати інформацію про механізм релаксації намагніченості магнітних колоїдних систем [55, 90, 190]. Дослідження механізму релаксації дозволяє оцінити рівень седиментаційної стійкості МР. Врахування цього чинника є важливим для забезпечення працездатності та екологічної безпеки МРГК.

Магнітна сприйнятливості магнітних рідин вище, ніж у парамагнетиків, проте багато менше, ніж у феромагнітних речовин. Це створює певні труднощі при виборі методу вимірювання сприйнятливості МР.

Наявність лінійного початкового відрізка кривих намагнічування дозволяє визначити магнітну сприйнятливості по куту його нахилу.

Зокрема, для цих цілей може бути застосований описаний вище балістичний метод, що і було реалізовано в цій роботі в деяких випадках. Разом з тим, збільшення похибки вимірювання намагніченості при зменшенні магнітного поля накладає обмеження на використання балістичного методу для дослідження магнітної сприйнятливості МР в слабких полях в широкому концентраційному інтервалі. У зв'язку з цим, і з урахуванням завдань поставлених в даній роботі, для вимірювання магнітної сприйнятливості крім балістичного використовувався мостовий метод [191].

Мостовий метод заснований на вимірюванні мостом змінного струму параметрів котушки з досліджуваним зразком, за якими визначаються магнітні властивості матеріалів. Широке застосування мостових схем в вимірювальній техніці пояснюється великою точністю вимірювань і високою чутливістю. Величина напруженості магнітного поля, необхідна для використання цього методу, може мати мінімальне значення (до 150 А/м), яке є недостатнім для досягнення магнітного насичення системи. Крім дійсної частини магнітної сприйнятливості, яка характеризує оборотні процеси при намагнічуванні, мостовий метод дозволяє визначати уявну частину магнітної сприйнятливості, обумовлену процесами поглинання. Це дає можливість

отримати додаткову інформацію про кінетику намагнічування магнітних рідин.

Вимірювання індуктивності і добротності досліджуваних ланок проводилося за допомогою моста змінного струму Instek LCR-817 і Instek LCR-819 з похибкою 0,05 – 0,1 % для індуктивності і 0,3 % для добротності. Всі дослідження магнітної сприйнятливості проведені при низьких частотах вимірювального поля (30 – 400 Гц), крім спеціальних частотних досліджень, що проводилися в діапазоні частот від 30 Гц до 10 кГц.

Докладніше про методику вимірювання магнітної сприйнятливості йдеться в [189, 192].

**Вимірювання в'язкості магнітної рідини.** Загальною властивістю колоїдних розчинів є збільшення їх в'язкості в порівнянні з в'язкістю рідкої основи, тому що наявність наночастинок в рідині призводить до збільшення внутрішнього тертя при її русі. Однак зміна в'язкості під впливом магнітного поля – специфічна властивість магнітних рідин. Працездатність і безпека експлуатації МРГ багато в чому залежить від характеру течії у вузькому зазорі герметизатора. Тому в'язкість є одним з визначальних чинників застосування МР [193].

Прикладення зовнішнього магнітного поля змінює в'язкість і реологічну поведінку МР з двох причин. По-перше, зовнішнє МП, взаємодіючи з магнітними моментами наночастинок, орієнтує їх, перешкоджаючи обертанню частинок. Це призводить до зростання в'язкості МР, так як при їх переміщенні частинки не можуть обертатися, вільно захоплюючись шарами рідини з різними швидкостями зсуву, а отже, гальмують рідину поблизу частинок.

По-друге, в даний час вважається доведеним, що такі сильні магнітореологічні ефекти можуть забезпечуватися тільки появою гетерогенних агрегатів, що складаються з наночастинок, об'єднаних силами магнітного взаємодії [189, 194, 195].



Зв'язок між структурою і в'язкістю звичайних дисперсних систем встановлено досить давно. У роботах [102, 196] особливості неньютонівської течії суспензій пояснюються зміною їх структури, зокрема виникненням і руйнуванням агрегатів частинок. До теперішнього часу не існує єдиної точки зору щодо механізму течії дисперсних систем, про що свідчить велика кількість пропонованих реологічних рівнянь.

Для фізики магнітних рідин проблема посилюється тим, що взаємодія ферочасток в зовнішньому магнітному полі дає внесок в ефективну в'язкість суспензії того ж порядку, що і гідродинамічна взаємодія. Це пов'язано з тим, що механізм збільшення в'язкості в принципі один і той же: взаємодія частинок призводить до зміни відносної швидкості частинок і, як наслідок цього, до додаткової дисипації енергії [103].

Седиментаційна стійкість і в'язкість магнітної рідини в сильних магнітних полях залежать від кількості та розмірів великих частинок і агрегатів в МР.

Теоретичні моделі через численні припущення авторів дозволяють отримувати швидше якісну оцінку, ніж кількісні результати. Істотним їх недоліком є неможливість враховувати полідисперсність реальних магнітних рідин.

Практично неможливо врахувати в математичній моделі те, що ефективна в'язкість досить складним чином залежить від технології приготування МР [69, 112, 197].

З вищевикладеного випливає, що всі математичні моделі є досить наближеними і їх можна використовувати тільки для якісної оцінки характеру перебігу процесів.

Тому актуальним є на підставі простих вимірювань фізичних властивостей нанорідин визначити ступінь стійкості магнітної рідини швидким і надійним експрес-методом.

У роботі було вивчено вплив зовнішнього магнітного поля на зміну ефективної в'язкості промислових МР, дані про седиментаційну стійкість яких відомі з досвіду їх експлуатації в складі магніторідинних герметизаторів.

Для визначення в'язкості використовувалася спеціально сконструйована установка, в основі якої знаходився капілярний віскозиметр. Такого ж типу установки і принцип їх роботи описані в [188, 198]. Дана установка розміщала між сердечниками електромагніту, який створював однорідне магнітне поле по всьому об'єму капілярного елемента.

Вимірювальна ланка представляла собою вузьку щілину між скляними пластинами, закріпленими між двома ємностями, об'єм яких значно більше об'єму капіляра. Час вимірювання течії повинен був бути в інтервалі 2 –30 с, а різниця тиску на кінцях ланки не повинна було перевищувати 100 кПа. Дані вимоги до ланки диктуються методом обробки експериментальних даних по визначенню ефективної в'язкості, тому що характер течії має бути ламінарним, а час вимірювання таким, щоб різниця тиску не змінилася на значиму величину. Тому для кожного зразка МР створювався індивідуальний капіляр.

**Дослідження впливу випаровування магнітної рідини на працездатність герметизатора.** Працездатність МРГК залежить від експлуатаційних характеристик. Однією з таких характеристик є випаровуваність магнітної рідини (МР). Її вивченню приділялося мало уваги, це пов'язано з тим, що випаровуваність МР практично повністю визначається випаровуваністю основи МР. І завдання її підбору по випаровуваності часто зводиться до підбору основи за відомими даними про її випаровування в різних температурних діапазонах [70].

Однак тенденція розвитку багатьох промислових підприємств останніх років, пов'язана з прагненням збільшити час роботи між капітальними

ремонтами до 2 – 3 років, вимагає більш точної інформації про швидкість випаровування МР, що є колоїдним розчином з наночастинками.

Велика кількість робіт присвячена дослідженню кипіння нанорідин. Сучасний стан даної проблеми для магнітних нанорідин відображено в монографії [97]. У той же час процес випаровування крапель магнітних рідин не вивчався взагалі і практично не вивчалось випаровування звичайних крапель нанорідин.

Опубліковані дослідження носять досить фрагментарний характер і достовірних висновків зробити практично неможливо. Наприклад, при дослідженні випаровування розчинів холодоагент–масло при наявності наночастинок в роботі [198] зазначалося підвищення тиску насичених парів розчинів холодоагенту в наномаслах і зменшення їх поверхневого натягу, що приводить до збільшення інтенсивності випаровування. У той же час для тих же умов підкреслюється «аномально великий» час випаровування нанокраплі при збільшенні тиску насичених парів [199].

На суперечливість даних про вплив дисперсної фази і поверхнево-активних речовин (ПАР) на інтенсивність випаровування навіть для звичайних колоїдних розчинів і емульсій вказується в [199–205].

Зокрема, ще Кнудсен зазначив суттєві зміни швидкості випаровування крапельок ртуті, якщо останні піддавалися навіть незначному окисленню [183]. У досить давно виданих монографіях [206, 207] також наголошується сильне зменшення швидкості випаровування крапель води при наявності навіть невеликих домішок ПАР.

Класична квазістаціонарна теорія випаровування краплі не дозволяє вирішити ці проблеми, так як вона побудована на припущенні, що концентрація пара на поверхні краплі дорівнює концентрації насиченого пара при температурі краплі. Це справедливо при радіусі краплі, що значно перевищує середню довжину вільного пробігу молекул пара [208], тобто для наночастинок може не виконуватися. Для краплі колоїдного розчину

наявність дисперсної фази призводить до додаткових ефектів. Необхідно врахувати структуру міжфазної межі, в якому концентрація частинок в загальному випадку не є постійною величиною. Присутність часток в поверхневому шарі впливає на швидкість випаровування [209].

Наявність магнітного поля ще більше ускладнює механізм випаровування крапель магнітної рідини через здатність МР відчутно взаємодіяти з магнітним полем. Будь-яка магнітна рідина є парамагнетиком: у відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти наночастинок орієнтовані хаотично, тим самим, компенсуючи один одного, і рівноважна залишкова намагніченість МР дорівнює нулю; в слабких полях прагненню магнітних моментів вишикуватися уздовж прикладеного поля заважає тепловий рух; з ростом інтенсивності прикладеного поля напрямки магнітних моментів наночастинок стають все більш впорядкованими, і в дуже сильних полях наночастинок орієнтовані повністю, а намагніченість МР досягає насичення. Характерні значення діаметрів магнітних частинок складають приблизно 10 нм, що виявляється менше межі однодоменності. При таких розмірах частки в магнітному полі залишаються однорідно намагніченими, а орієнтаційні флуктуації магнітних моментів часток і перемагнічування всього ансамблю визначаються неелевським і броунівським механізмами [210]. Саме такі умови створюються для магнітної рідини в зазорі магніторідинного герметизатора.

Вплив магнітного поля на процес випаровування магнітної рідини полягає в появі об'ємних магнітних сил, що утримують весь об'єм нанорідин в області сильного магнітного поля; в рекордно високих для парамагнітних систем значеннях магнітних характеристик; в залежності гідродинамічних, реологічних і теплофізичних характеристик МР від напруженості зовнішнього магнітного поля. Концентрація наночастинок в міжфазному шарі істотно відрізняється від концентрації ферочасток в об'ємі магнітної рідини, що обумовлено магнітофорезом колоїдних наночастинок [211].

Структурування ферочасток в зовнішньому магнітному полі призводить до створення ансамблю наночастинок, властивості яких можуть сильно відрізнятися від властивостей як індивідуальної наночастинок, так і об'ємного матеріалу подібно до того, як властивості наночастинок відрізняються від властивостей мікрооб'єму аналогічної речовини.

Суперечливість і розбіжність в експериментальних даних різних авторів свідчить про те, що до розуміння фізичної суті процесів, що відбуваються при випаровуванні нанорідин, ще далеко. Очевидно, що на різні наночастинок і рідкі основи вплив фізичних полів (магнітне, електричне і т.д.) непередбачуваний. Для порівняння швидкості випаровування промислових магнітних рідин були проведені експериментальні дослідження. Природно, що ніяких узагальнюючих висновків на інші типи магнітних рідин, їх концентрацію, розмір і матеріал наночастинок і т.д. робити неможливо.

Для розуміння процесів, що відбуваються при випаровуванні магнітних рідин, було вирішено визначати випаровуваність як відносну зміну маси зразка МР згідно [207, 209]:

$$\delta = \frac{m_{\text{исх}} - m}{m_{\text{исх}}} 100 \% \quad , \quad (2.25)$$

де  $m_{\text{исх}}$  – вихідна маса (нетто) зразка МР на початок вимірів, г;

$m$  – маса МР на день вимірювання, г.

Маси визначалися за допомогою електронних ваг з точністю  $\pm 1$  мг.

Кожен зразок МР заливали в дві скляні кювети (чашки Петрі) діаметром близько 9 см. Товщина шару МР становила 3 мм. Одна кювета з МР встановлювалася на постійний магніт зі сплаву Nd-Fe-B. Друга кювета з МР перебувала поза полем.

**Дослідження динамічних процесів в магнітній рідині в неоднорідному магнітному полі герметизатора.** Для надійного утримання МР при зазорах близько 0,5–0,8 мм магнітну індукцію на поверхні концентратора магнітного потоку доводиться збільшувати до 2 – 2,5 Тл. У таких сильних полях МР стає просторово неоднорідною внаслідок магнітофореза магнітних частинок і виникнення агрегатів, що може істотно вплинути на стабільність експлуатаційних параметрів МРГ. Ступінь неоднорідності МР в рівноважному стані визначається балансом між магнітофорезом, седиментацією і градієнтної дифузії частинок і залежить від концентрації цих частинок, їх розмірів, форми і конкуруючих міжчасткових взаємодій [66].

Виходячи з цього, численні теоретичні дослідження пояснюють загальний характер стійкості, але застосувати їх для вибору на практиці типу МР важко [53, 57, 90]. Тому питання про можливість застосування МР в кожному конкретному пристрої вирішується на основі непрямих даних, отриманих з реологічних, дифузійних і магнітних вимірювань, або шляхом випробувань на стендах, що моделюють реальні умови експлуатації МР [70, 72].

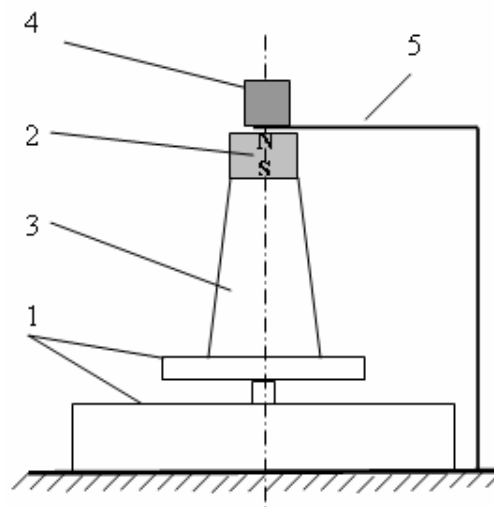
Існуючі в даний час методи визначення колоїдної стабільності і седиментаційної стійкості МР дають досить достовірні результати, але вимагають використання дорогого дослідницького і вузькопрофільного приладового обладнання, а в разі проведення ресурсних випробувань – значного часу. Тому ці методи рідко застосовуються на підприємствах, що експлуатують обладнання з встановленими МРГ [68, 72].

Виходячи з вищевикладеного було проведено дослідження впливу динаміки зміни в часі магнітної сили, що діє на зразок, заповнений магнітної рідиною і поміщений в неоднорідне магнітне поле.

В основі методу вимірювання динамічних процесів в магнітній рідині в неоднорідному магнітному полі лежить ефект силового впливу МП на малий

об'єм, заповнений цією магнітною рідиною. При цьому вимірюється величина магнітної сили, що діє на МР в різні моменти часу, і за характером зміни цієї сили можна судити про інтенсивність перебігу динамічних процесів [212]. Ці процеси, в свою чергу, визначаються такими фізичними явищами як орієнтація дипольних моментів магнітних частинок вздовж поля (відносно швидкий процес) і руху магнітних частинок в область з великим магнітним полем – магнітофорез. Характерний час протікання магнітофоретичних процесів в МР змінюється в діапазоні від декількох секунд до десятків годин [213] і визначається при заданому рівні магнітного поля розмірами і формою магнітних частинок, їх магнітними властивостями, а також в'язкістю рідини-носія цих частинок.

Розроблена експериментальна установка для вимірювання динамічних процесів в МР схематично показана на рисунку 2.7. Вона містить електронні ваги 1, постійний магніт циліндричної форми 2 на основі Nd-Fe-B, встановлений на стійці з немагнітного матеріалу 3, зразок з досліджуваною магнітною рідиною 4, розміщений на опорі 5 для фіксації зазору між цим зразком і магнітом. Фотографія використовуваної установки приведена на рисунку 2.8 а.

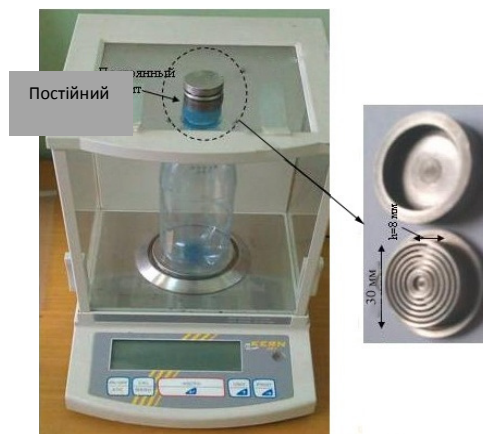


1 – електронні ваги; 2 – постійний магніт; 3 – стійка; 4 – МР; 5 – опора

Рисунок 2.7 – Принципова схема експериментальної установки

Дослідження характеру зміни в часі магнітної сили, що діє на МР в неоднорідному полі постійного магніту проводилося в умовах, близьких до тих, які реалізуються в робочому зазорі МРГ. Для цього було виготовлено спеціальну ємність з немагнітного матеріалу (рис. 2.8 б), що складається з основи і кришки, які пов'язані різьбовим з'єднанням. На основі були нарізані зубці, що імітують зубцеву структуру, існуючу в активній зоні герметизатора для отримання різко неоднорідного магнітного поля. Також між цими елементами конструкції був передбачений зазор, що зв'язує МР з навколишнім середовищем.

Відзначимо, що особливістю даної роботи є проведення експериментальних досліджень на спеціально виготовленому зразку з МР, що має зубцеву структуру, близьку до тієї, яка існує в МРГ. Аналогічний спосіб дослідження явища магнітофореза в МР, що відрізняється тим, що вимірюється «магнітна вага» рідини, а не вага магнітної системи при наявності МР, описаний в роботі [170, 213, 214] і використовувався для дослідження МР, що знаходиться у відносно простій за формою циліндричній ємності.



а)

б)

а) – фото установки, б) – спеціальна ємність, яка заповнюється МР

Рисунок 2.8 – Експериментальна установка для вивчення динамічних процесів в МР



**2.3.3 Методи та експериментальні установки для дослідження характеристик магніторідинних герметизаторів і проведення ресурсних випробувань.** Умови експлуатації навіть однотипних МРГК на одному і тому ж підприємстві можуть істотно відрізнятися. Крім того, як неодноразово зазначалося раніше, складність і взаємозалежність процесів в МРГ, в загальному випадку, ніколи не дозволяють розрахувати параметри герметизатора і розробити його конструкцію. Тому при вивченні властивостей МРГ, проектуванні його конструкції обов'язковим є проведення випробувань на спеціально розроблених стендах.

Основною вимогою, що пред'являються до випробувальних стендів є якомога повніше моделювання реальних умов експлуатації.

У даній роботі на експериментальних стендах досліджувалася сумісність МР та ущільнюваного середовища, утримуваній перепад тисків, конструктивні елементи МРГ, ресурс МРГК.

Експериментальний стенд повинен дозволяти проводити дослідження в широкому діапазоні діаметрів валів (10 – 300 мм), лінійних швидкостей в зазорі (до 35 м/с), температурному діапазоні (до 150 °С). Повинно бути забезпечене плавне регулювання частоти обертання валу. Необхідно забезпечити досить просту заправку МРГ. Повинна досить легко реалізовуватися можливість установки різного типу манжет або відбійників розвиненого лабіринтового ущільнення для вивчення їхньої спільної роботи з МРГ в складі МРГК. Бажано візуально спостерігати «прорив» робочого зазору, фіксувати проникнення МР з робочого зазору в ущільнюване середовище. Дослідження повинні проводитися в статичних і динамічних режимах [215].

Створити один універсальний стенд не є можливим, тому використовувалося кілька стендів в залежності від розв'язуваних завдань.

Принципова схема експериментального стенду показана на рисунку 2.9. Зазначені на ній елементи входять в будь-яку конструкцію стенду з

вивчення МРГ.

Магнітна система макета МРГ 14 включає в себе постійні магніти 6, два магнітопровода (полюсних наконечника) 5 і 7 і вал 17. Полюсні наконечники і вал утворюють робочий зазор 16, заповнений МР. Величина індукції магнітного поля в робочому зазорі вимірювалася датчиком Холла, поміщеним в щуп 19, за допомогою вимірника магнітної індукції 20. Для великих зазорів (порядку 1 мм) використовувався в якості вимірювача магнітної індукції прилад Ф 4354/1. Для вимірювання індукції в зазорах від 0,1 мм і більше застосовувався спеціальний зонд, в якому в якості чутливого елемента був використаний мініатюрний датчик Холла з ниткоподібних кристалів антімоніда індію [216]. ЕРС Холла в цьому випадку вимірювалася цифровим вольтметром типу ВК 2-20.

Тиск в робочій камері 15 макета МРГ створювався газом 13 з балона 12 і рідиною – насосом 10 з ємності 11 через регулюючий клапан 9.

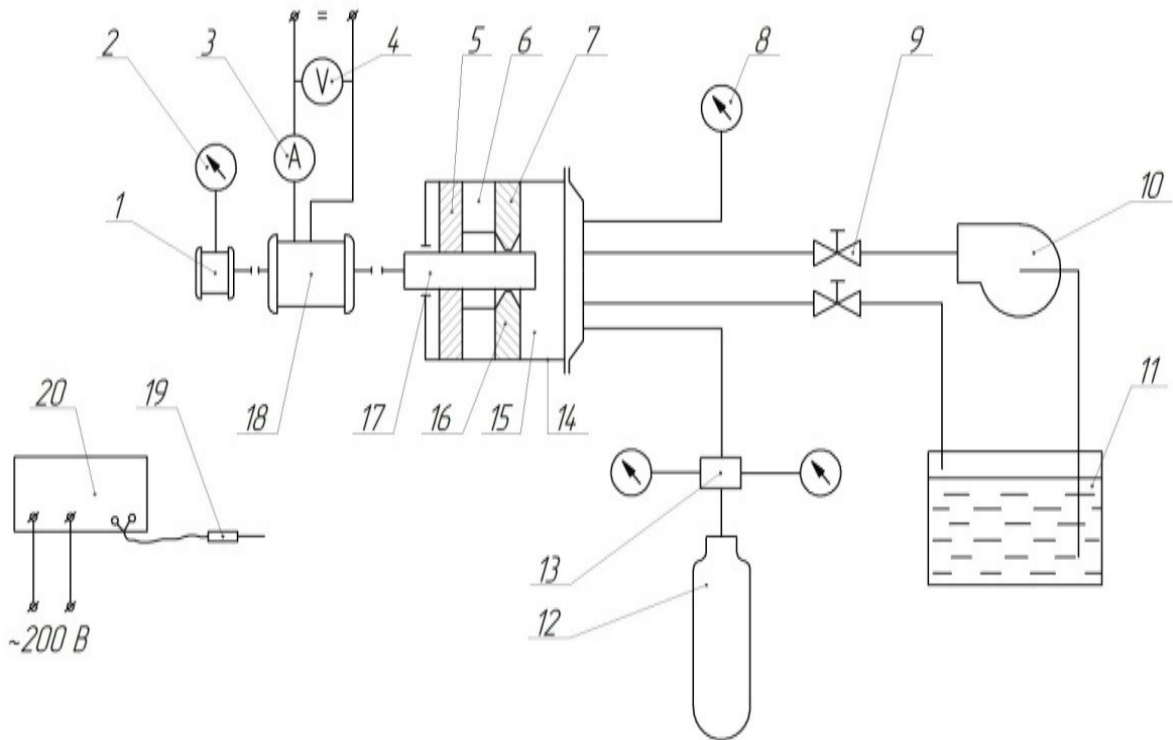
В якості приводу 18 можна використовувати двигун постійного струму або змінного. У другому випадку необхідно застосовувати перетворювач частоти.

Основні зміни в конструкції стенду пов'язані з макетом МРГ – може варіюватися кількість магнітів, магнітопроводів, вводиться додаткові немагнітні проставки, заправні пристрої, елементи традиційних ущільнень і т.д.

Основні дослідження були проведені на стенді, показаному на рисунку 2.10.

Стенд встановлено на жорсткій фундаментній рамі разом з двома електродвигунами потужністю 22 кВт і 5,5 кВт. При випробуванні МРГК великого діаметра (понад 200 мм) підключався електродвигун потужністю 22 кВт через високий пусковий момент. В інших випадках використовувався двигун меншої потужності. Системою шківів за допомогою клинопасової передачі можна було регулювати обороти вала. До електродвигуна

потужністю 5,5 кВт був також підключений перетворювач частоти з вбудованим PLC-контролером типу Е 2-8300-010Н виробництва ТОВ «Веспер Автоматика».



1 – частотний перетворювач; 2 – вимірник частоти; 3 – амперметр; 4 – вольтметр; 5 і 7 – магнітопроводи; 6 – постійні магніти; 8 – манометр; 9 – регулюючий клапан; 10 – насос; 11 – ємність; 12 – балон; 13 – газ; 14 – макет МРГ; 15 – робоча камера; 16 – робочий зазор; 17 – вал; 18 – привід; 19 – щуп датчика Холла; 20 – вимірник магнітної індукції

Рисунок 2.9 – Принципова схема експериментального стенду

Універсальність стенду полягала в тому, що до станини було можливо приєднати МРГК в широкому діапазоні габаритних розмірів (до 700 мм × 700 мм) і використанням фальш-валів забезпечити необхідну величину зазору та провести випробування конструкцій МРГ в натуральну величину. Винятки становлять лише «екзотичні розробки» (наприклад, діаметр вала

землерийної машини становить 2000 мм, а діаметр суднового дейдвудного пристрою перевищує 1000 мм).

На рисунку 2.11 спрощено показан дослідний зразок МРГ, призначений для випробування спільно з ним гумових манжет, термографітових, поліпропіленових і т.п. набивок.

Герметизатор 1 кріпиться до проставки 4, встановленої на станині випробувального стенду. Отвір 2 служить для створення надлишкового тиску в порожнині А, а також, в залежності від програми експерименту, для заповнення порожнини маслом або водою.

На цьому ж стенді випробовувалися конструкції попереднього лабіринтового ущільнення в складі МРГК. Метою дослідження було визначення оптимальної кількості попередніх відбійників і їх вплив на працездатність і ресурс МРГК. Приклади таких конструкцій наведені на рисунку 2.12.

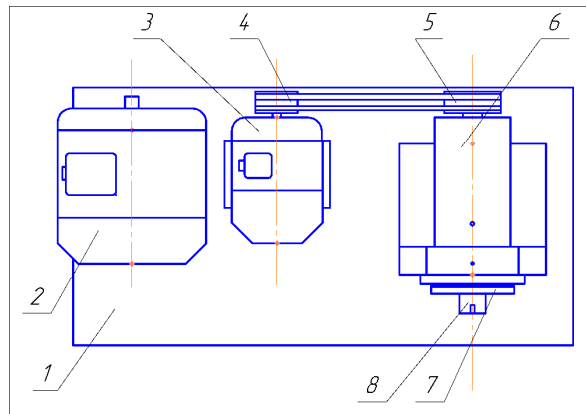
Цей стенд використовувався також для вивчення впливу концентрації карбонільного заліза із середнім розміром частинок 1 мкм, який додається в робочий зазор МРГ, на інтенсивність розігріву і працездатність МРГК.

Конструкція стенду для перевірки сумісності МР та ущільнюваного середовища показана на рисунку 2.13.

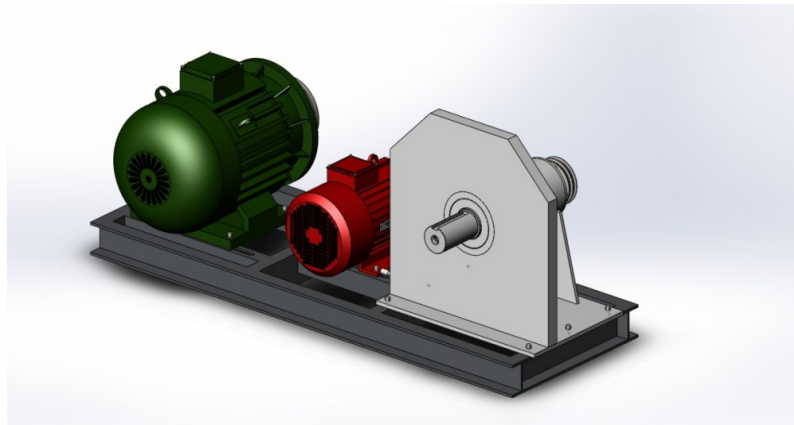
Стенд складається з підшипникового вузла, на якому закріплений корпус МРГ з немагнітної сталі 12Х18Н10. У підшипниках закріплений вал діаметром 30 мм. У середині корпусу встановлено два сталевих однозубцових полюсних наконечника з магнітами між ними, що притискаються кришкою.

Зазор між полюсними наконечниками і валом становить 0,25 мм.

При випробуваннях МР в зону робочого зазору вводиться невелика кількість МР, яка утримується в робочому зазорі і утворює навколо вала суцільне кільце, що відділяє внутрішню порожнину, розташовану між ПН, від зовнішнього середовища.



а)



б)

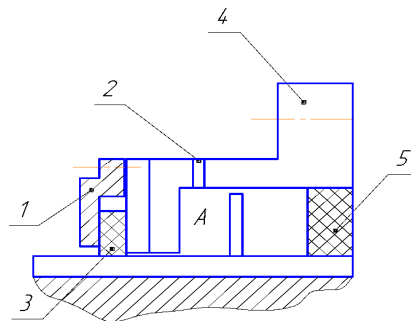


в)

1 – фундаментна рама; 2 – електродвигун №1; 3 – електродвигун №2;  
 4 – шків повідний; 5 – шків ведений; 6 – станина; 7 – випробуваний МРТ;  
 8 – фальш-вал

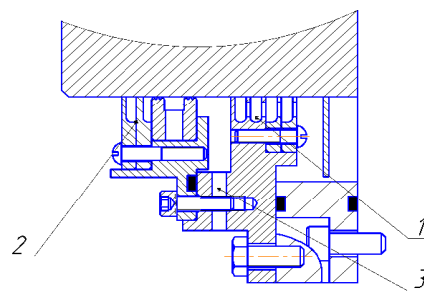
а) – принципова схема, б) – 3D модель, в) – фотографія стенду

Рисунок 2.10 – Експериментальний стенд

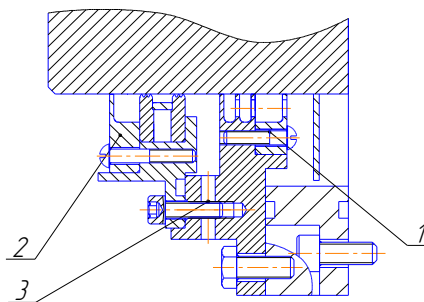


1 – МРГ; 2 – отвори; 3 – МР; 4 – проставка; 5 – манжета

Рисунок 2.11 – МРГ, встановлений на стенді



а)

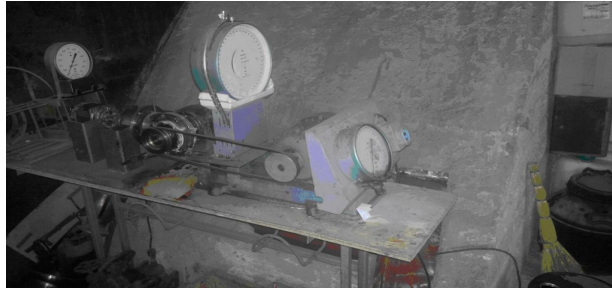


б)

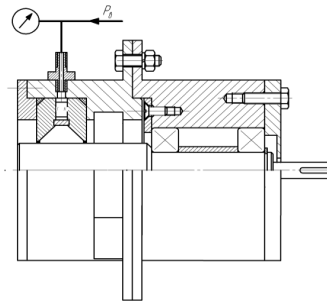
а) – 4 попередніх відбійника і 2 відбійника після МРГ, б) – 2 попередніх, один широкий відбійник і один широкий відбійник після МРГ

1 – попередній відбійник; 2 – відбійник після МРГ; 3 – зливний отвір

Рисунок 2.12 – Дослідження МРГК з різною кількістю відбійників



а)



б)

а) – фотографія стенду, б) – принципова схема

Рисунок 2.13 – Стенд для перевірки сумісності МР та ущільнюваного середовища

У корпусі в районі розташування магнітів є отвір з штуцером. Через цей отвір у внутрішню порожнину між полюсними наконечниками і валом можна подавати стиснуте повітря, створюючи надлишковий тиск.

Замір надлишкового тиску в порожнині здійснюється манометром, який приєднується через трійник до штуцера. При прориві магніторідинного кільця тиск в порожнині падає. Крім того, для перевірки працездатності МР при роботі з рідкими середовищами порожнина герметизатора може заповнюватися рідиною, після чого подачею повітря створюється надлишковий тиск. Мінімальна кількість МР в такому МРГ дозволяє скоротити термін випробувань.

Для даних випробувань спеціально були обрані умови більш жорсткі, ніж реальні – мінімально можливий об'єм МР (однозубцове ущільнення) і

прямий контакт МР зі значним у порівнянні з нею об'ємом ущільнюваного середовища.

Для дослідження роботи МРГ при малих зазорах був спеціально розроблений стенд, загальний вид якого показаний на рисунку 2.14.

Було виготовлено три втулки, які забезпечували робочий зазор 0,05 мм; 0,1 мм; 0,15 мм. Магнітні блоки виготовлялися у вигляді картриджів (варіанти вставлених у втулку картриджів показані на рисунку 2.15).

Це дозволило проводити дослідження впливу кількості магнітів, магнітопроводів, концентраторів магнітного потоку, величини робочого зазору, типу рідини на величину утримуваного перепаду тиску як в статичі, так і в динаміці.

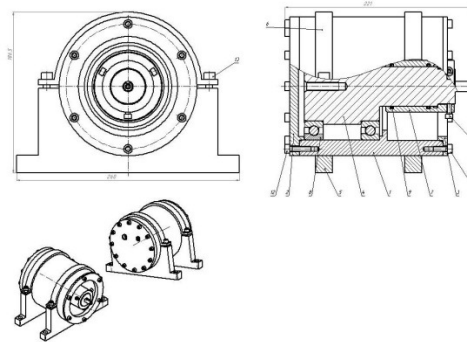


Рисунок 2.14. – Загальний вигляд експериментального стенду для дослідження впливу малих зазорів

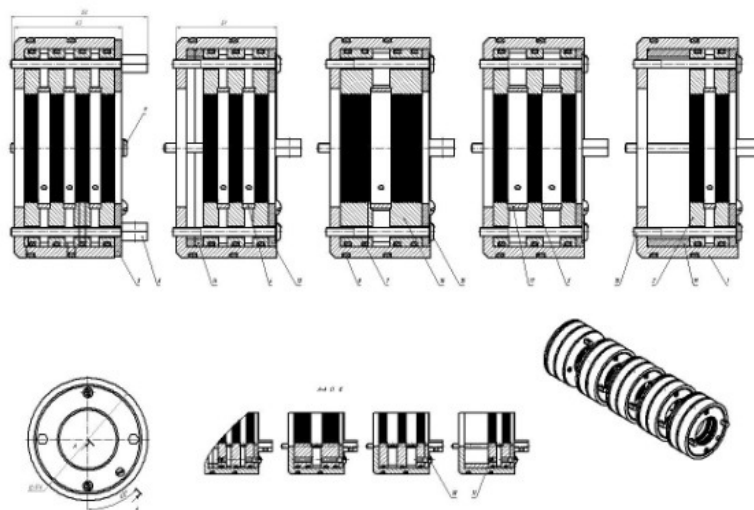


Рисунок 2.15. – Види картриджних магнітних блоків



**2.3.4 Програма випробувань і метод проведення дослідно-промислових випробувань і експлуатації магніторідинних герметизаторов.** Проведення випробувань в натурних дослідно-промислових умовах при безпосередній експлуатації технологічного обладнання дозволяє досить однозначно визначати довговічність МРГ і порівнювати їх характеристики з показниками штатних ущільнюючих пристроїв. Такого роду випробування, як правило, проводяться після проведення стендових випробувань при відсутності сумнівів в працездатності і наявності достатніх підстав у забезпеченні мінімальної потрібної довговічності зразка герметизатора.

У зв'язку з тим, що дослідно-промислові випробування проводяться на об'єктах підвищеної екологічної небезпеки, програма випробувань узгоджується з заводом-виробником технологічного обладнання, на яке встановлюється МРГ, або з головним галузевим інститутом.

Іноді дослідно-промисловим випробуванням безпосередньо на ОП передують порівняльні випробування, організовані розробниками технологічного обладнання.

Так, розробник технічної документації очисних шахтних комбайнів – Донецький державний науково-дослідний, проектно-конструкторський та експериментальний інститут комплексної механізації шахт (ДП «ДОНГІПРОВУГЛЕМАШ») прийняв рішення, що дослідно-промислові випробування МРГ для комбайна УКД200-250 будуть включати в себе два етапи : випробування МРГ на стенді інституту, порівняння отриманих результатів з раніше випробуваними на тому ж стенді і в тих же умовах з іншими ущільненнями: набором з трьох стандартних армованих манжет типу УМА і торцевими ущільненнями «Federal-Mogul», Fridberg GmbH; а потім, в разі позитивного результату, випробування триватимуть в умовах шахти.

Конструкція випробувального стенду показана на рисунку 2.16. Імітатор вала з одягненою на нього втулкою герметизатора закріплений на

дні ємності, заповненої частками породи і вугілля - сухими і з додаванням води. Підшипниковий вузол із закріпленим на ньому корпусом герметизатора виконаний обертовим. Порожнина над герметизатором до рівня підшипника заповнена маслом. Деталі магнітної системи герметизатора розміщені всередині корпусу. Кільцеві пази і виступи на корпусі МРГ і фланці втулки працюють як попереднє лабіринтове ущільнення.

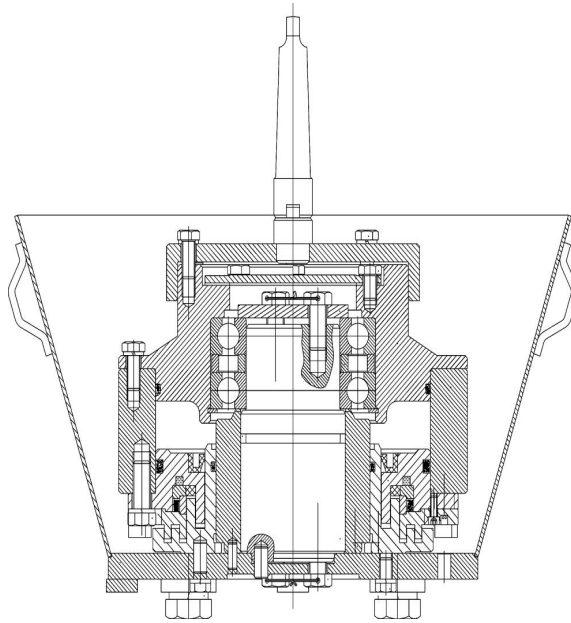


Рисунок 2.16 – Випробувальний стенд зі встановленими МРГ

Випробування МРГ проводилися відповідно до протоколів технічних нарад з проведення ресурсних стендових випробувань різних типів ущільнень.

Комплект МРГ для УКД 200–250 був встановлений на стенді і заправлений МР на основі масла ВМ-3. Підшипниковий вузол стенда був заповнений консистентним мастилом Літол-24. Внутрішня порожнина стенду була заповнена маслом ТАП15В до верхньої кромки нижнього підшипника. На рисунку 2.17 МРГ, встановлений на стенді, показаний в більшому масштабі і вказані всі зазори між корпусом і втулкою МРГ [217, 218].

Основним визначальним параметром при проведенні дослідно-

промислових випробувань є довговічність і працездатність МРГК протягом часу, визначеного програмою випробувань.

Умови проведення дослідно-промислових випробувань суто індивідуальні і зазвичай вимагають ретельного узгодження всіх параметрів підприємством, де вони проводяться.

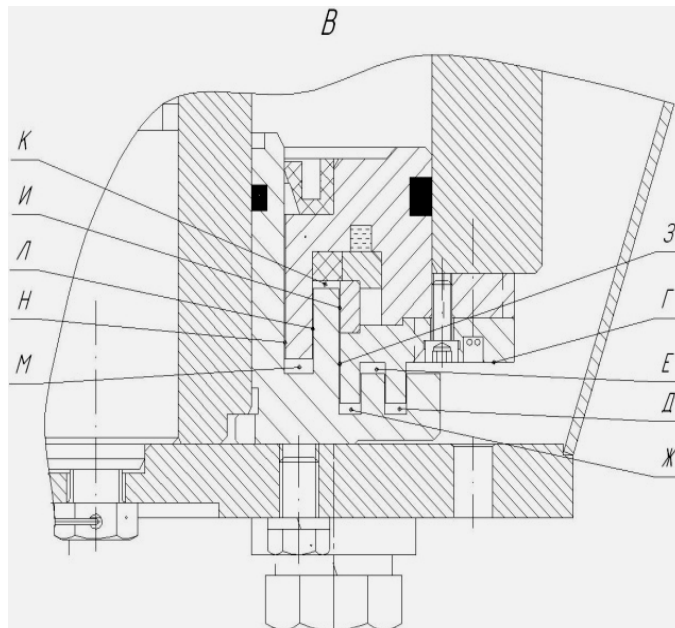


Рисунок 2.17 – Зазори між корпусом і втулкою МРГ

Дослідно-промислові випробування проводяться при наявності такої документації:

- технічного опису експериментального стенду і отриманих результатів при дослідженні МРГ;
- робочих креслень МРГ, а також складального креслення з зазначеними на ньому необхідними узгодженнями;
- сертифікатів на постійні магніти;
- технічних умов та паспорта на магнітну рідину;
- бланків таблиць або протоколів для фіксування вимірів під час випробувань;
- робочого плану-графіку проведення випробувань.

У Додатку Б наведено як приклад Програма випробувань МРГ у Долинській ЛВУМГ УМГ «Прикарпаттрансгаз». Програма була складена на підставі Протоколу технічної наради в ДП «Укртрансгаз» від 02.03.2011 р (Додаток В).

#### **2.4. Математична мультифізична модель процесів магніторідинної герметизації**

Комп'ютерне моделювання представляється альтернативним, а в багатьох випадках єдино можливим методом дослідження, який з успіхом може доповнювати, а іноді і замінювати трудомісткі і дорогі натурні експерименти. При цьому чисельні експерименти дають можливість отримувати нові результати, що випереджають результати натурних експериментів і відрізняються різноманіттям інформації про досліджуваний об'єкт [219, 220].

Ефективність роботи МРГК в значній мірі залежить від раціонального використання в ньому кількох процесів і явищ різної фізичної природи. При дослідженні процесів в робочому зазорі МРГ для досягнення їх високої функціональності, надійності і безпеки виникає потреба в застосуванні методів мультифізичного моделювання, під яким маємо на увазі моделювання сукупності взаємопов'язаних процесів різної фізичної природи і рішення на цій основі ряду пов'язаних задач з різних областей науки і техніки [220, 221].

Розвиток методу мультифізичного моделювання стимулюється не тільки доступністю високопродуктивної обчислювальної техніки, а й появою на ринку великої різноманітності програмного забезпечення для вирішення безлічі пов'язаних задач з різних областей знань. Так, отримали в останні роки широке поширення пакети комерційних програм Comsol Multiphysics і Ansys призначені для вирішення завдань мультифізичного моделювання.

Вони являють собою унікальний інструмент для реалізації нових підходів до моделювання [222, 223].

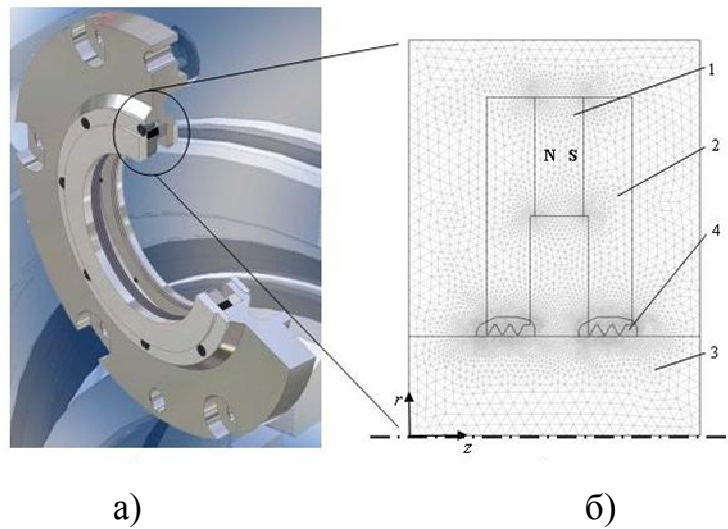
Зв'язаність фізичних процесів різної природи (магнітних, гідромеханічних, електричних і т.д.) – це відмінна риса МРГК. Без комплексного обліку таких фізичних процесів неможливо досягти цілісного і системного уявлення про пристрій, детально і всебічно дослідити складні процеси, що відбуваються в робочій зоні МРГК, отримати їх достовірні якісні та кількісні характеристики.

Розв'язувана на практиці мультифізична задача, як правило, являє собою систему з двох основних компонент. Це окремі задачі для кожного фізичного процесу і функціональні зв'язки між ними. В силу існування цих зв'язків мультифізична задача може мати якісно нові системні властивості та особливості одержуваних рішень, які відсутні у окремих задачах.

Типова конструкція магніторідинного герметизатора циліндричного типу показана на рисунку 2.18 і містить магнітну систему з постійними магнітами, намагніченими в осьовому напрямку, і полюсами, що мають зубчасту структуру з метою 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.

Питанням аналізу магнітних і гідродинамічних процесів в МРГ присвячено ряд робіт [54, 62, 73, 78, 82, 85, 224], в яких використовуються як аналітичні, так і чисельні методи. При цьому в гідродинамічній задачі, як правило, розглядається розподіл тільки однієї азимутальної компоненти швидкості руху рідини. В силу нелінійності магнітних властивостей матеріалів для випадку магнітної задачі, а також нелінійності системи рівнянь Нав'є-Стокса для гідродинамічної задачі, застосування чисельних методів і сучасних пакетів програм дозволяє досліджувати більш реалістичні

моделі МРГ і враховувати розподіл трьох компонентів руху магнітної рідини в зазорі МРГ.



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

Рисунок 2.18 – Загальний вигляд типової конструкції МРГ

Розрахунок процесів, що відбуваються в робочому зазорі МРГ виконувався послідовно в три етапи. На першому етапі розраховувався розподіл в статиці магнітного поля в активній зоні герметизатора з урахуванням нелінійної характеристики магнітопроводу і в припущенні насичення магнітної рідини. При цьому визначається положення кордону магнітної рідини в статиці, обмежене ізобарами  $p = M_s B = const$ . На другому етапі розглядається гідродинамічна задача, що уможливорює знайти розподіл азимутальної компоненти швидкості руху магнітної рідини. На третьому етапі розраховувалися електричні процеси в обсязі обертового вала, магнітної рідини й у полюсах магнітної системи. Три зазначені вище задачі розглядаються як слабкопов'язані (за класифікацією [225]).

Важливою особливістю слабкопов'язаних задач є можливість їх поділу та послідовного вирішення. Разом з тим слабкопов'язані фізичні процеси вимагають організації обміну даними між задачами для надання об'ємних джерел і граничних умов.

Описані магнітна, гідродинамічна і електрична задачі далі вирішуються послідовно з передачею даних, як показано на рисунку 2.19.



Рисунок 2.19 – Зв'язок задач і передача даних між ними під час розрахунку МРГ

**Магнітна задача.** Досліджуваний МРГ характеризується осьовою симетрією. Тоді польова задача може розв'язуватися у двовимірній постановці в циліндричній системі координат у площині  $rOz$ . Розрахункова область для аналізу магнітного поля показана на рисунку 2.18 б і містить підобласті з магнітними матеріалами трьох типів: постійні магніти 1, намагнічені в осьовому напрямку, феромагнітний матеріал полюсів магнітної системи 2 і обертовий вал 3, а також область з феромагнітною рідиною 4. Характеристики намагнічування цих матеріалів будуть розглянуті далі.

Польова задача розглядається як магнітостатична і розв'язується в осесиметричній постановці в циліндричній системі координат у площині  $rOz$  для векторного магнітного потенціалу  $\mathbf{A}$ , що має єдину  $\varphi$ -компоненту, тобто  $\mathbf{A} = (0, A_\varphi, 0)$ .

Із системи диференціальних рівнянь Максвелла для стаціонарного магнітного поля

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad \nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (2.26)$$

і рівняння стану магнітного матеріалу, записаного для загального випадку як

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r, \quad (2.27)$$

одержимо наступне диференціальне рівняння для векторного потенціалу:

$$\nabla \times [(\mu_0 \mu_r)^{-1} \nabla \times \mathbf{A} - (\mu_0 \mu_r)^{-1} \mathbf{B}_r] = 0, \quad (2.28)$$

де  $\mathbf{H}$  – напруженість магнітного поля, А/м;

$\mathbf{B}$  – магнітна індукція, Тл;

$\mathbf{B}_r$  – залишкова індукція, що характеризує постійний магніт і визначається в області, де знаходиться цей магніт, Тл;

$\mu_0$  – магнітна проникність вакууму,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$\mu_r(|\mathbf{B}|)$  – відносне значення магнітної проникності (скалярна величина)

для магнітного матеріалу, залежне від модуля вектора магнітної індукції.

Постійний магніт МРГ, виготовлений з матеріалу Nd-Fe-B марки 38SH, характеризується залишковою індукцією  $B_r = 1,26$  Тл і коерцитивною силою  $H_s = 950$ к А/м. В такому випадку для рівняння стану магніту з виразу (2.27) після підстановки цих значень одержимо для області постійного магніту  $\mu_r = 1,06$ .

Магнітні рідини, використовувані в МРГ, характеризуються кривими намагнічування, показаними на рисунку 2.20 а.

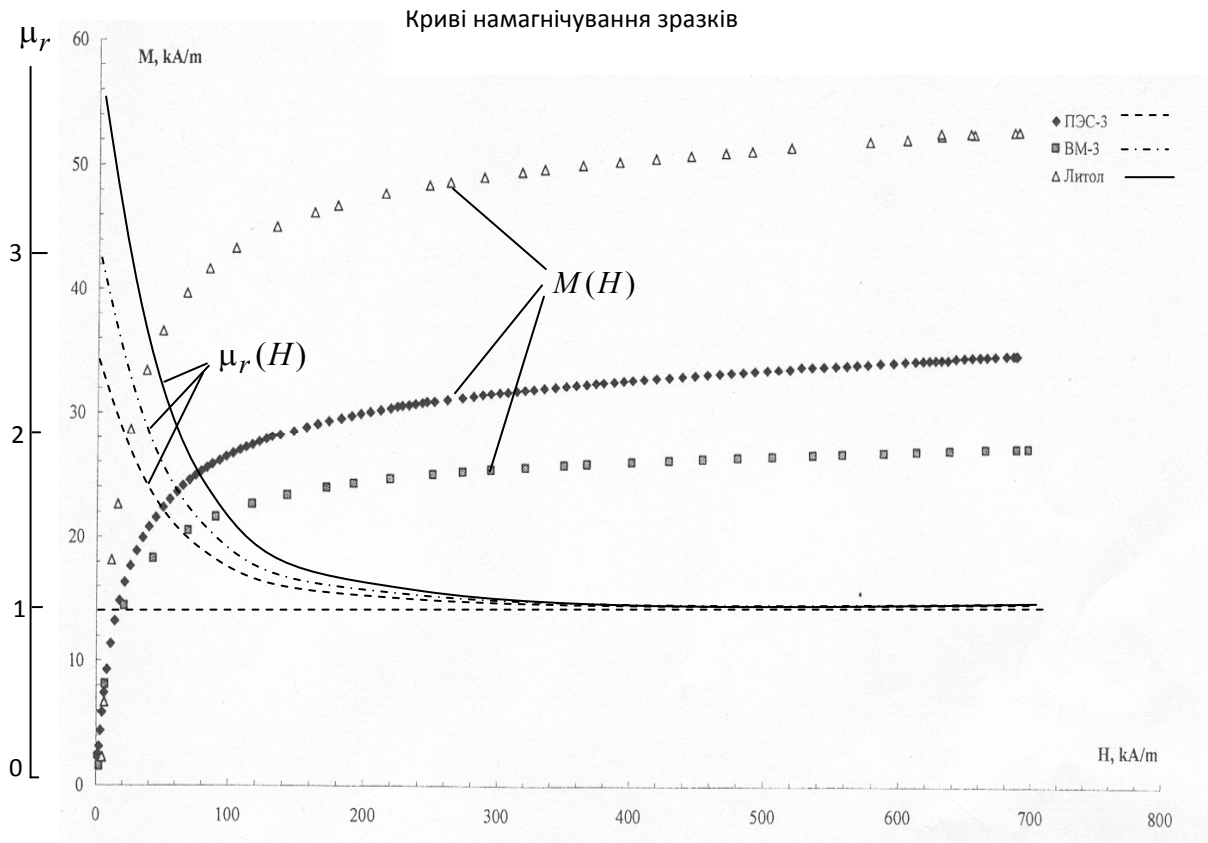
На рисунку 2.20 а показана крива намагніченості для МР на ВМ-3, що характеризується намагнічуванням насичення  $M_s = 30$  кА/м. Як впливає з



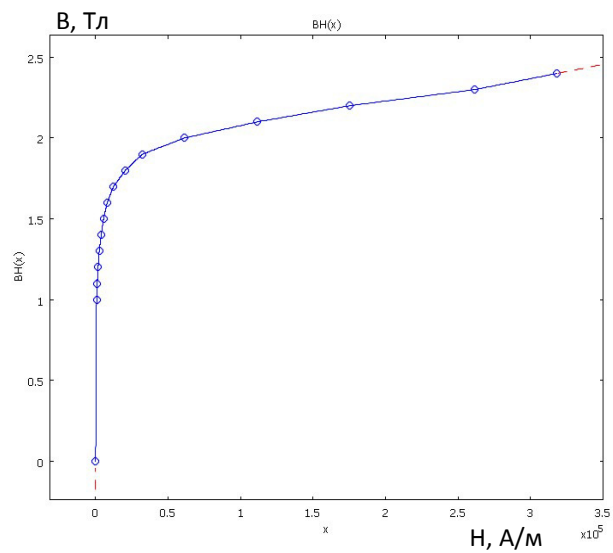
його розгляду, при магнітному полі  $H > 200$  кА/м магнітна проникність рідини може бути прийнята рівною  $\mu_r \approx 1$ . Полюса магнітної системи та обертовий вал характеризуються кривою намагнічування, наведеною на рисунку 2.20 б. Характеристики цієї кривої у вигляді табличних даних вводилися в програму Comsol [226], в якій і проводилося комп'ютерне моделювання процесів.

В якості граничних умов використовувалися умова симетрії на осі обертання валу і умова магнітної ізоляції  $-\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = 0$  на бічних і верхніх поверхнях. Для чисельного розв'язання диференціального рівняння в частинних похідних (2.28) із зазначеними граничними умовами використовувався метод кінцевих елементів, реалізований в пакеті програм Comsol [226].

При вирішенні задачі магнітного поля використовується демпфований метод Ньютона-Рафсона. Для вирішення лінеаризованої системи рівнянь використовується прямий метод Гаусса. Відносна похибка рішень системи рівнянь  $\delta \leq 10^{-6}$ . Кількість кінцевих елементів (трикутних), становить 13831, причому в активній зоні виконується згущення сітки, яке показано на рисунку 2.21 [227, 228].



а)



б)

а) – магнітні характеристики МР; б) – магнітні характеристики матеріалу магнітної системи і обертового валу

Рисунок 2.20 – Магнітні характеристики елементів МРГ

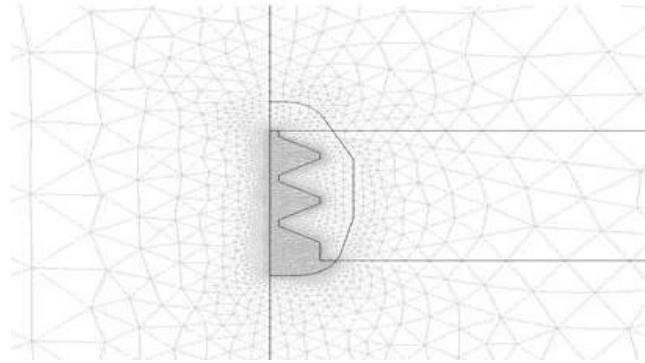


Рисунок 2.21 – Нерівномірна сітка в активній зоні герметизатора

**Гідродинамічна задача.** При розв’язанні гідродинамічної задачі руху магнітної рідини в зазорі МРГ будемо використовувати наступні припущення:

- положення вільної межі магнітної рідини в динаміці при обертанні валу співпадає з межами в статиці. Вони визначалися за розподілом ізоліній магнітної індукції;

- розподіл магнітного поля в зазорі МРГ при даному положенні границі магнітної рідини співпадає з розподілом поля в статиці. Справедливість цього положення обумовлена насиченим станом магнітної рідини в зазорі, коли її магнітна проникність приблизно дорівнює  $\mu_r \approx 1$  відповідно до рисунка 2.20 *a*. Зазначимо, що величина поля в зазорі впливає на характер руху рідини внаслідок сильної залежності її в’язкості від значення магнітної індукції  $B$ .

Далі будемо розглядати ламінарний режим течії магнітної рідини. Стаціонарний рух магнітної рідини в зазорі магнітної системи описується наступною системою рівнянь Нав’є-Стокса та нерозривності, записаних з використанням векторного оператора  $\nabla$ :

$$\begin{aligned} \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} &= \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \eta(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] + \mathbf{f}_m, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0, \end{aligned} \quad (2.29)$$

де  $\rho$  – густина магнітної рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$\mathbf{u} = (u_r, u_\varphi, u_z)$  – вектор швидкості рідини, що має радіальну, азимутальну та аксіальну компоненти, спрямовані відповідно вздовж осей  $r$ ,  $\varphi$  та  $z$ ;

$p$  – тиск, Па;

$\eta$  – динамічна в'язкість, що залежить від величини магнітного поля, Па·с;

$\mathbf{f}_m$  – об'ємна густина магнітної сили, Н/м<sup>3</sup>.

Для досліджуваної стаціонарної задачі, що характеризується осьовою симетрією, всі компоненти швидкості руху магнітної рідини та тиск не залежать від просторової координати  $\varphi$ , і задача може бути розв'язана у двовимірній постановці в площині  $rOz$ .

Відомо, що в'язкість магнітної рідини істотно залежить від величини магнітного поля [105]. У даній роботі для урахування цієї залежності використано наступний емпіричний вираз [54]:

$$\eta(B) = \eta_{|B=0}(1 + 50\sqrt{B}), \text{ де індукція } B \text{ задається в Тл.}$$

В якості граничних умов використовувалися наступні: на поверхні магнітних полюсів задавалося нульове значення швидкості  $\mathbf{u} = (0, 0, 0)$ , на поверхні вала –  $\mathbf{u} = (0, u_{\varphi,0}, 0)$ , де  $u_{\varphi,0}$  – лінійна швидкість на поверхні обертового вала, на осі симетрії задавалася умова аксіальної симетрії, на вільних границях рідини – умовою симетрії була рівність нулю нормальної компоненти швидкості і тангенціальної компоненти поверхневого натягу.

Для чисельного рішення системи (2.29) з урахуванням зазначених граничних умов використовувався метод кінцевих елементів, реалізований в пакеті програм Comsol [226].

### Електрична задача.

**Умови виникнення електричного струму в об'ємі вала.** Спочатку покажемо, що при обертанні в постійному магнітному полі вала, виготовленого з однорідного провідного матеріалу (магнітного або немагнітного), що характеризується значенням електропровідності в кожній точці  $\sigma = const$ , у його об'ємі не будуть наводитися електричні струми. При цьому будемо припускати, що виконуються такі умови.

1. Система "вал – магніторідинний герметизатор" є осесиметричною, тобто відсутній ексцентриситет валу та величина зазору між валом і магнітопроводом не залежить від кутової координати  $\theta$  в циліндричній системі координат.

2. Магнітне поле є постійним у часі й незмінним уздовж кутової координати  $\theta$ .

3. На обертовому валу відсутні ковзні контакти або близько розташовані підшипники, підключені до зовнішнього електричного кола з можливістю утворювати замкнутий контур для протікання електричного струму.

4. Магнітна рідина є слабо провідним середовищем [229].

Величина густини струму в провідному середовищі – у валу при його обертанні з кутовою частотою в постійному магнітному полі описується наступним виразом:

$$J = \sigma(-\nabla\varphi + u \times B), \quad (2.30)$$

де  $\varphi$  – скалярний електричний потенціал, В;

$u = \omega r e_\theta$  – лінійна швидкість руху вала в точці з радіусом  $r$ , м/с;

$e_\theta$  – одиничний орт по кутовій координаті  $\theta$ .

Виходячи із закону збереження заряду для стаціонарного випадку справедлива рівність:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0. \quad (2.31)$$

Згідно з теоремою Гельмгольца [230], необхідною умовою існування густини струму  $\mathbf{J}$  в об'ємі обертового вала є існування ненульового значення ротора вектора  $\mathbf{J}$  в його об'ємі або у випадку кусково-однорідного середовища – поверхневого ротора від  $\mathbf{J}$ . Тут маються на увазі нульові граничні умови. У разі однорідного середовища

$$\nabla \times \mathbf{J} = \nabla \times (\sigma(-\nabla\varphi + \mathbf{u} \times \mathbf{B})) = \sigma \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}). \quad (2.32)$$

Тут враховувалося, виходячи з векторного аналізу [225], що  $\nabla \times \nabla\varphi \equiv 0$ . Покажемо, що права частина в виразі (2.32) при виконанні вищевказаних умов дорівнює нулю. Виконуючи прості перетворення з урахуванням  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ , одержимо наступні рівності:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} \times \mathbf{B} &= e_r v_\theta B_z - e_z v_\theta B_r, \text{ де } u_\theta = \omega r, \\ \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) &= u_\theta \frac{\partial B_z}{\partial z} + \frac{\partial(u_\theta B_r)}{\partial r} = u_\theta \frac{\partial B_z}{\partial z} + u_\theta \frac{\partial(B_r)}{\partial r} + B_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} = \omega r \left( \frac{\partial B_z}{\partial z} + \frac{\partial(B_r)}{\partial r} + \frac{B_r}{r} \right) = \omega r \nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \end{aligned}$$

Таким чином, у випадку виготовлення валу з однорідного матеріалу та у відсутності провідності в магнітної рідини, електричні струми при обертанні вала в постійному магнітному полі не будуть наводитися в об'ємі цього вала. У випадку ж неоднорідного матеріалу вала (або кусочно-однорідного), величина  $\nabla \times \mathbf{J} \neq 0$ , що призведе до виникнення вихрового поля вектора  $\mathbf{J}$  в об'ємі вала, а в загальному випадку і в об'ємі магнітної рідини та на полюсах магнітів.

У самому загальному випадку наведемо основні фактори, що

призводять до виникнення електричних струмів, а звідси і до додаткового нагріву вала, що обертається в постійному магнітному полі МРГ.

1. Наявність ексцентриситету, при якому довільний фізично малий об'єм вала при обертанні зазнає вплив періодично (із частотою обертання) змінного магнітного поля та векторного потенціалу. Тоді у виразі для густини струму з'являється складова –  $\sigma \partial A / \partial t$ .

2. Наявність зубців, розташованих на поверхні магнітопроводу уздовж кутової координати  $\theta$ , приводить до появи пульсуючої складової магнітної індукції та до появи зубцевих гармонік струму в об'ємі вала.

3. Наявність ковзних контактів (можливо підшипників) і зовнішнього ланцюга, що забезпечує замикання струмів, наведених в об'ємі вала при обертанні в постійному магнітному полі.

4. Магнітна рідина є електропровідною так, що в системі "вал – магнітна рідина – полюс магніту МРГ" можливе утворення замкнених контурів з електричних струмів, що протікає по них.

5. Неоднорідність розподілу електропровідності матеріалу вала в загальному випадку по трьох, або в окремому випадку по одній з координат. В окремому випадку це може бути кусочно-однорідний розподіл  $\sigma(r, z)$  або, наприклад, випадок нелінійної залежності від температури  $\sigma(T)$  при неоднорідному нагріві вала.

Далі методом комп'ютерного моделювання більш докладно досліджується випадок, коли магнітна рідина та полюси магнітів є електропровідними середовищами та магнітна рідина контактує із валом, який теж є електропровідним.

**Математична модель для розрахунку густини струму в об'ємі вала.** Досліджуваний МРГ характеризується осьювою симетрією. В такому випадку польова електрична задача може розв'язуватися в двовимірній постановці, у циліндричній системі координат, у площині  $rOz$ . Розрахункова область для аналізу електричного поля показана на рисунку 2.18 б пунктирною лінією і

містить область валу, магнітної рідини та кінцевої зони полюсів. Припускається, що магнітна рідина та полюси магнітів є електропровідними і утворюють разом з валом замкнутий електричний контур.

Рівняння для розрахунку стаціонарного електричного поля (описується електричним потенціалом  $\varphi$ ) в області валу, що характеризується в загальному випадку неоднорідним розподілом електропровідності  $\sigma(r, z)$ , а також в області магнітної рідини і полюсів, отримуємо після підстановки виразу (2.30) в (2.31):

$$\nabla \cdot (\sigma(-\nabla\varphi + u \times B)) = 0. \quad (2.33)$$

В якості граничних умов будемо вважати, що на всіх зовнішніх кордонах задана умова електричної ізоляції, тобто нормальна компонента густини струму згідно (2.30) дорівнює нулю -  $\mathbf{J} \times \mathbf{n} = 0$ . На осі симетрії вала задається умова симетрії.

Для вирішення зазначеної польової задачі в даній роботі використовувався метод кінцевих елементів, реалізований в пакеті програм Comsol [226].

Для роз'язання рівняння (2.33) із зазначеними граничними умовами розподіл магнітної індукції в об'ємі вала беремо з вирішення магнітної задачі, а швидкість кутового руху вала і розподіл азимутальної компоненти швидкості магнітної рідини в активній зоні МРГ - з гідродинамічної задачі [231].

## 2.5 Метод оцінки техногенного ризику небезпечних виробництв

Надійність і достовірність результатів аналізу впливу МРГК на техногенну безпеку багато в чому визначається повнотою вихідних даних. Вихідними даними для аналізу стали результати стендових, дослідно-



промислових випробувань і експлуатації МРГК на різному технологічному обладнанні. Використовувалися журнали технічного стану технологічного обладнання, де впроваджені МРГК. З урахуванням терміну експлуатації МРГК, який на ряді об'єктів становить 15–20 років, виходила досить достовірна статистична вибірка по оцінці надійності і безаварійності роботи обладнання. Також були використані аналізи роботи МРГК, що проводяться технічними службами заводів, де експлуатуються МРГК [232–235]. Технічні служби заводів надали статистичні матеріали у вигляді банку даних щодо відмов, поломок, нещасних випадків, аварій, що сталися через традиційні ущільнення (лабіринтові, манжетні тощо).

Вихідними даними для аналізу були повна документація про об'єкт, його технічні характеристики, режими роботи, діапазон зміни параметрів, проектувальні, перевірочні розрахунки фізичних процесів, що протікають в об'єкті, дані про різні системи об'єкта і характер взаємозв'язку між системами. Використовувалися дані, отримані на інших видах обладнання, але які мають подібні характеристики. Доповнювалися ці відомості наявними рекамаціями і претензіями споживачів, які експлуатують це обладнання, к заводам-виробникам.

З урахуванням специфіки впровадження МРГК (в більшості випадків або на дорогому, або на відповідальному обладнанні) було прийнято рішення про недостатність накопиченої статистичної бази для застосування методів теорії ймовірності. У зв'язку з цим спочатку був проведений якісний аналіз за допомогою групи методів, також входять в FMEA, де вихідні дані із залученням експертних оцінок зводяться в кваліметричні табличні шкали значущості, що характеризують виникнення небезпечної ситуації і тяжкість її наслідків, а це дозволяє отримувати кількісні характеристики ризику.

Попередні розрахунки за формулою (1.1) і аналіз отриманих результатів показав, що ряд факторів, що впливають на рівень техногенної безпеки, не враховані в кваліметричних таблицях 2.2 і 2.3, наведених в [126,

130, 142]. Забезпечити достовірність результатів рівня техногенної безпеки запропоновано за рахунок додаткового врахування ступеня схильності людини впливу шкідливих факторів від механічних пошкоджень і стану обладнання. Для цього формула (1.1) була перетворена до вигляду:

$$R = E \cdot A \cdot S \cdot K, \quad (2.34)$$

де шкала оцінки тяжкості наслідків  $S$  була розроблена на основі обробки вихідних даних використовуваних при аналізі роботи МРГК і представлена в таблиці 2.4;  $K$  – добуток поправочних коефіцієнтів, що враховують:

$K_1$  – коефіцієнт, що враховує термін експлуатації обладнання, ( $K_1 = 1,0 - 1,1$ );

$K_2$  – коефіцієнт, що враховує вплив фізичного і морального старіння обладнання на його ремонт ( $K_2 = 1,0 - 1,1$ );

$K_3$  – коефіцієнт, що враховує введення нових технічних рішень на етапі модернізації ( $K_3 = 0,9 - 1,0$ );

$K_4$  – коефіцієнт, що враховує виготовлення технологічного обладнання і його комплектуючих на сертифікованих ділянках ( $K_4 = 0,9 - 1,0$ );

$K_5$  – коефіцієнт, що враховує взаємне розташування небезпечних об'єктів ( $K_5 = 1,0 - 1,2$ );

$K_6$  – коефіцієнт, що враховує умови обслуговування та наявність резервування обладнання ( $K_6 = 0,9 - 1,0$ ).

Поправочні коефіцієнти отримано експертним шляхом на підставі результатів експлуатації.

В даному випадку з огляду на те, що аналізується тільки один вид небезпеки, пов'язаний з ущільнювальними системами, доцільно розглядати граничне значення техногенного ризику в діапазоні  $15 < R_{\text{пред}} < 30$ .

Запропонований метод дозволяє обґрунтувати вибір заходів щодо забезпечення рівня техногенного ризику шляхом співвіднесення величини

ризикау, визначеного за формулою (2.34) з граничними значеннями категорій ризику, розроблених автором на основі умов експлуатації обладнання небезпечних виробництв і викладених в таблиці 2.5.

Таблиця 2.2 – Шкала оцінки ймовірності виникнення небезпечної ситуації

Критерій ймовірної послідовності події або випадкової обставини	Оцінка, бал
1	2
Один раз протягом терміну експлуатації (20 років)	1
Один раз між опосвідченнями (5 років)	2
П'ять разів між опосвідченнями – щорічно	3
Десять разів між опосвідченнями – два рази на рік	4
Щомісяця	5
Два рази на місяць	6
Щотижня	7
Два раз в тиждень	8
Щодня	9
Постійна присутність небезпеки	10

Таблиця 2.3 – Шкала оцінки ймовірності заподіяння шкоди

Критерій вірогідності заподіяння шкоди	Оцінка, бал
1	2
Нікчемна (абсолютно неможливо)	1
Незначна (практично неможливо)	2
Вельми невелика (майже неможливо)	3
Невелика (ймовірність трохи менше 50 %)	4
Помірна (ймовірність близько 50 %)	5
Велика (ймовірність приблизно 50 – 60 %)	6
Вельми велика (ймовірно)	7
Висока (дуже ймовірно)	8
Дуже висока (майже гарантовано)	9
Безперечна (неминуче)	10

Таблиця 2.4 \* – Шкала оцінки тяжкості наслідків

Критерій тяжкості наслідків		Оцінка, бал
для людини	для технологічного обладнання	
1	2	3
Травми, поранення, опіки або удари відсутні	Функціональний збій в обладнанні або процесі - немає потенційної небезпеки	1
Невеликі пошкодження і повне відновлення без необхідності відсутності на робочому місці	Повністю досить наявних технічних засобів і захисних заходів	2
Повне відновлення і повернення після відсутності на робочому місці менше 3 днів	Необхідне проведення стандартних процедур у сфері ремонту, екологічної безпеки та охорони праці	3
Повне відновлення і повернення після відсутності на робочому місці від трьох днів до трьох тижнів	Часткове пошкодження обладнання, необхідний ремонт з заміною комплектуючих, пошкодження можна швидко ліквідувати	4
Повне відновлення і повернення після відсутності на робочому місці більше трьох тижнів	Часткове пошкодження обладнання, необхідний ремонт з заміною комплектуючих, пошкодження неможна швидко ліквідувати	5
Повернення на робоче місце після відсутності більше трьох тижнів, проблеми зі здоров'ям	Серйозне пошкодження обладнання, необхідність спеціальних заходів захисту і безпеки, для усунення необхідно більш тривалий час	6
Постійне слабке зниження здатності до трудової діяльності	Повне відновлення устаткування неможливо, при експлуатації не витримується ряд технічних характеристик (наприклад, підвищення вібрації і т.д.)	7

Продовження таблиці 2.4

1	2	3
Постійна серйозна інвалідність	Експлуатація обладнання може бути дозволена на обмежений термін спеціальним сертифікаційним центром або галузевим інститутом, який має відповідну ліцензію після усунення всіх отриманих від них зауважень	8
Постійна повна інвалідність	Аварія, неможливість відновлення устаткування, можуть бути серйозні наслідки для навколишнього середовища	9
Смерть	Техногенна катастрофа	10

\* Для визначення техногенного ризику  $R$  вибирається більш вагомий критерій тяжкості наслідків,  $S$

Далі модернізований метод оцінки ризику Файн-Кінні застосовується при дослідженні впливу кліматичних факторів, режимів роботи на працездатність і техногенну безпеку електрообладнання НВ.

Оцінку техногенного ризику з урахуванням кліматичних факторів проводилася на прикладі асинхронних електродвигунів (АД), які використовуються як привід апаратів повітряного охолодження (АПО) і вентиляторів градирен. Асинхронні електродвигуни серії ВАСО, ВАСВ, АСВО масово експлуатуються на хімічних і нафтопереробних заводах, на підприємствах по транспорту і видобутку газу і т.д. На ці електродвигуни в різні роки було встановлено близько 3000 МРГ. Великий статистичний матеріал і досвід експлуатації від кліматичних умов крайньої півночі до субтропічних послужили підставою для вибору електродвигуна ВАСО як об'єкта дослідження [67, 68, 236–238].

При оцінці працездатності та техногенного ризику АД досить часто вважають, що вони захищені від усіх впливів, які є зовнішніми по відношенню до АД, за винятком струмових, теплових і механічних

навантажень. Однак таке припущення не вірно. Електродвигуни завжди знаходяться у взаємозв'язку з навколишнім середовищем, яке може істотно впливати на їх працездатність, оскільки вони повинні безвідмовно функціонувати в будь-який час року і в будь-яких кліматичних умовах [239, 240].

Таблиця 2.5 – Категорії ризику

Категорії ризику	Техногенний ризик, R	Опис і необхідні заходи
I. Незначний ризик	$\leq 15$	Спеціальні заходи не потрібні. Документувати ризики необов'язково
II. Прийнятний ризик	15 – 30	Спеціальні заходи для зменшення ризику не потрібні, але рекомендується оцінити, які заходи могли б бути реалізовані з мінімальними витратами. Ризик все ж необхідно контролювати
III. Терпимий ризик	30 – 125	Необхідні заходи для зменшення ризику, але їх не обов'язково реалізовувати негайно, необхідно брати до уваги економічні міркування. Заходи необхідно проводити принаймні протягом 3–5 місяців після оцінки ризику
IV. Значний ризик	125 – 400	Роботу неможна продовжувати, поки не вжито заходів для зменшення або усунення ризику. Якщо роботу неможливо перервати, то заходи (колективні) необхідно прийняти протягом 1–2 місяців в залежності від кількості працівників, схильних до ризику. Необхідно своєчасно придбати засоби індивідуального захисту
V. Неприпустимий ризик	$\geq 400$	Зменшення ризику обов'язково. Якщо через брак коштів немає можливості здійснити превентивні заходи, то робота в небезпечній зоні категорично забороняється.

Мікрокліматичне районування земної кулі, виконання, категорії, умови експлуатації, зберігання і транспортування технічних виробів в частині впливу кліматичних факторів зовнішнього середовища (в тому числі

електричних машин) встановлені нормативними документами [241]. Загальні вимоги зводяться до того, що АД повинен зберігати параметри в процесі і/або після впливу кліматичних факторів, значення яких встановлюються наведеними вище стандартами. Складність їх виконання полягає в тому, що працездатність і безвідмовність електродвигуна в експлуатації залежить від сезонних кліматичних закономірностей, а в окремих регіонах - і від добових. У цих умовах підібрати електродвигун за ступенем захисту IP і кліматичному виконанню важко. Необхідно також враховувати, що оптимальний вибір АД – це завжди компромісна задача, де ступінь захисту IP і кліматичне виконання є всього лише двома з понад півтора десятка розглядаємих факторів. З цієї причини в електродвигунах широко застосовуються різні типи ущільнень, але домогтися прийнятної герметизації часто не вдається.

Деталі й вузли будь-якої електричної машини реагують на різні види кліматичних впливів, які можуть викликати певного виду відмови та інтенсифікувати потоки відмов (рис. 2.22). Кліматичні фактори чинять негативний вплив на АД не тільки в період експлуатації, а й в періоди простою і зберігання.

Практика експлуатації АД свідчить про те, що вони використовуються в різних кліматичних умовах. Характерними особливостями є низькі температури і висока вологість повітря в зимовий час, висока інтенсивність вітрових потоків, високі температури повітря в літні місяці, континентальність клімату і т.д. [13, 32, 117, 145, 146, 242].

При цьому необхідно відзначити, що кліматичні чинники (особливо відносна вологість, запиленість повітря, вплив навколишнього середовища під час простоїв) досить важко врахувати при прискорених випробуваннях АД. Тому достовірні показники надає тільки аналіз статистичних даних.

Необхідність врахування природно-кліматичних умов (ПКУ) при виготовленні МРГК лише одного разу була включена в технічне завдання на їх розробку. Така вимога висувалася нафтопереробним заводом в м. Атирау



Рисунок 2.22 – Класифікація кліматичних факторів, що впливають на електродвигун.

(Казахстан). Це пов'язано з несприятливими ПКУ, якими характеризується Прикаспійський регіон. Цей регіон відрізняється різко континентальним кліматом, який виявляється у значних змінах річних (до + 43 °С влітку і до – 43 °С взимку) і добових (перепад може досягати більше 20 °С) температур і в нестійкості кліматичних показників у часі. В цілому клімат – посушливий, середня кількість опадів невелика, але опади носять зливовий характер. Від 18 до 50 днів на рік в регіоні, переважно в весняно-літній період, спостерігаються пилові солончакові бурі. Тумани переважають в холодну пору року протягом 25 – 45 днів, зима – з стійким сніговим покривом та частою ожеледицею.

Необхідно відзначити, що всі виділені несприятливі погодні явища характерні і для клімату різних регіонів України [242].

Можливі режими роботи електроприводів відрізняються великою різноманітністю за характером і тривалістю циклів, показниками навантажень, умов охолодження, співвідношенням втрат в період пуску та стаціонарної роботи і т.п., тому виготовлення електродвигунів для кожного з



можливих режимів роботи АД не має практичного сенсу. На підставі аналізу реальних режимів виділений спеціальний клас режимів – номінальні режими, для яких проектується і виготовляються серійні двигуни. Нормативними документами передбачається вісім номінальних режимів, які відповідно до міжнародної класифікації мають умовні позначення S1 – S8. Найбільш часто використовуються наступні режими: тривалий режим роботи S1; короткочасний режим роботи S2; повторно-короткочасний режим роботи S3. Вже за назвами режимів видно, що умови експлуатації АД при них будуть істотно відрізнятися. Не зупиняючись детально на описі цих режимів відзначимо, що основною характеристикою навантажувальних режимів є теплова характеристика електродвигуна [243]. Експлуатаційні умови АД, пов'язані з постійно чергуючимися циклами нагріву – охолодження у вологому середовищі, є одними з найважчих [243–245]. Підібрати штатне традиційне ущільнення, яке однаково надійно експлуатовалося на таких режимах роботи, практично неможливо.

Невивченим залишилося питання, пов'язане з масовим використанням на приводі АПО частотних перетворювачів (ПЧ), які здійснюють такі функції: автоматична підтримка заданої температури на виході АПО шляхом включення/вимкнення певного числа вентиляторів; частотне регулювання частоти обертання вентиляторів в залежності від температури навколишнього середовища; захист АПО від закупорки теплообмінних секцій зміною частоти і напрямку обертання вентиляторів; плавний послідовний пуск групи електродвигунів [246].

Режими роботи АД з ПЧ характеризуються частими пусками і реверсами, супроводжуються значними тепловими, комутаційними і механічними діями на обмотку і механічними на підшипники, тому їх відносять до особливо жорстких умов експлуатації. При переміжному режимі (S8) крім того допускається робота АД на декількох швидкостях обертання з різними величинами навантаження на валу.

## 2.6 Висновки до розділу 2

1. Запропоновано і обґрунтовано метод підвищення техногенної безпеки небезпечних виробництв шляхом застосування МРГК з урахуванням положень системного підходу до вирішення завдань, що виникають при експлуатації складних технічних систем.

2. Розроблено концепцію проведення досліджень в дисертаційній роботі: розгляд перебігу процесів в МРГК спочатку аналітично для виявлення закономірностей і взаємозалежностей в загальних рисах; проведення адаптації відомих методів проведення експериментальних досліджень і розробка нових методів і експериментальних стендів для визначення характеристик МР та МРГК; розробка мультифізичної моделі, що враховує процеси різної фізичної природи в зазорі МРГК; удосконалення методу Файн-Кінні для оцінки ризику техногенних аварій; впровадження результатів досліджень на підприємствах небезпечних виробництв.

3. Для виключення ролі неконтрольованих фізико-хімічних факторів при технології приготування магнітної рідини була обрана єдина методика хімічного осадження з водних розчинів солей двох- і тривалентного заліза надлишком лугу.

4. Вперше в одному дослідженні вивчалися фізико-хімічні та експлуатаційні властивості МР, виготовлені більш ніж на десяти різних дисперсійних основах, що дозволило поглиблено розглянути питання структуроутворення, седиментаційною стійкості МР, виявити певні закономірності.

5. Розроблено математичну мультифізичну модель взаємопов'язаних магнітних, гідродинамічних і електричних процесів в робочій зоні МРГК, яка дозволяє дослідити перебіг процесів різної фізичної природи в зазорі герметизатора.

6. Вдосконалений метод Файн-Кінні дозволяє кількісно визначати порівняльний рівень техногенного ризику при заміні штатних ущільнень на МРГК.

Основні наукові і практичні результати, представлені в цьому розділі, в повній мірі відображені в публікаціях автора [67, 68, 161, 177, 183–185, 189, 192, 193, 200, 210, 215, 217, 218, 227–229, 231–238, 244, 245].

### РОЗДІЛ 3

## РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МАГНІТОРІДИННОЇ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ ДЛЯ ПІДТРИМКИ НЕОБХІДНОГО РІВНЯ ЕКОБЕЗПЕКИ НА ВИРОБНИЦТВІ

### 3.1 Аналіз впливу відцентрових сил і розподілу температурних полів в робочому зазорі на екологічну працездатність високошвидкісних магніторідинних герметизаторів

Вирішення завдання підтримки необхідного рівня техногенно-екологічної безпеки при застосуванні магніторідинних герметизуючих комплексів залежить від властивостей елементів МРГК і процесів, що відбуваються в його робочому зазорі.

Для забезпечення екологічної працездатності герметизаторов необхідно дослідити взаємодію магнітних і відцентрових сил та температурні режими в робочому зазорі. Обґрунтування цих досліджень надано в підрозділі 2.2.

Рішення рівняння (2.8) з урахуванням граничних умов (2.9) має вигляд:

$$V_{0r} = 0. \quad (3.1)$$

Рівняння (2.7) з урахуванням (3.1) спрощується:

$$V_{0\theta} = C_1 \frac{1}{r} + C_2 r,$$

де  $C_1$  і  $C_2$  – невідомі константи інтегрування, які знаходяться з граничних умов (2.10).

Остаточно отримуємо такий вираз:

$$V_{0\theta} = \frac{(r_e^2 - r^2)^2}{r(r_e^2 - 1)}. \quad (3.2)$$

Рівняння (2.6) з урахуванням (3.1) спрощується і призводить до співвідношення:

$$\frac{dp_{0r}}{dr} = \frac{(r_e^2 - r^2)^2}{r^3(r_e^2 - 1)^2}, \quad (3.3)$$

з якого, з урахуванням умови (2.11) отримують вираз для тиску:

$$p_{0r} = \frac{p_0^s}{\rho(V_{0\theta}^s)^2} - \frac{1 - r_e^4}{2(1 - r_e^2)^2} + \frac{1}{(r_e^2 - 1)^2} \left[ \frac{r^2}{2} - 2r_e^2 \ln r - \frac{r_e^4}{2r^2} \right]. \quad (3.4)$$

З аналізу (3.4) випливає, що збільшення швидкості обертання валу істотно впливає як на утримуваний герметизатором перепад тиску, так в підсумку і на працездатність і ресурс МРГ.

Як відомо, для створення МРГ потрібен мінімальний радіальний зазор між полюсним наконечником і валом з метою збільшення його провідності, тобто зазор порядку  $h/r_s \ll 1$ , де  $h$  – величина зазору, так що для змінної  $r$  маємо  $r_s \leq r \leq r_s + h$ . Перейдемо від змінної  $r$  ( $1 \leq r \leq l + h$ ) до змінної  $\varepsilon = r - r_s$ , яка варіюється в інтервалі  $0 \leq \varepsilon \leq h$ . Проведемо зіставлення тиску відцентрових сил в МРГ по точному і наближеному підходам [247].

Якщо вважати, що швидкість обертання рідини від рухомого вала до нерухомого полюсу лінійно убуває, то  $v(\varepsilon) = V_{0\theta}^s \left(1 - \frac{\varepsilon}{h}\right)$ , де  $V_{0\theta}^s$  – швидкість поверхні вала. Тиск відцентрових сил в цьому випадку визначається як:

$$p_y = p_0^s + \rho V_{0\theta}^s \int_0^\varepsilon v^2(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (3.5)$$

Тоді рівняння вільної поверхні за умови, що капілярними силами і в'язкими напруженнями можна знехтувати, визначається з умови сталості тиску:

$$\frac{\rho V_{0\theta}^s h}{3r_s} \left[ 1 + \left( \frac{\varepsilon}{h} - 1 \right)^3 \right] - \mu_0 M_s G_z = const, \quad \text{де} \quad G \equiv |\vec{\nabla} H|. \quad (3.6)$$

Рівняння (3.6) записано для поверхні, розташованої при позитивних  $z$ . Константа визначається з умови сталості об'єму магнітної рідини. Остаточне рівняння вільної поверхні має вигляд:

$$z(\varepsilon) = l - \frac{\rho V_{0\theta}^s h}{3r_s \mu_0 M_s G} \left[ \left( 1 - \frac{\varepsilon}{h} \right)^3 - \frac{1}{4} \right], \quad (3.7)$$

де  $l$  – довжина магніторідинного запірної елемента, мм.

У підсумку маємо, що перепад тиску, який утримується герметизатором, в разі, коли швидкість рідини від рухомого вала до нерухомого полюсу лінійно убиває, визначається за такою формулою:

$$\Delta p = \Delta p_{ct} - \rho (V_{0\theta}^s)^2 h / (2r_s). \quad (3.8)$$

Розглянемо тиск відцентрових сил по точному рішенню (3.2) в розмірних величинах:

$$p_y = p_0^s + \frac{\rho (V_{0\theta}^s)^2 r_s^2}{h^2 (h + 2r_s)^2} \left( \frac{(h + r_s)^4 - r_s^4}{2r_s^2} \right) + 2(h - r_s)^2 \ln \frac{r_s}{\varepsilon + r_s} + \frac{(\varepsilon + r_s)^4 - (h + r_s)^4}{2(\varepsilon + r_s)^2}. \quad (3.9)$$

Рівняння вільної поверхні з урахуванням припущень, наведених вище, має вигляд:

$$\frac{\rho(V_{o\theta}^s)^2 r_s^2}{h^2(h+2r_s)^2} \left( \frac{(h+r_s)^4 - r_s^4}{2r_s^2} + 2(h+r_s)^2 \ln \frac{r_s}{\varepsilon+r_s} + \frac{(\varepsilon+r_s)^4 - (h+r_s)^4}{2(\varepsilon+r_s)^2} \right) - \mu_0 M_s G_z = const. \quad (3.10)$$

Визначивши константу з умови сталості об'єму магнітної рідини, отримаємо рівняння вільної поверхні:

$$z(\varepsilon) = l + \frac{\rho(V_{o\theta}^s)^2 r_s^2}{((h+r_s)^2 - r_s^2)^2 \mu_0 M_s G} \left( \frac{(\varepsilon+r_s)^4 - (h+r_s)^4}{2(\varepsilon+r_s)^2} + 2(h+r_s)^3 \times \right. \\ \left. \times \left( (\ln(h+r_s) - 1) + \frac{r_s}{h} (\ln r_s - 1) - \ln(\varepsilon+r_s) \right) - \frac{2(h+r_s)^3}{3h} + \frac{r_s^3}{6h} + \frac{(h+r_s)^4}{2hr_s} \right) \quad (3.11)$$

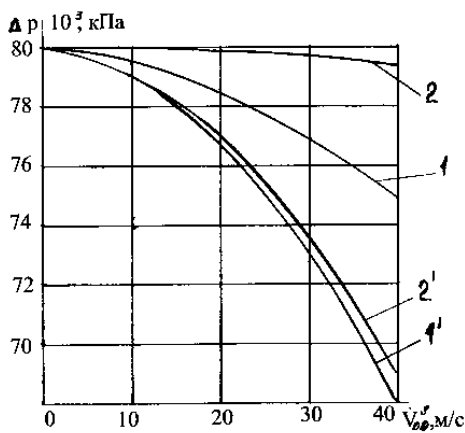
Тоді перепад тиску, який утримується герметизатором, визначається за такою формулою:

$$\Delta p = \Delta p_{ct} + \frac{2\rho(V_{o\theta}^s)^2 r_s^2}{((h+r_s)^2 - r_s^2)^2} \left( \frac{r_s^4 - (h+r_s)^4}{2r_s^2} + 2(h+r_s)^3 \left( \frac{4}{3} - \ln(h+r_s) \right) - \right. \\ \left. - 2(r_s+h)^2 r_s (\ln r_s - 1) + \frac{r_s^3}{6h} + \frac{(h+r_s)^4}{2hr_s} \right). \quad (3.12)$$

На рисунках 3.1 і 3.2 надані криві для лінійного закону зміни швидкості (крива 1) і нелінійного (крива 2), де видно несуттєву зміну утримуваного перепаду тиску для нелінійного закону зміни швидкості в порівнянні з лінійним для зазору  $h = 0,2$  мм; можливість збільшення зазору МРГ до  $0,30$  мм –  $0,35$  мм.

Цей факт важливий для практичних цілей. Обслуговуючий персонал заводів зацікавлений у великій величині зазору при застосуванні МРГ в

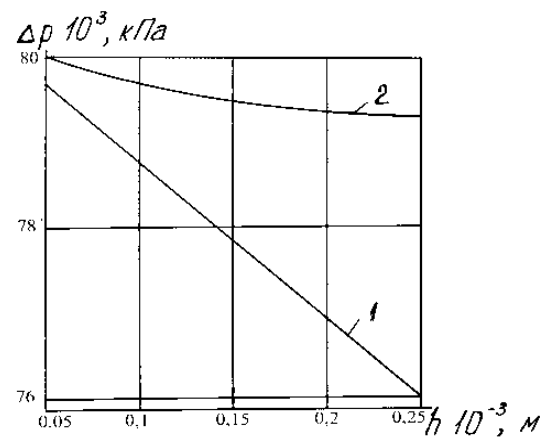
порівнянні з лабіринтовим. В цьому випадку відсутня залежність від биття вала в підшипниках, зменшується розігрів рідини в зазорі. Посилити нелінійність розподілу швидкості можна також, організувавши гідродинамічний відрив потоку масла по валу і зливні масляні канавки в безпосередній близькості від МРГ. Покращення експлуатаційних умов позитивно впливає на техногенно-екологічну безпеку при роботі технологічного обладнання.



1 – лінійна; 2 – нелінійна при  $h = 0,2$  мм;

1'–2' – те ж при  $h = 0,5$  мм

Рисунок 3.1 – Залежність утримуваного перепаду тиску від швидкості вала



1 – лінійна; 2 – нелінійна

при  $V_{00} = 1$  м/с мм;

Рисунок 3.2 – Залежність утримуваного перепаду тиску в радіальному зазорі

Збільшення робочого зазору МРГ навіть на 0,1 мм знижує залежність від радіального биття вала, вимоги до точності обробки концентраторів магнітного потоку, спрощує і здешевлює монтаж МРГ. Крім того, зменшується ризик торкання вала об сталеві полюсні наконечники МРГ (звичайні лабіринтові ущільнення виконані з алюмінію або латуні) [248].

Далі проводимо аналіз температурних полів, розглядаючи систему рівнянь Нав'є-Стокса в циліндричній системі координат  $(r, \theta, z)$ . Останній



член в (2.22) включає квадрат тензора швидкостей деформації, що враховує процеси внутрішнього тертя в рідині, коли різні її ділянки рухаються з різною швидкістю. Ненульова компонента поля швидкостей в безрозмірних величинах дорівнює [249]:

$$V_{\theta}(r) = \frac{r_e^2 - r^2}{r} \frac{1}{r_e^2 - 1}. \quad (3.13)$$

У системі координат  $(r, \theta, z)$  нетривіальна компонента тензора швидкостей деформації після обчислень має вигляд:

$$\dot{S}_{r\theta} = \dot{S}_{\theta r} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_{\theta}}{\partial r} - \frac{V_{\theta}}{r} \right) = - \frac{r_e^2}{r^2 (r_e^2 - 1)}. \quad (3.14)$$

Тензор швидкостей деформації (останній член в правій частині рівняння (2.22) обчислюють на основі відомого рішення для обертової в'язкої рідини в зазорі [176] і осереднюють за площею так, що початковий розподіл температури по товщині зазору рівномірний [250]:

$$C = Br \frac{1}{P_2} \left\{ \frac{r_e^4}{8(r_e^2 - 1)^2} \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{3r_e^4 \ln(r_e)(\ln(r_e) - 2) + 6r_e^2(r_e^2 + \ln(r_e) + 1) - 1}{3r_e^3} - \frac{11}{3} \right) \right\} = const, \quad (3.15)$$

$$\text{де } P_2 = \frac{V_{0\theta}^s r_s}{x_2},$$

$$r_s - \text{радіус вала } \left( r_s^* = \frac{r_s}{r_s} = 1 \right), \text{ м;}$$

$r_e$  – радіус зовнішньої межі зазору, м.

З виразу (3.15) видно, що величина  $C = \frac{Br}{P_2} \{ \}$  залежить від числа Брінкмана  $Br$ , від числа  $P_2$  і від виразу в фігурних дужках, який є функцією тільки товщини зазору. Отже, розігрів МР в зазорі визначається величиною  $C$  [251].

Наближений аналіз проводиться для плоского елемента в зазорі (область  $\Omega_2$ ), нижня межа якого контактує з валом (область  $\Omega_1$ ), а верхня – з зовнішнім корпусом  $\Omega_3$ . Вплив магнітного поля на поведінку рідини враховується в числі Брінкмана.

Задача розглядалася на основі рівнянь (2.22) і (3.15) для внутрішньої області від точки  $x = 0$ , яка відповідає радіусу вала  $r_s$  до точки  $x = 1$ , яка відповідає радіусу корпусу  $r_e$ , що подібне величині  $h = r_e - r_s$ . Величина  $h$  прийнята в якості характерної, тоді  $x \in [0, 1]$ . В цьому випадку область вала і область корпусу в зв'язку з малістю  $h$  розглядаються як напівнескінченні,  $r_s/h \gg 1, r_e/h \gg 1$ .

Початково-крайова задача для температури формулюється з урахуванням (2.22) і наведених вище міркувань:

- рівняння, що описує температурне поле в зазорі:

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{P_2} \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} = CH(t) \quad \text{в} \quad \Omega_2, \quad (3.16)$$

де  $H(t)$  – функція Хевісайда,

- рівняння у внутрішній і зовнішній областях ( $i=1,3$ ):

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{P_i} \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2}, \quad \text{в} \quad \Omega_1 \text{ і } \Omega_3, \quad (3.17)$$

- умови спряженості на кордоні розділу вала і МР – зазора:

$$k_1 T_1|_{x=0} = k_2 T_2|_{x=0}, \quad k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (3.18)$$

- умови спряженості на кордоні розділу МР – зазору і корпусу:

$$k_3 T_3|_{x=1} = k_2 T_2|_{x=1}, \quad k_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=1} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=1}. \quad (3.19)$$

Коефіцієнт теплопровідності  $k_i$  позначаємо як  $k_1, k_2, k_3$ .

Умови убування рішень  $T_1$  і  $T_3$  на нескінченності:

$$T_1(x, t)|_{x=-\infty} = 0, \quad T_3(x, t)|_{x=\infty} = 0. \quad (3.20)$$

Початкові умови передбачаються нульовими:

$$T_n(x, t)|_{t=0} = 0, \quad n = 1, 2, 3 \quad (3.21)$$

Рішення задачі (3.16) – (3.21) визначає розподіл температурних полів в областях  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$  [252]. Перепад температур не повинен бути більшим, інакше ущільнення вийде з ладу при будь-якій системі охолодження [55]. Можливими сценаріями подій при відмові ущільнення є викиди шкідливих речовин або вихід з ладу всієї технологічної установки з серйозними екологічними наслідками.

**Рішення для температурних полів при дії ступінчастої функції (функції Хевісайда).** Надалі для вирішення задачі (3.18) – (3.21) застосовуємо перетворення Лапласа [253]:

$$T_k^L(x, p) = \int_0^{\infty} T_k(x, t) e^{-pt} dt, \quad T_k(x, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\alpha-i\infty}^{\alpha+i\infty} T_k^L(x, p) e^{pt} dp. \quad (3.22)$$

Величина  $x$  в (3.20) розглядається як параметр.

З урахуванням наведених вище викладок і висновків з вираза (3.22) отримуємо з (3.18) – (3.21) в просторі зображень Лапласа рівняння:

$$\frac{d^2 T_1^L}{dx^2} - P_1 p T_1^L = 0 \quad \text{в} \quad \Omega_1, \quad (3.23)$$

$$\frac{d^2 T_2^L}{dx^2} - P_2 p T_2^L = -P_2 \frac{1}{p} C \quad \text{в} \quad \Omega_2, \quad (3.24)$$

$$\frac{d^2 T_3^L}{dx^2} - P_3 p T_3^L = 0 \quad \text{в} \quad \Omega_3. \quad (3.25)$$

Рішення рівнянь (3.23) – (3.25) записуються у вигляді:

$$T_1^L(x) = C_1 e^{\sqrt{P_1 p} x}, \quad (3.26)$$

$$T_2^L(x) = C_2 e^{\sqrt{P_2 p} x} + C_3 e^{-\sqrt{P_2 p} x} + \frac{1}{p^2} C, \quad (3.27)$$

$$T_3^L(x) = C_4 e^{-\sqrt{P_3 p} x}, \quad (3.28)$$

де коефіцієнти  $C_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) визначаються з умов зменшення зовнішніх рішень  $i = (1, 3)$  на нескінченності і перетворених згідно з Лапласом умов спряженості (3.18) – (3.19).

На основі (3.23) – (3.28) була розглянута початково – крайова задача і побудовані точні аналітичні рішення для температурних полів в трьох областях  $\Omega_1, \Omega_2$  і  $\Omega_3$ . Ці рішення мають вигляд:

$$\frac{T_1}{C}(x, t) = e^{p_2 t} e^{\sqrt{P_1 p_2}(x-1)} \left[ 2e^{2\sqrt{P_1 p_2}(r_e+1)} \sqrt{P_3} + e^{2\sqrt{P_1 p_2}} P_{23}^- - e^{2\sqrt{P_1 p_2} r_e} P_{23}^+ \right] / \left( e^{2\sqrt{P_2 p_2}} P_{23}^- P_{21}^- - e^{2\sqrt{P_2 p_2} r_e} P_{23}^+ P_{21}^+ \right), \quad (3.29)$$

$$T_2^C(x, t) = \frac{T_2(x, t)}{C} = 1 + e^{p_2 t} \left[ e^{\sqrt{P_2 p_2} x} \left( e^{\sqrt{P_2 p_2} r_e} P_{21}^+ \sqrt{P_3} + e^{\sqrt{P_2 p_2}} P_{23}^- \sqrt{P_1} \right) + e^{-\sqrt{P_2 p_2} x} \left( e^{\sqrt{P_2 p_2}(r_e+2)} \cdot P_{21}^- \sqrt{P_3} + P_{23}^+ \sqrt{P_1} e^{\sqrt{P_2 p_2}(2r_e+1)} \right) \right] / \left( e^{2\sqrt{P_2 p_2}} P_{23}^- P_{21}^- - e^{2\sqrt{P_2 p_2} r_e} P_{23}^+ P_{21}^+ \right), \quad (3.30)$$

$$\frac{T_3}{C}(x, t) = e^{p_2 t} e^{\sqrt{P_3 p_2}(r_e-x)} \left[ -e^{2\sqrt{P_2 p_2} r_e} P_{21}^+ + 2e^{\sqrt{P_2 p_2}(r_e+1)} \sqrt{P_1} + e^{2\sqrt{P_2 p_2}} P_{21}^- \right] / \left( e^{2\sqrt{P_2 p_2}} P_{23}^- P_{21}^- - e^{2\sqrt{P_2 p_2} r_e} P_{23}^+ P_{21}^+ \right), \quad (3.31)$$

Рішення (3.29) і (3.31) однорідні. Рішення (3.30) включає частинний роз'язок (функція Хевісайда) і однорідний.

Температурне поле  $T_2$  в зазорі  $h$  визначається згідно з (3.30). Величини, що входять в (3.30), обчислюються за формулами:

$$P_{21}^+ = \sqrt{P_2} \pm \sqrt{P_1}, \quad P_{23}^+ = \sqrt{P_2} \pm \sqrt{P_3}. \quad (3.32)$$

Лишки визначаються нескінченною дискретною множиною. В [254] було показано, що перший лишок  $p_1$  дорівнює нулю, а основний внесок дає тільки другий лишок  $p_2$ :

$$p_1 = 0, \quad p_2 = \frac{1}{4P_2(r_e - 1)^2} \ln^2 \left( \frac{(\sqrt{P_1} - \sqrt{P_2})(\sqrt{P_3} - \sqrt{P_2})}{(\sqrt{P_2} + \sqrt{P_1})(\sqrt{P_3} + \sqrt{P_2})} \right). \quad (3.33)$$

Можна показати, що внесок лишків вищого порядку  $p_1, p_3, p_4, \dots$ , дуже малий і може не враховуватися [255].

В результаті наближене рішення (3.30) з урахуванням (3.33) набирає вигляду:

$$T_2^C(x, t) = e^{p_2 t} \left[ \tilde{A} e^{a(x-1)} + \tilde{B} e^{-a(x-1)} \right] + 1, \quad (3.34)$$

де величина  $a$  в (3.34) визначається за формулою:

$$a = \sqrt{P_2 p_2}, \quad (3.35)$$

а коефіцієнти в (3.34) обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= \frac{\tilde{A}_1}{\tilde{A}_2}, \quad \tilde{B} = \frac{\tilde{B}_1}{\tilde{A}_2}, \quad \tilde{A}_1 = P_{21}^+ \sqrt{P_3 + P_{23}^- \sqrt{P_1}}, \\ \tilde{A}_2 &= P_{23}^+ P_{21}^+ - P_{23}^- P_{21}^-, \quad \tilde{B}_1 = P_{21}^- \sqrt{P_3} + P_{23}^+ \sqrt{P_1}. \end{aligned} \quad (3.36)$$

В якості характерних величин прийняті  $V_{0\theta}^s$  і  $h$ . Тоді безрозмірні величини записують в вигляді:

$$x^* = \frac{x}{h}, \quad t^* = \frac{V_{0\theta}^s}{h} t, \quad h^* = \frac{h}{h} = 1, \quad (3.37)$$

величина  $P_k$  дорівнює

$$P_k = \frac{V_{0\theta}^5}{x_k}, \quad k = 1, 2, 3 \quad (3.38)$$

За формулою (3.38) обчислюють  $P_1, P_2, P_3$ , а за формулою (3.33)  $p_2$ .

Для проведення розрахунків необхідно визначити такі величини:  $Br, P_1,$

$P_2, P_3, p_2$  – лишок,  $\eta_d, V_\theta, k_T, x, r_e = \frac{r_e}{r_s}$  (безрозмірна).

Для магнітної рідини на основі вакуумного масла VM-3, що знаходиться в зазорі МРГ, який дорівнює величині 0,2 мм (діаметр вала 200 мм, число обертів вала 750 об/хв) рішення (3.34) має вигляд [255]:

$$T_2^c(x, t) = e^{p_2 t} \left[ \tilde{A} e^{a(x^*-1)} + \tilde{B} e^{-a(x^*-1)} \right] + 1. \quad (3.39)$$

При  $\tilde{A} = \tilde{B} = 0,500$  і  $a = 1163$  отримуємо з (3.34);

$$T_2^c(x, t) = e^{p_2 t} 0.5 \left[ e^{1.16310^3(x^*-1)} + e^{-1.16310^3(x^*-1)} \right] + 1. \quad (3.40)$$

На рисунку 3.3 показані реальні функції розігріву  $b_1, b_2, b_3$  в залежності від часу  $t$ ,  $b_1 < b_2 < b_3$ , які відрізняються від функції Хевісайда поступовим наростанням розігріву від нуля  $t^* = 0$  до одиниці  $t = 1.0$ :

$$f(t) = 1 - e^{-bt} \quad \text{при} \quad t \geq 0, \quad (3.41)$$

в той час як функція Хевісайда (одинична функція) визначається як:

$$H(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t > 0 \\ 0 & \text{при } t < 0. \end{cases} \quad (3.42)$$

Рішення для функції розігріву (3.41) може бути побудовано за формулою Дюамеля згідно відомого рішення  $T_2^c(x, t)$  (3.39) для функції Хевісайда (3.42):

$$\hat{T}_2^c(x, t) = \int_0^t (1 - e^{-b\tau}) \frac{\partial T_2^c(x, t - \tau)}{\partial \tau} d\tau. \quad (3.43)$$

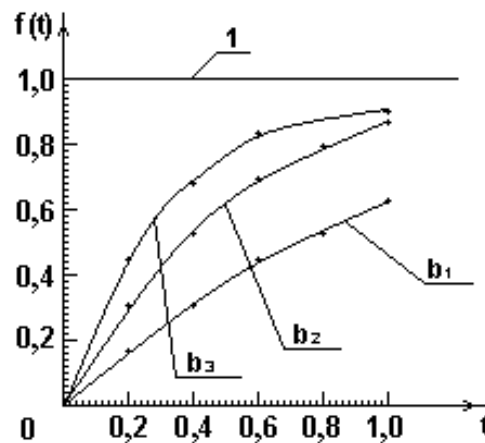


Рисунок 3.3 – Функція Хевісайда і реальні функції розігріву  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  в залежності від часу.

Рішення  $T_2^c(x, t)$  на основі (3.34) надано у вигляді:

$$T_2^c(x, t) = e^{p_2 t} \left[ \tilde{A} e^{a(x-1)} + \tilde{B} e^{-a(x-1)} \right] + 1 = e^{p_2 t} E(x) + 1, \quad 0 \leq x \leq 1, \quad t > 0 \quad (3.44)$$

де  $E(x) = \tilde{A} e^{a(x-1)} + \tilde{B} e^{-a(x-1)}$ .

Надалі похідна рішення (3.44) підставляється в (3.43) і проводиться обчислення інтегралів.



Остаточне рішення (3.42) записується у вигляді:

$$T_2^c(x,t) = -E(x) \left[ \left( 1 - \frac{P_2}{P_2+b} \right) e^{P_2 t} - \left( 1 - \frac{P_2}{P_2+b} e^{-bt} \right) \right]. \quad (3.45)$$

В реальних умовах розігрів відбувається досить швидко. Тому температурне поле  $T_2^c(t)$  тільки при малих початкових моментах часу від включення буде мало відрізнятися від рішення, отриманого для функції Хевісайда  $T(x)$ .

Проведений аналіз характеризує зміну температурного поля  $T_2^c(x,t)$  в зазорі в безрозмірному вигляді. Для обчислення температури  $T_2^c/T_0$  в зазорі  $h$  згідно (3.40) з урахуванням (3.44) отримують співвідношення:

$$\frac{T_2^c(x,t)}{T_0} = T_0 C [e^{P_2 t} E(x) + 1] = \frac{\eta_d V_{0\theta}^S X_2}{K_t h} \times \left\{ \frac{r_e^4}{8(r_e^2 - 1)^2} \times \left( \frac{3r_e^4 \ln(r_e)(\ln(r_e) - 2) + 6r_e^2(r_e^2 + \ln(r_e) + 1) - 1}{3r_e^3} - \frac{11}{3} \right) \right\}, \quad (3.46)$$

За допомогою співвідношення (3.46) зручно вивчати загальні тенденції розігріву МР в робочому зазорі МРГ в залежності від фізико-хімічних властивостей МР, матеріалу її рідкої основи, лінійних швидкостей в зазорі і т.д. Далі в реальних умовах теплова енергія від розігріву МР, яку можна обчислити за формулою (3.46), передається в зовнішній корпус, а від нього випромінюється в навколишнє середовище. В результаті через деякий час від включення настане тепловий баланс.

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.

**Про можливі режими поведінки магнітної рідини в зазорі МРГ.** При зміні швидкості обертання валу навіть при всіх інших фіксованих параметрах можливі різні режими руху рідини всередині зазору. Ці явища обумовлені сингулярним виродженням рівняння руху в'язкої рідини за числом Рейнольдса. При такому виродженні можливо безліч режимів [256]. Наприклад, якщо взяти величину зазору і коефіцієнт в'язкості фіксованими, то при зменшенні швидкості обертання валу режими руху рідини будуть істотно змінюватися. При обертанні вала в ферорідині, що заповнює зазор, породжуються вихрові хвилі Тейлора. Їх окружні моди (гармоніки) визначаються періодичною функцією  $\cos m\theta$ . Число мод визначається дискретною величиною  $m = 0, 1, 2, \dots$ ,  $m = 0$  – осесиметрична мода,  $m = 1$  – неексцентрична мода,  $m = 2$  – третя гармоніка – найнебезпечніший режим. Це означає, що величини, які характеризують МР (тиск і швидкість), будуть змінюватися по представленому закону, тобто проходити через нулі. При  $m = 2$  маємо сильно збурливі поля. При подальшому росту гармонік кількість вихрів буде збільшуватися, але вони будуть більш дрібні. Тому найнебезпечніший – це перший режим,  $m = 2$  (третя гармоніка).

### **3.2. Аналіз впливу реологічних властивостей бідисперсних магнітних суспензій на екопрацездатність магніторідинних герметизаторів**

Стаціонарна в'язка напруга, що виникає в суспензії, була встановлена згідно з теорією суспензій неферичних частинок [182], якими, в нашому випадку, є ланцюжки:

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

$$\sigma^s = \eta_f \dot{\gamma} \left[ 1 + \varphi_L \left[ \alpha_n + \frac{1}{2} (\zeta_n + \beta_n \lambda_n) + \frac{1}{2} \beta_n \cos(2\theta_n) + (\chi_n - 2\beta_n \lambda_n) \sin^2 \theta_n \cos^2 \theta_n \right] \right], \quad (3.47)$$

де  $\sigma^a$  і  $\sigma^s$  – антисиметрична і симетрична частини повної напруги, Па;

$\varphi_L$  – об'ємна частка мікронних частинок (зауважимо, що антисиметрична частка напруги виникає через моменти магнітних сил, що діють на ланцюжки; в гідродинаміці простих, немагнітних рідин, такі напруги, природно, відсутні);

$n_c$  – максимальна кількість частинок в ланцюжку;

$\Gamma_n^m$  – магнітний момент сили, яка прагне вибудувати ланцюжок вздовж поля, Н·м;

$\nu_L$  – об'єм мікронної частки, мкм<sup>3</sup>;

$\eta_f$  – в'язкість МР, Па·с.

Коефіцієнти  $\alpha_n \dots \lambda_n$  визначаються тільки числом частинок  $n$  в ланцюжку і можуть бути обчислені з відомих співвідношень [178]:

$$\alpha_n = \frac{1}{n\alpha'_0}, \quad \beta_n = \frac{2(n^2 - 1)}{n(n^2\alpha_0 + \beta_0)}, \quad \zeta_n = \frac{4}{n\beta'_0(n^2 + 1)} - \frac{2}{n\alpha'_0},$$

$$\chi_n = \frac{2\alpha''_0}{n\alpha'_0\beta''_0} - \frac{8}{n\beta'_0(n^2 + 1)} + \frac{2}{n\alpha'_0}, \quad \lambda_n = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1}. \quad (3.48)$$

Тут:

$$\alpha_0 = -\frac{1}{n^2 - 1} \left[ \frac{2}{n} + \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}} \ln(2n^2 - 1 - 2n\sqrt{n^2 - 1}) \right],$$

$$\beta_0 = \frac{1}{n^2 - 1} \left[ n - \frac{1}{2\sqrt{n^2 - 1}} \ln(2n^2 - 1 + 2n\sqrt{n^2 - 1}) \right],$$

$$\begin{aligned}
\alpha'_0 &= \frac{1}{4(n^2 - 1)^2} \left[ n(2n^2 - 5) - \frac{3}{2\sqrt{n^2 - 1}} \ln(2n^2 - 1 - 2n\sqrt{n^2 - 1}) \right], \\
\beta'_0 &= \frac{1}{(n^2 - 1)^2} \left[ \frac{n^2 + 2}{n} - \frac{3}{2\sqrt{n^2 - 1}} \ln(2n^2 - 1 + 2n\sqrt{n^2 - 1}) \right], \\
\alpha''_0 &= \frac{1}{4(n^2 - 1)^2} \left[ n(2n^2 + 1) - \frac{4n^2 - 1}{2\sqrt{n^2 - 1}} \ln(2n^2 - 1 + 2n\sqrt{n^2 - 1}) \right], \\
\beta''_0 &= -\frac{1}{(n^2 - 1)^2} \left[ 3n + \frac{2n^2 + 1}{2\sqrt{n^2 - 1}} \ln(2n^2 - 1 - 2n\sqrt{n^2 - 1}) \right].
\end{aligned} \tag{3.49}$$

Для розрахунку інтенсивності тепловиділення необхідно знайти довжину ланцюжка. З цією метою визначається намагніченість  $M_L$  мікронної частки в ланцюжку.

Намагніченість  $M$  мікронної частки в ланцюжку оцінюють за допомогою відомої напівемпіричної формули Флеріха-Кеннелі [180]:

$$M = \chi H^{(i)}, \quad \chi = \frac{\chi_0 M_{satL}}{M_{satL} + \chi_0 H^{(i)}}. \tag{3.50}$$

де  $H^{(i)}$  – напруженість магнітного поля всередині мікронної частинки, А/м;

$\chi_0$  – її магнітна сприйнятливність при нульовому полі;

$M_{satL}$  – намагніченість насичення матеріалу частинок, А/м;

$\chi$  – магнітна сприйнятливність мікронної частинки в полі  $H^{(i)}$ .

Відповідно до закону Ланжевена, магнітну сприйнятливність несучої ферорідини розраховуються за наступною формулою:

$$\chi_f = \frac{M_{satf}}{H} L\left(\frac{\mu_0 m_s H}{kT}\right). \tag{3.51}$$

де  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$H$  – напруженість магнітного поля всередині несучої ферорідини, А/м;

$m_s$  – магнітний момент наночастинки, А·м<sup>2</sup>;

$M_{satf}$  – намагніченість насичення ферорідини, А/м;

$L$  – функція Ланжевена, в загальному вигляді  $L(x) = \text{cth}x - x^{-1}$  являє собою больцманівське статистичне середнє величини  $\cos\sigma$ ; де  $\sigma$  – кут між вектором магнітного моменту і зовнішнім магнітним полем ( $x = -V/kT$ ).

Розкладаючи вираз (3.51) в ряд Тейлора, знаходять початкову сприйнятливість несучої ферорідини:

$$\chi_{f0} = \frac{\mu_0 M_{satf} m_s}{3KT}. \quad (3.52)$$

Виражаючи магнітний момент  $m_s$  з (3.52) і підставляючи цю величину в рівняння (3.51) отримуємо розрахунковий вираз для магнітної сприйнятливості несучої ферорідини:

$$\chi_f = \frac{M_{satf}}{H} L\left(\frac{3H\chi_{f0}}{M_{satf}}\right). \quad (3.53)$$

Очевидно, що  $\chi_f$  залежить від напруженості магнітного поля всередині несучої ферорідини. З неоднорідності магнітного поля поблизу ланцюжка впливає неоднорідність магнітної сприйнятливості несучої ферорідини  $\chi_f$ . Нехтуючи цим досить тонким ефектом, відомі співвідношення магнітостатики для сферичної частинки в зовнішньому полі дозволяють отримати наступне рівняння [178]:

$$H^{(i)} + \frac{M}{3} + \frac{2\chi_f H^{(i)}}{3} = (1 + \chi_f)H. \quad (3.54)$$

Комбінуючи вирази (3.50) і (3.51) отримують рівняння щодо  $H^{(i)}$ :

$$H^{(i)} + \frac{\chi_0 H^{(i)} M_{satL}}{3(M_{satL} + \chi_0 H^{(i)})} + \frac{2\chi_f H^{(i)}}{3} = (1 + \chi_f)H, \quad (3.55)$$

і рішення цього рівняння:

$$H^{(i)} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{A_1^2 + \frac{12(1 + \chi_f)HM_{satL}}{\chi_0(2\chi_f + 3)}} - A_1 \right],$$

$$A_1 = \frac{M_{satL}(3 + \chi_0 + 2\chi_f) - 3\chi_0 H}{\chi_0(2\chi_f + 3)}. \quad (3.56)$$

Для подальших розрахунків потрібно оцінити зміну (варіацію)  $\delta F$  вільної енергії мікронної частинки при зміні  $\delta H_e$  поля, зовнішнього по відношенню до цієї частинки. Ця варіація може бути подана у вигляді [180]:

$$\delta F = -\mu_0 \int (\chi - \chi_f) \mathbf{H}^{(i)} \delta \mathbf{H}_e \nu_L, \quad \nu_L = \frac{\pi d_L^3}{6}, \quad (3.57)$$

де  $d_L$  – діаметр мікронної частинки, *мкм*;

$\nu_L$  – її об'єм, *мкм*<sup>3</sup>.

При лінійному зв'язку намагніченості мікронної частки і напруженості магнітного поля цей результат переходить в формули [178], використані для розрахунку реологічних властивостей магнітних суспензій.

Оцінимо вільну енергію диполь-дипольної взаємодії двох мікронних частинок  $F_{dd}$ , яка залежить від відстані  $R$  між їх центрами. Під  $\delta H_e$  в (3.57) мається на увазі варіація зовнішнього поля, створюваного однією з двох частинок в точці з координатами центру іншої частинки при відсутності цієї ж частинки. Прийнято, що магнітний момент частинок залежить тільки від напруженості зовнішнього магнітного поля  $H$ . Отже, напруженість магнітного поля всередині мікронної частки не залежить від напруженості магнітного поля  $H_e$ , що створюється іншою мікронною часткою. Таким чином,

$$F_{dd} = -\mu_0 (\chi - \chi_f) \mathbf{H}^{(i)} \mathbf{H}_e v_L. \quad (3.58)$$

Рішення магнітостатичної задачі для мікронної частки з магнітною проникністю  $\mu$ , оточеній несучою ферорідиною з магнітною проникністю  $\mu_f$ , зводиться до такої ж задачі для мікронної частинки з магнітною проникністю  $\mu/\mu_f$ , що знаходиться у вакуумі. Отже, вираз для  $H_e$  можна записати як

$$\mathbf{H}_e = \frac{v_L (\chi - \chi_f) (3H^{(i)} \mathbf{n} \cos \theta - \mathbf{H}^{(i)})}{4\pi R^3 (1 + \chi_f)}. \quad (3.59)$$

де  $\mathbf{n}$  – одиничний вектор, спрямований уздовж прямої, яка з'єднує центри обох мікронних частинок;

$\theta$  – кут між вектором  $\mathbf{n}$  і вектором напруженості зовнішнього магнітного поля;

Підставляючи вираз (3.59) в (3.58), отримують співвідношення для вільної енергії диполь-дипольної взаємодії:

$$F_{dd} = -\frac{\mu_0 \nu_L^2 [H^{(i)}]^2 (\chi - \chi_f)^2 (3 \cos^2 \theta - 1)}{4\pi R^3 (1 + \chi_f)}. \quad (3.60)$$

Виходячи з формули, визначають компоненту уздовж осі ланцюжка сили магнітного тяжіння між найближчими частинками  $f_r^m$  і магнітний момент сили  $\Gamma_n^m$ , який прагне вибудувати ланцюжок вздовж поля:

$$f_r^m = -\left. \frac{\partial F_{dd}}{\partial R} \right|_{R=d_L}, \quad f_r^m = \frac{\pi \mu_0 [H^{(i)}]^2 d_L^2 (\chi - \chi_f)^2 (3 \cos^2 \theta - 1)}{48(1 + \chi_f)},$$

$$\Gamma_n^m = (n-1) \left. \frac{\partial F_{dd}}{\partial \theta} \right|_{R=d_L}, \quad \Gamma_n^m = \frac{\mu_0 \nu_L [H^{(i)}]^2 (\chi - \chi_f)^2 (n-1) \sin \theta \cos \theta}{4(1 + \chi_f)}. \quad (3.61)$$

Докладний вивід співвідношень (3.61) для суспензії намагнічуваних частинок в немагнітній рідині наведено в роботі [89]. Новим в дисертаційній роботі є врахування нелінійної намагніченості мікронних частинок і магнітних властивостей ферорідини.

Розмір ланцюжків, утворених мікронними частинками, визначається балансом сил магнітного тяжіння частинок в ланцюжку і гідродинамічними силами, які руйнують ланцюжок. Далі оцінюється число частинок  $n$  в ланцюжку з умови рівності компонент уздовж осі ланцюжка сили магнітного тяжіння між найближчими частинками  $f_m$  і гідродинамічної сили  $f_h$ , яка руйнує цей ланцюжок, згідно с [89]. Вивід формули для величини  $f_h$  можна знайти в [180]. Використовуючи результат цієї роботи, отримують:

$$f_r^h = \frac{3\pi \gamma d_L^2 \eta_f (n^2 - 1) \sin \theta \cos \theta}{8}, \quad (3.62)$$



де  $\eta_f$  – в'язкість ферорідини, Па·с;

$\eta_0$  – в'язкість рідини-основи (вакуумне масло), Па·с;

$\varphi_s$  – об'ємна частка нанодисперсних частинок в ферорідини.

Згідно [89], отримуємо вираз для гідродинамічного моменту  $\Gamma_n^h$ , що прагне відхилити ланцюжок від напрямку магнітного поля в напрямок швидкості течії середовища:

$$\Gamma_n^h = \frac{\pi n (n^2 - 1) d_L^3 \dot{\gamma} \eta_f \cos^2 \theta_n}{4}. \quad (3.63)$$

Кут  $\theta$  визначається балансом  $\Gamma_n^h$  і  $\Gamma_n^m$ :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{6 \dot{\gamma} \eta_f n (n + 1) (1 + \chi_f)}{\mu_0 [H^{(i)}]^2 (\chi - \chi_f)^2}. \quad (3.64)$$

Рівність сил  $f_r^h$  і  $f_r^m$  призводить до рівняння четвертого ступеня відносно максимального числа частинок в ланцюжку  $n_c$ :

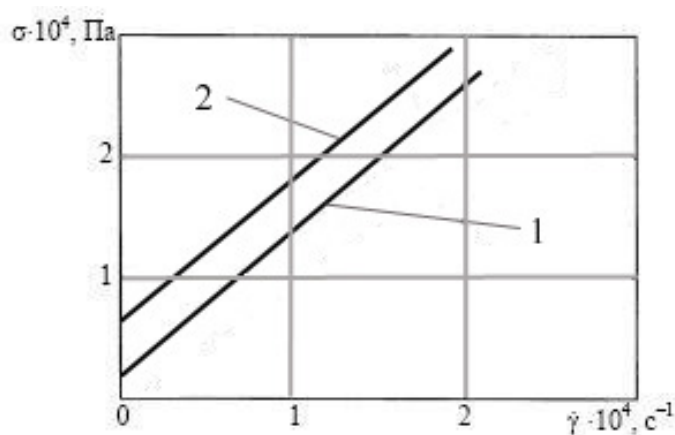
$$n_c^4 + \frac{5n_c^3}{4} - \frac{n_c^2}{2} - \frac{3n_c}{4} - \frac{\mu_0^2 [H^{(i)}]^2 (\chi - \chi_f)^4}{72 \dot{\gamma}^2 \eta_f^2 (1 + \chi_f)^2} = 0. \quad (3.65)$$

Оскільки для мікронних частинок броунівські ефекти не істотні, кількість цих частинок, що входять до складу ланцюгових агрегатів, визначається виключно  $n_c$ .

Надалі розраховують інтенсивність тепловиділення  $W$  в одиниці об'єму в одиницю часу згідно з формулою (2.24).

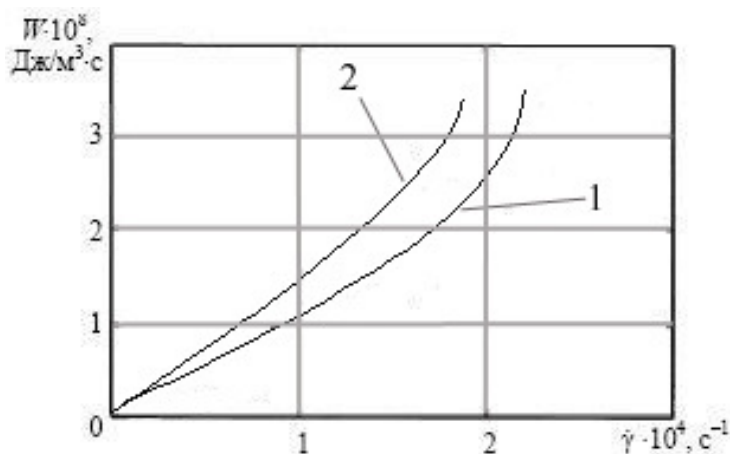
На рисунках 3.4 і 3.5 надані результати розрахунків відповідно до

визначеної вище моделі при об'ємній концентрації частинок: 1 г карбонільного заліза, розміщений в 10 мл ферорідини, і при в'язкості рідини - основи – 0,85 Па·с. З ростом напруженості магнітного поля і швидкості зсуву інтенсивність тепловиділення в одиниці об'єму в одиницю часу істотно збільшується. Це потрібно враховувати при проектуванні МРГК для валів з великими діаметрами та обертами.



1–  $H = 100$  кА/м, 2–  $H = 2000$  кА/м

Рисунок 3.4 – Залежність напруги від швидкості зсуву



1–  $H = 100$  кА/м, 2–  $H = 2000$  кА/м

Рисунок 3.5 – Залежність інтенсивності тепловиділення в одиниці об'єму середовища в одиницю часу від швидкості сдвигової течії

Швидкість зсуву можна визначити за формулою:

$$\gamma = \frac{Rn_{об}}{\delta}, \quad (3.66)$$

де  $R$  – радіус вала, м;

$\delta$  – робочий зазор, мм;

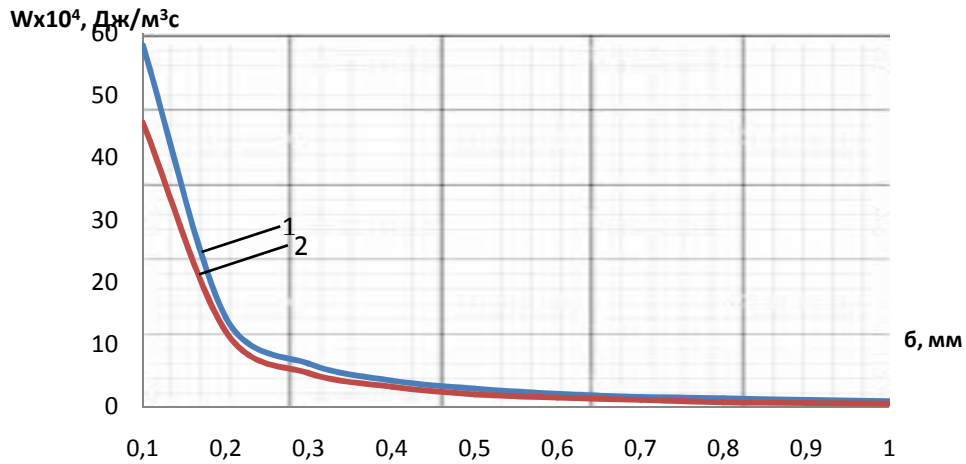
$n_{об}$  – частота обертання валу,  $s^{-1}$ .

З огляду на це, аналіз отриманих результатів будемо проводити в залежності від величини робочого зазору, що є більш наочним [257].

На рисунку 3.6 представлена залежність інтенсивності тепловиділення при значеннях напруженості магнітного поля в зазорі, що дорівнює 100 кА/м (крива 1), 500 кА/м, 1000 кА/м і 2000 кА/м (крива 2). На графіку інтенсивність тепловиділення при  $H = 500$  кА/м – 2000 кА/м показані однією кривою, тому що розрахункові значення не відрізняються один від одного більш ніж на 0,1 %. З цього можна зробити висновок, що в зазорі можна не враховувати вплив напруженості магнітного поля на інтенсивність тепловиділення.

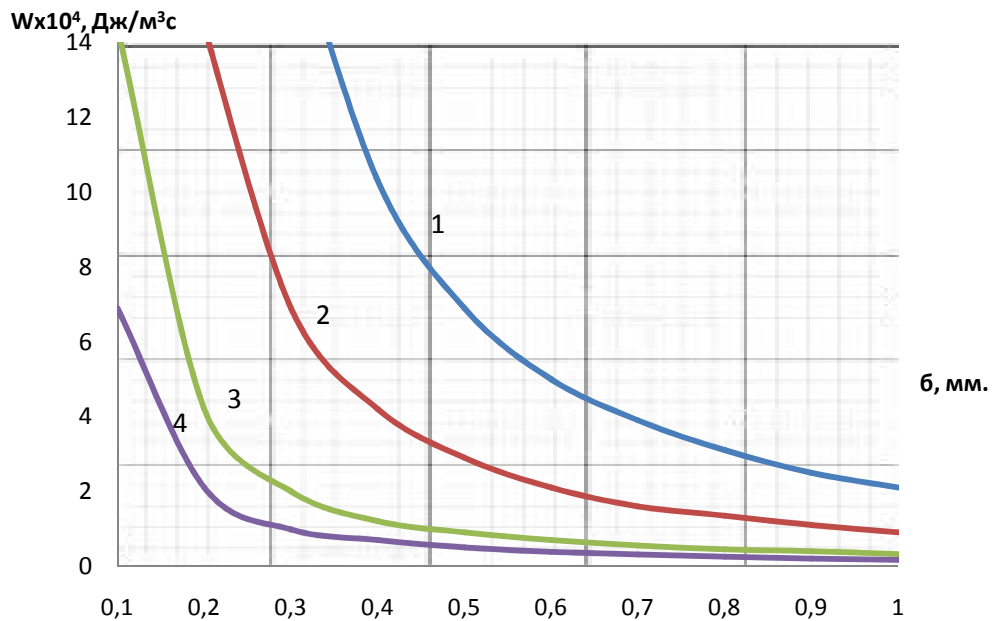
Істотний вплив на інтенсивність тепловиділення надає частота обертання валу. На рисунку 3.7 представлена залежність інтенсивності тепловиділення від величини зазорів при обертах вала від 500 об/хв до 3000 об/хв. Розрахунки проводилися для вала діаметром 200 мм.

Введення мікронних частинок в робочу зону МРГ можливе, коли інтенсивність тепловиділення незначно зростає при зменшенні зазору, тобто при частотах обертового вала 500 об/хв і 750 об/хв для величини зазору 0,4 мм можна додати порошок карбонільного заліза в концентрації, зазначеної вище. З ростом частоти обертання величина зазору, при якій можливо додавати порошок зростає. Наприклад, для частоти 1500 об/хв – тільки при  $\delta = 0,7 - 0,8$  мм. Можливість застосування цього способу для 3000 об/хв вимагає додаткової експериментальної перевірки.



1 –  $H = 500 \text{ кА/м} - 2000 \text{ кА/м}$ , 2 –  $H = 100 \text{ кА/м}$

Рисунок 3.6 – Залежність інтенсивності тепловиділення від величини зазору



Оберти вала, об/хв: 1 – 3000; 2 – 1500; 3 – 750; 4 – 500

Рисунок 3.7 – Залежність інтенсивності тепловиділення від величини зазору

Далі теоретичне дослідження реологічних ефектів в бідисперсних МР було продовжено з урахуванням взаємного підмагнічування мікронних частинок в ланцюжку. Для того, щоб спростити математичні розрахунки, були введені такі припущення. По-перше, вважаємо, що несуча ферорідина

відсутня, тому  $\chi_f = 0$ . По-друге, модуль і напрямки магнітних моментів всіх мікронних частинок в ланцюжку однакові. По-третє, обмежуємося наближенням лінійного закону намагніченості частинки по полю.

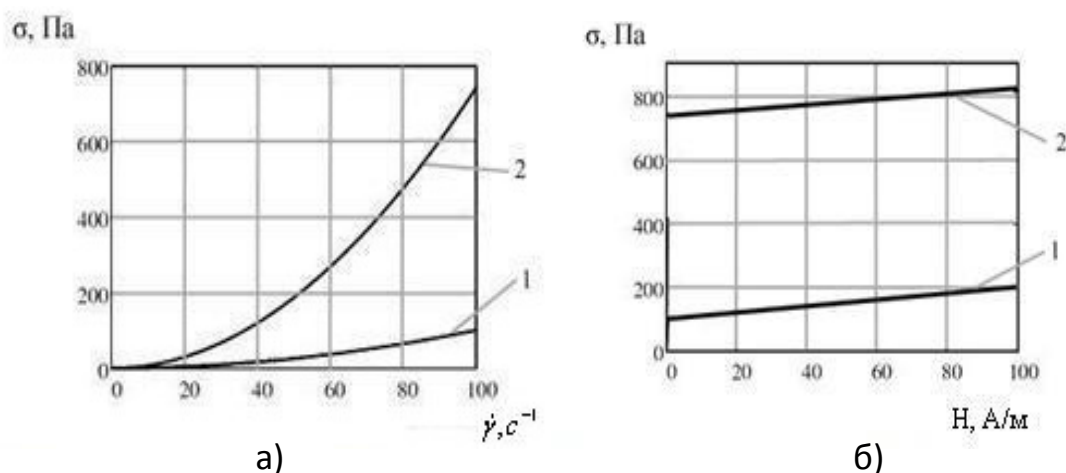
Розглянуто ланцюжок, що складається з  $n$ -частинок, вміщених в зовнішнє магнітне поле  $H$ . Під дією гідродинамічної течії вісь ланцюжка відхиляється від напрямку магнітного поля на кут  $\theta$ . Так як магнітні моменти частинок  $m$  в ланцюжку взаємодіють один з одним, то вектор  $m$  відхилений від вектора  $H$  на кут  $\psi$ . Очевидно, що  $0 \leq \psi \leq \theta$ .

Далі повторюючи вищенаведені викладки отримуємо рівняння щодо числа  $n_c$ , виходячи з рівності магнітних та гідродинамічних сил [258]:

$$\frac{\eta_0^2 \dot{\gamma}^2 (n_c^2 - 1)^2 (2n_c - \Sigma)^2 (\Sigma + 4n_c)^2 (10\Sigma n_c - \Sigma^2 + 2n_c^2)}{36\mu_0 H^2 \Sigma^2 n_c^2 (8n_c - \Sigma)^2} + \frac{4\mu_0 H^2 n_c^2}{(2n_c - \Sigma)^2} = 0. \quad (3.67)$$

Підставляючи отримані результати в вирази (2.24) і (3.47), знаходимо напругу  $\sigma$  і інтенсивність тепловиділення  $W$ . Деякі результати розрахунків наведені на рисунку 3.8.

Представлені результати показують, що взаємодія віддалених частинок в ланцюжку істотно, в рази, збільшує мікроскопічну напругу в магнітній суспензії. Фізичною причиною цього є збільшення магнітного моменту частинки в ланцюжку, що, в свою чергу, призводить до зростання числа  $n_c$  частинок в ланцюжку. Тому магнітов'язкий ефект в суспензіях з ланцюжками повинен бути в рази сильніший, ніж це передбачається традиційної теорією [180], в якій враховується взаємодія лише між найближчими частинками в ланцюжку. Ця обставина також має враховуватися при додаванні мікронних частинок в робочий зазор МРГ.



1 – без урахування взаємного підмагнічення частинок в ланцюжку; 2 – з урахуванням

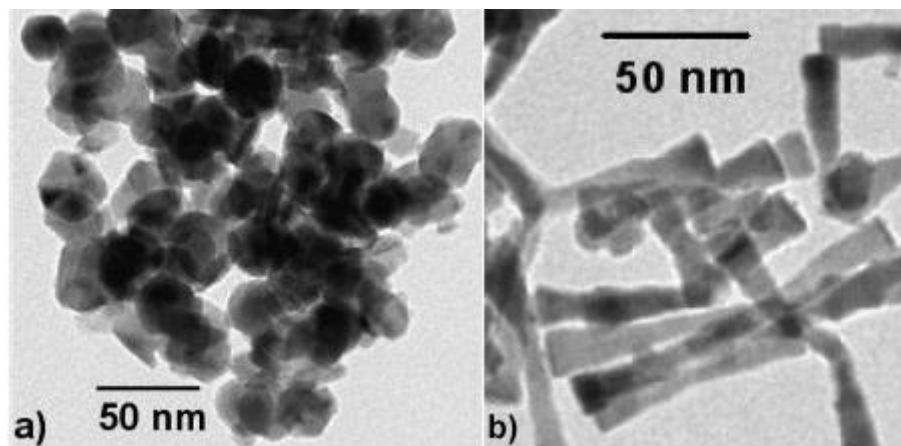
Рисунок 3.8 – Зіставлення результатів залежності напруги  $\sigma$  від швидкості зсуву  $\dot{\gamma}$  (а) та від напруженості зовнішнього МП  $H$  (б)

Традиційні магнітні рідини складаються зі сферичних частинок. В останнє десятиріччя в багатьох наукових центрах світу йде активний синтез і дослідження властивостей магнітних рідин нового покоління, що мають істотні переваги перед традиційними системами з точки зору їх практичного застосування. Одним з таких напрямків є синтез нано- та мікродисперсних магнітних рідин зі стрижнеподібними частинками [259, 260].

Перші ж експерименти показали, що магнітореологічні ефекти в таких системах в рази і на порядки сильніше, ніж в їхніх традиційних аналогах [261, 262]. На рисунку 3.9 показані електронні фотографії МР зі сферичними і стрижнеподібними частинками.

Середня довжина стрижнеподібних частинок в експериментах [180] була 56 нм. Для цих ферорідин була виявлена N-образна залежність напруги від швидкості зсуву. Подібна залежність для традиційних магнітних рідин ніколи не спостерігалася – вимірювання завжди показують монотонну залежність від швидкості зсуву.

З огляду на перспективність нового технологічного матеріалу, було вирішено застосувати викладки для бідисперсних частинок при вивченні МР зі стрижнеподібними частинками.



а) – МР з сферичними частинками, б) – МР з стрижнеподібними частинками

Рисунок 3.9 – Електронні фотографії магнітної рідини

У роботах [263–266] обґрунтовується наявність двох видів кластерів для МР зі стрижнеподібними частинками.

У першому з них сили тертя відносно невеликі (але, все ж, не дозволяють кластерам руйнуватися). При відхиленні під дією гідродинамічних сил осі такого кластера від прикладеного магнітного поля деякі частинки в ньому переорієнтуються. Це призводить до зміни магнітного моменту кластера, як за величиною, так і за напрямком щодо тіла частинки. Іншими словами, агрегати такого типу подібні парамагнітним часткам. В агрегатах другого типу сили тертя настільки великі, що вони фіксують орієнтацію частинок, створену в рівноважному стані, коли вісь кластера була орієнтована уздовж поля. При відхиленні таких кластерів від поля їх магнітні моменти зберігаються, напрямком моменту збігається з віссю агрегату.

З огляду на присутність кластерів двох типів в магнітній рідині, маємо:

$$\begin{aligned}\sigma_a(t) &= \sigma_{a1}(t) + \sigma_{a2}(t), \\ \sigma_s(t) &= \sigma_{s1}(t) + \sigma_{s2}(t),\end{aligned}\tag{3.68}$$

де  $\sigma_a(t)$  і  $\sigma_s(t)$  – антисиметрична і симетрична частини напруги, що породжується присутністю кластерів в магнітній рідині, Па.

Тут і далі індекси 1 і 2 означають величини, що відносяться до кластерів першого (які перемагнічуються при відхиленні від магнітного поля) і другого (з фіксованим магнітним моментом) типу.

Нехтуючи тепловими флуктуаціями орієнтацій багаточасткових кластерів, отримуємо вирази для симетричної і антисиметричної напруги, які справедливі для обох типів кластерів [182, 261]:

$$\begin{aligned}\sigma_{sj}(t) &= \eta_0 \dot{\gamma} \Phi_j \left[ \alpha_j + \frac{\zeta_j + \beta_j \lambda_j}{2} + \frac{\beta_j \cos 2\theta_j(t)}{2} + \frac{(\chi_j - 2\beta_j \lambda_j) \sin^2(2\theta_j(t))}{4} \right] - \\ & - \frac{\eta_0 \Phi_j \beta_j}{2} \frac{d}{dt} \sin 2\theta_j(t), \quad \sigma_{aj}(t) = \frac{\Phi_j \Gamma_j^m(t)}{2V_j}.\end{aligned}\tag{3.69}$$

де  $\Phi_j$  – об'ємна частка кластерів,

$V_j$  – об'єм кластера, мкм<sup>3</sup>;

$\Gamma_j^m$  – магнітний момент, діючий на кластер і прагнучий вирівняти напрямок осі кластера з напрямком вектора напруженості магнітного поля, Н·м;

$\theta_j(t)$  – кут, на який відхиляється вісь кластера від напрямку вектора напруженості магнітного поля;

$\alpha_j, \beta_j, \lambda_j, \chi_j$ , і  $\zeta_j$ , – коефіцієнти, що залежать від форм-фактора  $r_j$ , рівного відношенню великій осі кластера до малої. Явний вигляд цих коефіцієнтів



дан в [182].

Далі послідовно визначаються моменти магнітних і гідродинамічних сил, що діють на кластери обох типів.

Прирівнюючи магнітні моменти до гідродинамічних моментів, отримують звичайні диференціальні рівняння щодо кутів відхилення осей кластерів від напрямку напруженості магнітного поля [259, 267]:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_1(t)}{dt} &= \frac{r_1^2 \dot{\gamma}_2 \cos^2 \theta_1(t) + \dot{\gamma}_2 \sin^2 \theta_1(t) - A_1 \sin \theta_1(t) \cos \theta_1(t)}{1 + r_1^2}, \\ \frac{d\theta_2(t)}{dt} &= \frac{r_2^2 \dot{\gamma}_2 \cos^2 \theta_2(t) + \dot{\gamma}_2 \sin^2 \theta_2(t) - A_2 \sin \theta_2(t)}{1 + r_2^2}, \\ A_1 &= \frac{\mu_0 \chi^2 H^2 (1 - 3N_1)(2N_1 r_1^2 - N_1 + 1)}{4\eta_0 (N_1 \chi + 1)(\chi - N_1 \chi + 2)}, \\ A_2 &= \frac{\mu_0 H M_2 (2N_2 r_2^2 - N_2 + 1)}{4\eta_0 \dot{\gamma}_2}. \end{aligned} \quad (3.70)$$

з такими початковими умовами:

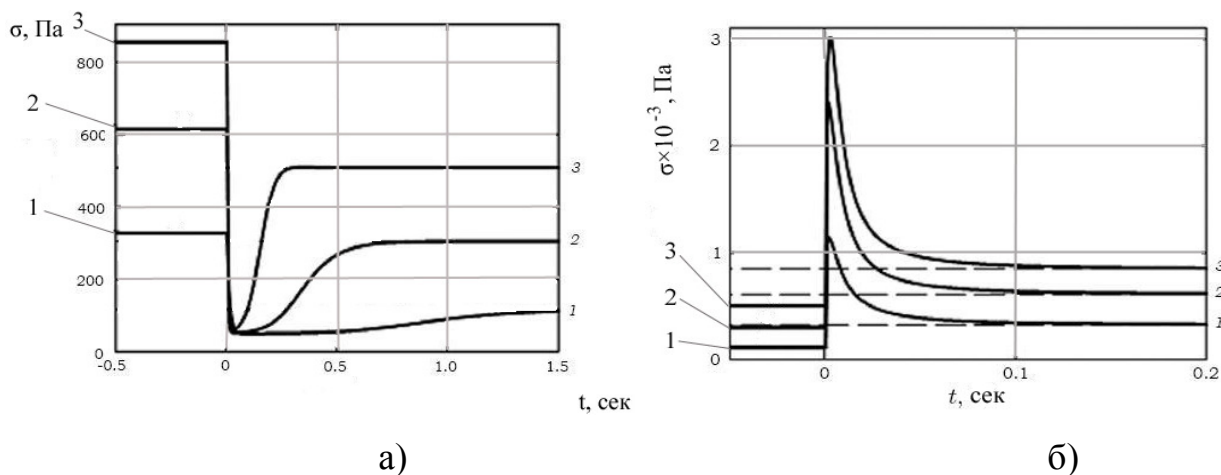
$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta_1(0) &= \frac{A_1 - \sqrt{A_1^2 - 4r_1^2 \dot{\gamma}_1^2}}{2\dot{\gamma}_1}, \\ \sin \theta_2(0) &= \frac{\sqrt{4r_2^4 - 4r_2^2 + A_2^2 - A_2}}{2(r_2^2 - 1)}. \end{aligned} \quad (3.71)$$

На рисунку 3.10 показані результати розрахунків залежності повної напруги  $\sigma(t)$  від часу при стрибкоподібних змінах швидкості зсуву ( на рисунку 3.10 а – від  $200 \text{ c}^{-1}$  до  $10 \text{ c}^{-1}$ , на рисунку 3.10 б – від  $10 \text{ c}^{-1}$  до  $200 \text{ c}^{-1}$ ).

Графіки ілюструють значні скачки, амплітуда яких збільшується з ростом напруженості магнітного поля. Поява цих стрибків пояснюється наявністю похідної за часом в рівнянні (3.68) для симетричної частини напруги.

Характерний час релаксації має порядок  $0,1\text{--}0,5 \text{ c}$ ; цей час зменшується при зменшенні напруженості магнітного поля. Варто відзначити, що різниця характерного часу релаксації пояснюється нелінійною залежністю напруги від швидкості зсуву. У рідинах з лінійною реологією час релаксації не залежить від початкової і кінцевої величини швидкості зсуву.

Зазначені особливості ефектів досить перспективні для застосування в МРГ з метою корекції робочого зазору за методом, запропонованим в [177].



Стрибкоподібні зміни швидкості зсуву: а) – від  $200 \text{ c}^{-1}$  до  $10 \text{ c}^{-1}$ ; б) – від  $10 \text{ c}^{-1}$  до  $200 \text{ c}^{-1}$

1 –  $H = 200 \text{ A/m}$ ; 2 –  $H = 300 \text{ A/m}$ ; 3 –  $H = 400 \text{ A/m}$

Рисунок 3.10 – Залежність повної напруги від часу при різних напруженостях магнітного поля

### 3.3 Висновки до розділу 3

1. Використовуючи класичний підхід і загальні рівняння ферогідродинаміки розроблені аналітичні моделі впливу відцентрових сил і розподілу температурних полів в робочому зазорі на працездатність і довговічність високошвидкісних МРГ. Дані моделі якісно вірно описують перебіг процесів в МРГ і дозволяють отримати деякі кількісні співвідношення, які використовуються при початковому етапі проектування МРГК для системного узгодження умов працездатності та екобезпеки при визначенні конструктивних елементів герметизатора.

2. Встановлено, що при нелінійному законі зміни швидкості в зазорі величина утримуваного перепаду тиску зменшується більш плавно і менш інтенсивно, ніж при лінійному законі зміни швидкості. Утримуваний перепад тиску в діапазоні зазорів від 0,15 мм до 0,3 мм практично не зменшується при нелінійному законі, що необхідно враховувати при розробці конструкцій МРГ для забезпечення екобезпечних умов експлуатації.

3. На основі теоретичних досліджень отримано рішення задачі нестационарного теплового режиму МРГ. Визначено функцію розігріву на основі задачі про рух рідини в кільцевій області та обчисленні теплового джерела, пропорційного квадрату тензора швидкостей деформації. Обчисленням інтеграла Дюамеля отримано рішення в замкнутому вигляді для довільних наростаючих від нуля за часом функцій розігріву. Отримані результати можуть бути корисними при розрахунках МРГ, що дозволяють задавати різні критерії подібності, до яких входять конкретні параметри: в'язкість, теплоємність і ін.

4. Розроблено нову математичну модель процесів в робочому зазорі МРГ при додаванні феромагнітних мікронних частинок, що враховує вплив реологічних магнітов'язких ефектів на інтенсивність тепловиділення при різних режимах роботи і конструктивних показниках. Її використання

дозволяє визначити сприятливі умови надійної та екобезпечної експлуатації МРГК.

5. Встановлено, що з ростом швидкості зсуву інтенсивність тепловиділення в робочому зазорі МРГ збільшується нелінійно.

6. Інтенсивність тепловиділення для існуючих конструкцій при напруженості магнітного поля в зазорі МРГ від 500 кА/м до 2000 кА/м практично не змінюється при фіксованих частотах обертання валів обладнання. При збільшенні обертів валу з 500 об/хв до 3000 об/хв інтенсивність тепловиділення в зазорі істотно збільшується, що перешкоджає можливому додаванню мікронних частинок карбонільного заліза.

7. Обґрунтовано, що підвищення промислової та екологічної безпеки МРГ при робочих зазорах до 1 мм можливо шляхом самокорегування робочого зазору за допомогою додавання феромагнітного мікронного порошку карбонільного заліза з концентрацією близько 1 г на 10 мл МР.

8. Доведено, що врахування взаємного підмагнічування мікронних частинок в ланцюжку в рази збільшує макроскопічну напругу в бідисперсній МР і це необхідно враховувати при реалізації магніторідинної герметизації згідно патенту України № 106420.

Основні наукові і практичні результати, представлені в цьому розділі, в повній мірі відображені в публікаціях автора [177, 247–252, 255, 257–259, 267].

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТОРІДИННОЇ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ОБЛАДНАННЯ

#### 4.1 Експериментальні дослідження температурних і частотних залежностей магнітної сприйнятливості магнітної рідини

Криві намагнічування, температурні і частотні залежності магнітної сприйнятливості будь-якого типу МР є важливими характеристиками для вивчення впливу структурної організації на процеси релаксації магнітного моменту дисперсних частинок. Для тих МР, властивості яких вивчаються більш детально, криві намагніченості і частотні характеристики дійсної та уявної частини магнітної сприйнятливості наведені в Додатках Г та Д.

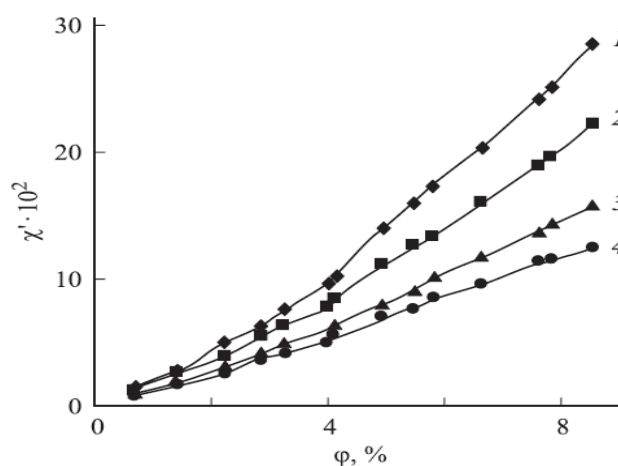
Широке застосування в промислових МРГК отримали МР на основі вакуумного масла VM-3. Саме вони вивчалися детально.

Спочатку була досліджена концентраційна залежність магнітної сприйнятливості при впливі постійного МП.

Для цього з вихідного зразка шляхом розбавлення рідиною-носієм отримали концентрований ряд магнітних рідин, що складається з 14 зразків, концентрація самого розведеного з яких становила  $\varphi=0,67\%$ . Виявилось, що початкова ділянка концентраційної залежності магнітної сприйнятливості мало відрізняється від лінійної до концентрацій, наближених до значень 4 % (рис. 4.1, крива 1).

Вплив зовнішнього постійного магнітного поля призводить до "згладжування" кривої  $\chi'(\varphi)$ , Так що при досить великій напруженості постійного магнітного поля вона стає близькою до лінійної у всьому дослідженому концентраційному інтервалі (рис. 4.1, криві 2 – 4).

Спостереження в оптичний мікроскоп показали, що при зміні концентрації шляхом розведення первинного, спочатку однорідного, зразка в області концентрацій, відповідних 4 %, в магнітній рідині починається процес структуроутворення. При цьому найбільше число агрегатів спостерігається в зразках з концентрацією дисперсної фази приблизно 3 – 3,5 %.



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

Рисунок 4.1 – Залежність магнітної сприйнятливості від концентрації дисперсних частинок при впливі постійного магнітного поля

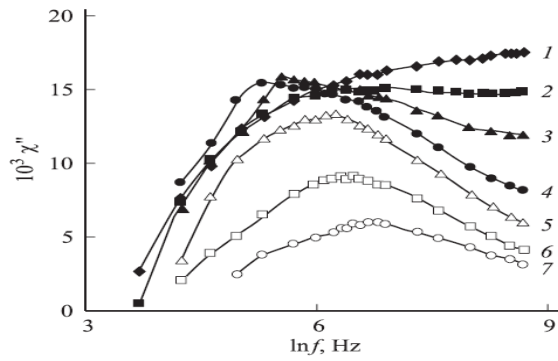
Можна припустити, що при розведенні спочатку однорідної магнітної рідини за рахунок виникаючого дефіциту поверхнево-активної речовини утворюються агрегати з частково замкнутими магнітними моментами однодомених дисперсних частинок. Наявність таких агрегатів і може бути причиною лінійності початкового відрізка концентраційної залежності. Під дією зовнішнього постійного магнітного поля відбувається об'єднання агрегатів в ланцюжки, які вибудовуються вздовж напрямку поля.

Виявилось, що для всіх досліджених зразків частотні залежності уявної частини комплексної магнітної сприйнятливості мають різний характер в разі

отримання їх без і при впливі зовнішнього постійного магнітного поля. Під час відсутності зовнішнього поля  $\chi''$  монотонно зростає (рис. 4.2, крива 1) зі збільшенням частоти вимірювального поля. При накладенні магнітного поля в частотній залежності уявної частини  $\chi'(f)$  з'являється максимум при деякій частоті, що залежить від напруженості постійного магнітного поля (рис. 4.2, криві 2 – 7). При цьому, спочатку, при збільшенні напруженості поля від 0 до  $\sim 1,6$  кА/м частота, відповідна максимуму  $\chi''$  трохи зменшується, а при подальшому підвищенні напруженості постійного магнітного поля – починає збільшуватися. Розрахунок ефективного часу релаксації магнітного моменту дисперсних частинок при використанні значення частоти максимуму ( $\tau = 1/f_p$ ) дозволив побудувати залежність  $\tau$  від напруженості зовнішнього магнітного поля, представлену на рисунку 4.3 (на рисунках 4.2 і 4.3 приведені отримані залежності для зразка з концентрацією  $\phi = 8,6$  %; для інших зразків отримані залежності мають аналогічний характер). Проведені дослідження дозволили отримати також залежність часу релаксації від концентрації дисперсної фази  $\phi$  при різних значеннях магнітного поля (рис. 4.4).

Виявлені особливості релаксації магнітного моменту пов'язані з виникненням структурної організації в системі дисперсних частинок при впливі зовнішнього магнітного поля, що раніше теоретично досліджувалось в роботах [66, 90, 101]. Зокрема, в [101] розглядається зміна часу релаксації при формуванні в магнітних рідинах ланцюгових агрегатів.

Якісне узгодження отриманих результатів з висновками роботи [101] дозволяє припустити, що спостерігаємі особливості магнітних властивостей досліджених зразків магнітної рідини пов'язані з утворенням ланцюгових агрегатів при дії зовнішнього постійного магнітного поля. Параметри



Напруженість МП, кА/м: 1 – 0; 2 – 0,4; 3 – 0,8; 4 – 1,75; 5 – 3,26; 6 – 6,45;  
7 – 9,67

Рисунок 4.2 – Частотна залежність уявної частини комплексної магнітної сприйнятливості при впливі постійного магнітного поля

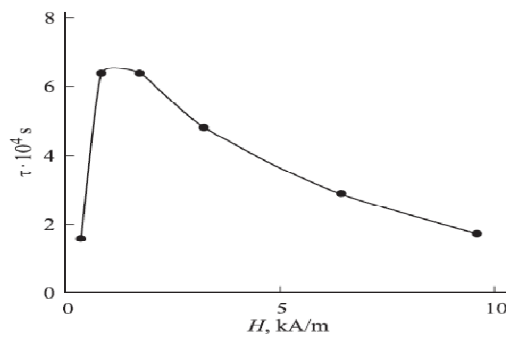
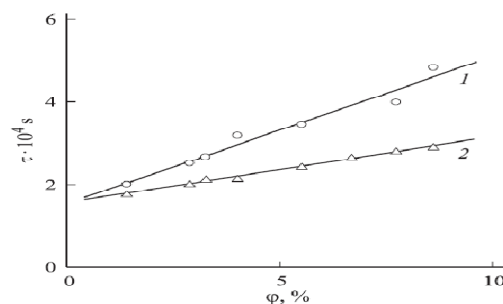


Рисунок 4.3 – Залежність часу релаксації від напруженості постійного магнітного поля



Напруженість МП, кА/м: 1 – 3,26; 2 – 6,45

Рисунок 4.4 – Залежність часу релаксації від концентрації дисперсних частинок при впливі постійного магнітного поля



ланцюжків залежать від концентрації дисперсної фази, початкового структурного стану зразка і від напруженості магнітного поля.

Зауважимо, що в дійсності в МР має місце розкид частинок за розміром. Тому МР не описується дискретним набором часів релаксації: в ній представлені всі часи релаксації  $\tau$  з вагою  $c(\tau)$ .

Найбільший внесок в ефективний час релаксації дають часи  $\tau$  з найбільшим значенням  $c(\tau)$ . Однак внесок в магнітну сприйнятливості рідини частинок пропорційний квадрату їх об'єму. Тому великі частки істотно впливають на магнітні властивості рідини, незважаючи на їх малу кількість.

У постійному магнітному полі час релаксації частинок зменшується з ростом поля. Залежність часу релаксації від поля визначається параметром Ланжевена  $M_s V H / kT$  [66, 90]. Для великих частинок параметр Ланжевена стає чималим навіть у слабких полях. У результаті цього відбувається різке зменшення функції  $c(\tau)$ . Також при одному і тому ж полі великі частинки знаходяться ближче до стану насичення, ніж дрібніші. Таким чином, внесок великих частинок в сприйнятливості з ростом поля зменшується швидше, ніж внесок дрібних. Внаслідок цього відбувається зменшення часу релаксації. Виникаючи в магнітній рідині під дією магнітного поля процеси агрегування призводять до збільшення впливу зазначених вище процесів на величину часу релаксації.

Можна припустити, що саме з цими процесами пов'язані виявлені в даній роботі особливості релаксації намагніченості. Спочатку в однорідній магнітній рідині при накладенні зовнішнього постійного магнітного поля починається процес утворення ланцюгових агрегатів. Це призводить до зростання часу релаксації (рис. 4.3). 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.

В цілому, необхідно відзначити, що з виникненням структурного упорядкування при впливі постійного МП і пов'язана хороша працездатність дослідженого зразка в МРГК [189, 268–270], а це дозволяє покращити рівень техногенно-екологічної безпеки.

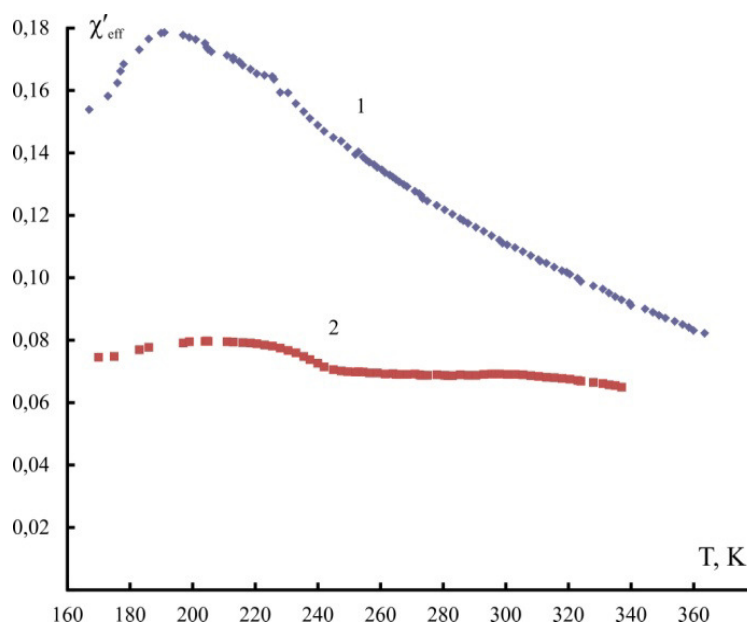
Перехід системи упорядкований стан повинен проявлятися на характері температурних залежностей магнітних властивостей системи, зокрема її магнітної сприйнятливості.

Як об'єкти дослідження було використано три зразка, один з яких (№1) був дисперсією магнетиту в гліцерині, два інших (№2 та №3 відповідно) – сухий залишок, отриманий шляхом випаровування магнітних рідин на основі гасу. Намагніченість зразка №1 становила 38кА/м, температура переходу в твердий стан при охолодженні – 270 К, середній розмір частинок, визначений за допомогою електронної мікроскопії становив близько 8 нм. Зразки №2 та №3 були підібрані так, що середній розмір їх часток істотно відрізнявся і становив 7 нм і 15 нм відповідно.

Проведені дослідження показали, що температурна залежність магнітної сприйнятливості зразка №1 має максимум, проте відповідна йому температура не збігається з температурою затвердіння зразка (рис. 4.5, крива 1). Дійсно, як видно з рисунка, максимум магнітної сприйнятливості спостерігається при температурі 192 К, тоді як температура переходу зразка з твердого стану в рідке, визначена експериментальним шляхом, становить 270 К. Додаткове впливання постійним магнітним полем, спрямованим з вимірювальним, зміщує максимум в область більш високих температур (рис. 4.5, крива 2). Температурні залежності магнітної сприйнятливості зразків №2 і №3 також мають максимуми, температура яких залежить від частоти вимірювального поля і напруженості додатково прикладеного постійного магнітного поля. На рисунку 4.6 наведені температурні залежності магнітної сприйнятливості зразка №2 при різній частоті вимірювального поля. З його

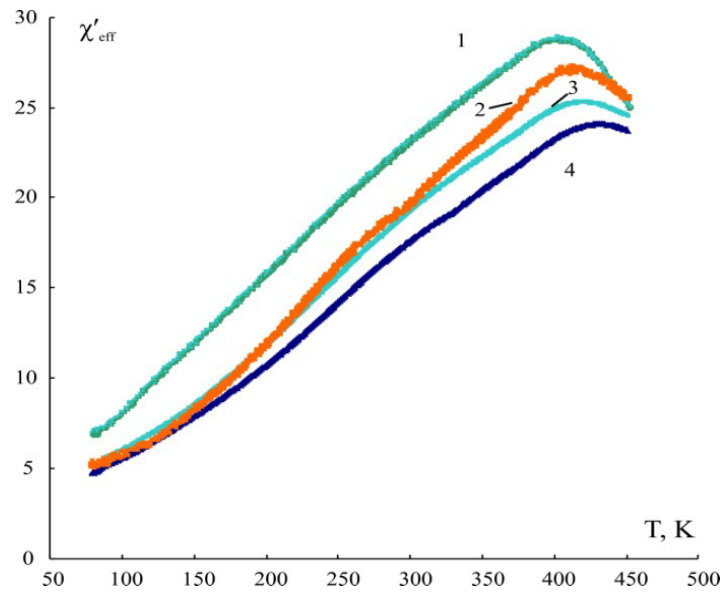
аналізу видно, що підвищення частоти призводить до зміщення максимуму в область більш високих температур. Навпаки, додатковий вплив постійного поля призводить до зниження температури, що відповідає максимальному значенню сприйнятливості (рис. 4.7). Аналогічний характер має температурна залежність магнітної сприйнятливості зразка №3, однак, вона зазнає максимум при більш високих температурах (рис. 4.8, рис. 4.9).

Таким чином, результати проведених досліджень вказують на відсутність зв'язку спостережуваного максимуму температурної сприйнятливості досліджених зразків з температурою затвердіння дисперсійного середовища колоїдної системи. Так, для зразка №1 температура максимуму не збігається з температурою затвердіння зразка, зразки ж №2 і №3 дисперсійного середовища зовсім не мають.



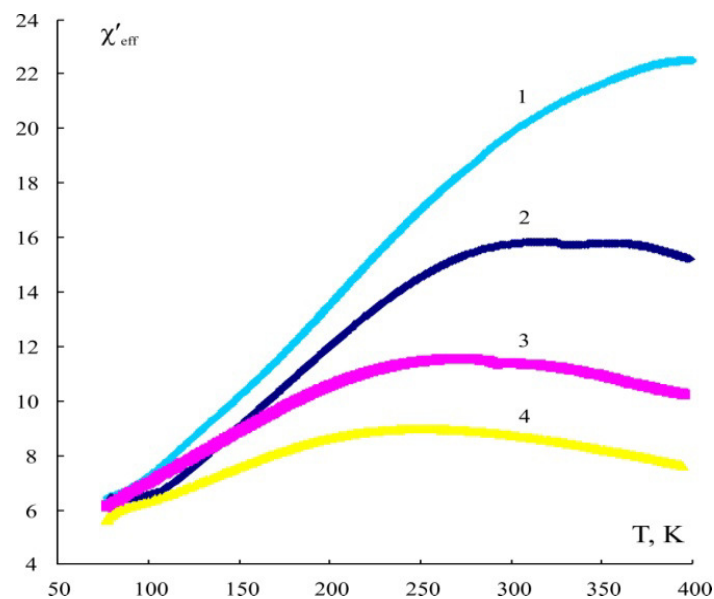
Напруженість МП, кА/м: 1 – 0; 2 – 9,7

Рисунок 4.5 – Залежність магнітної сприйнятливості магнітної рідини № 1 при впливі зовнішнього постійного магнітного поля, паралельного вимірювальному



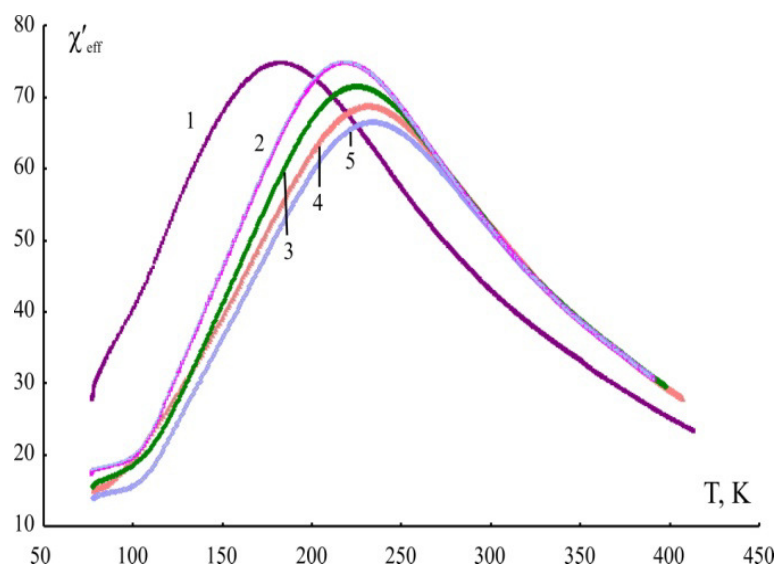
Частота поля, Гц: 1 – 20; 2 – 75; 3 – 1000; 4 - 10000

Рисунок 4.6 – Залежність магнітної сприйнятливості зразка №2 від температури при різних частотах вимірювального поля



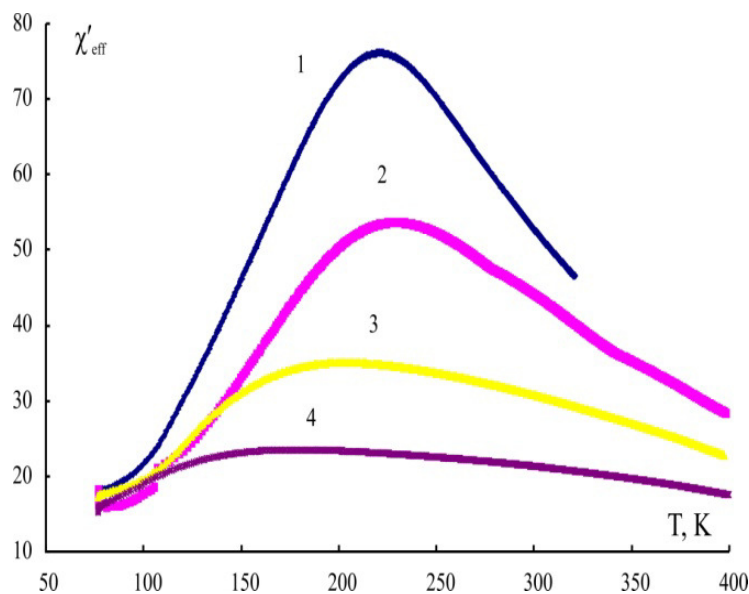
Напруженість МП, кА/м: 1 – 0; 2 – 3,6; 3 – 7,3; 4 – 10,9

Рисунок 4.7 – Залежність магнітної сприйнятливості зразка №2 від температури при впливі зовнішнього постійного магнітного поля, паралельного вимірювальному



Частота поля, Гц: 1 – 40; 2 – 1000; 3 – 2000; 4 – 5000; 5 – 10000

Рисунок 4.8 – Температурна залежність магнітної сприйнятливості магнітної рідини №3 при впливі зовнішнього постійного магнітного поля, паралельного вимірювальному при різних частотах



Величина МП, кА/м: 1 – 0; 2 – 3,6; 3 – 7,3; 4 – 10,9

Рисунок 4.9 – Температурна залежність магнітної сприйнятливості магнітної рідини №1 при впливі зовнішнього постійного магнітного поля, паралельного вимірювальному

Це вказує на неспроможність пояснення спостережуваного максимуму сприйнятливості втратою броунівських орієнтованих ступенів свободи магнітних моментів частинок в досліджених зразках. Дійсно, максимум магнітної сприйнятливості магнітної колоїдної системи може бути пов'язан з блокуванням броунівських ступенів свободи тільки в тому випадку, якщо частинки перестали бути суперпарамагнітними ще при температурі, що відповідає рідкому стану зразка. Наявність подібного максимуму температурної залежності сприйнятливості вже отверділої магнітної рідини може бути пояснено переходом частинок з суперпарамагнітного стану в магнітожорстке. Виявлене зміщення температури максимуму магнітної сприйнятливості від додаткового впливу магнітного поля, а також частоти вимірювального МП може служити підтвердженням цього [271].

Для спостереження переходу системи в суперпарамагнітний стан необхідно, щоб часи релаксації  $\tau$  і вимірювання  $\tau_u$  були близькими по величині. Як відомо [57], час релаксації активаційного перемагнічування визначається виразом:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (4.1)$$

де  $\tau_0 = 10^{-9} - 10^{-10} \text{ c}$ ;

$\Delta E$  – енергетичний бар'єр, який необхідно подолати для повороту моменту частинки по полю при зміні його напрямку.

Величина енергетичного бар'єру визначається виразом:

$$\Delta E = KV - mH + \frac{m^2 H^2}{4KV}, \quad (4.2)$$

де  $K$  – константа магнітокристалічної анізотропії магнетика;

$V$  і  $m$  – об'єм і магнітний момент однодомених часток відповідно,  $\text{nm}^3$  і  $\text{A}\cdot\text{m}^2$ ;

$H$  – напруженість перемагнічуємого поля,  $\text{A}/\text{m}$ .

Як вже було зазначено, обертання магнітних моментів однодомених частинок є термічно активованим під час проведення експерименту, якщо для енергетичного бар'єру виконується умова  $\tau_u = \tau$ . Звідки випливає:

$$\Delta E \leq \ln \frac{\tau_u}{\tau_0} kT. \quad (4.3)$$

Зразок №3 містить більші частки, ніж зразок №2, внаслідок чого енергетичний бар'єр для частинок цього зразка має більш високе значення, в зв'язку з чим, їх перехід в суперпарамагнітний стан повинен відбуватися при більш високій температурі. Цим і пояснюється більш висока для цього зразка температура максимуму магнітної сприйнятливості. З формули (4.3) випливає, що перехід ансамблю частинок в суперпарамагнітний стан при деякій температурі визначається крім інших параметрів (об'єму частинок, величини константи магнітокристалічної анізотропії) і часом вимірювання (в разі змінного поля – періодом його зміни). Очевидно, збільшення частоти вимірювального поля (зменшення часу спостереження  $\tau_u$ ) призводить до блокування напрямку магнітного моменту частки при більш високих температурах, чим і пояснюється зсув максимуму температурної залежності магнітної сприйнятливості при збільшенні частоти вимірювального поля. Слід зазначити, що ситуація для реальних зразків магнітних колоїдних систем ускладнюється внаслідок полідисперсності системи, в результаті чого при підвищенні частоти перехід до стабільності у різних частинок відбувається при різній її величині. Для сильноконцентрованих зразків істотну роль грає диполь-дипольна взаємодія частинок. Очевидно, вона

повинна проявлятися в досліджених порошках однодомених частинок. Врахування взаємодії частинок, як показано в [272], можна здійснити шляхом додавання в формулу для розрахунку енергетичного бар'єру додаткового елемента, який характеризує виникаючий бар'єр за рахунок взаємодії частинок. У такій ситуації, частка може змінити напрямок свого магнітного моменту на протилежний не в полі  $H$ , як це було в невзаємодіючій системі, а в поле  $H + H_{\text{вз}}$  або  $H - H_{\text{вз}}$ , в залежності від того, паралельні вони або антипаралельні. Очевидно, що при додатковому впливі на систему постійним магнітним полем (при збереженні змінного вимірювального поля) ситуація ускладнюється. Однак, так як повний час релаксації визначається сумою:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}, \quad (4.4)$$

де  $\tau_1$  і  $\tau_2$  – часи релаксації при паралельній і антипаралельній орієнтаціях зовнішнього поля по відношенню до поля взаємодії, то додатковий вплив постійним магнітним полем має зменшувати час релаксації. В результаті цього максимум температурної залежності магнітної сприйнятливості системи повинен зміщуватися в область більш низьких температур, що і спостерігається в експерименті.

Таким чином, результати проведених досліджень дозволяють стверджувати про зв'язок спостережуваного максимуму температурної залежності магнітної сприйнятливості досліджених дисперсних систем з переходом однодомених частинок в суперпарамагнітний стан.

Дія електричного поля на магнітні рідини може призводити до розвитку в них процесів структуроутворення і, як наслідок, зміни їх фізичних властивостей. Дійсно, в ряді робіт [273–275] повідомляється про виникнення



періодичних структурних решіток в магнітних рідинах, схильних до дії електричного і магнітного полів, і вплив цього явища на фізичні (оптичні, реологічні) властивості. При цьому дослідження проведені в основному для МР на основі гасу. У магнітних рідинах інших типів вивчення періодичних структур і вплив їх виникнення під дією постійного електричного поля (а також додаткового магнітного поля) на магнітні властивості до теперішнього часу не проводилося. Разом з тим, такі дослідження є актуальними для промислових магнітних рідин, які в процесі їх роботи в різного роду пристроях можуть відчувати дію не тільки магнітних, але й електричних полів. У зв'язку з цим було проведено експериментальне дослідження впливу електричного поля на магнітні властивості МР, синтезованої на поліетілсілоксановій основі, що використовується в техніці як магніторідинне ущільнювальне середовище [276].

Як об'єкт дослідження була використана магнітна рідина з магнетитовими частинками на основі ПЕС-3.

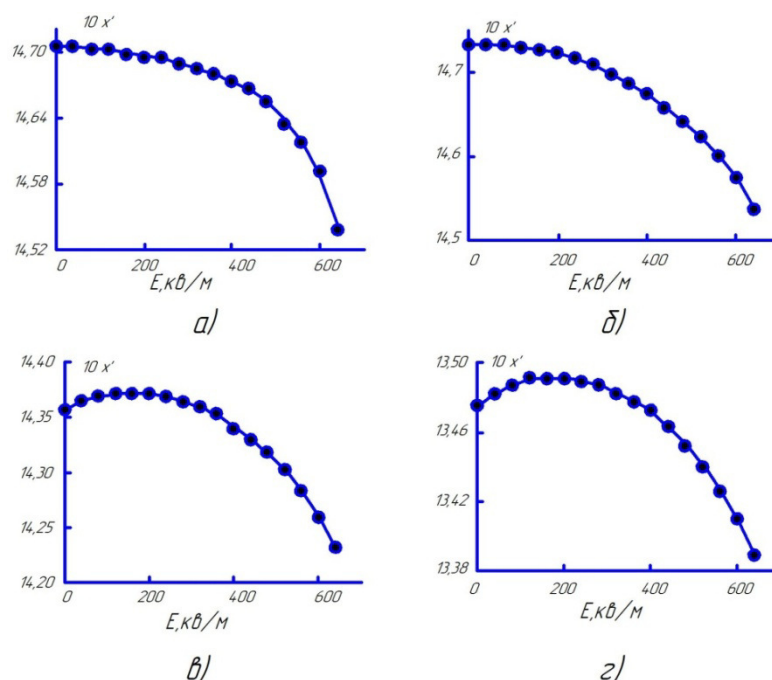
Експериментально отримана залежність ефективної магнітної сприйнятливості дослідженої МР від напруженості електричного поля наведена на рисунку 4.10 а.

Як видно з графіка, магнітна сприйнятливість магнітної рідини при напруженості електричного поля  $E$ , яке не перевищує  $\sim 200$  кВ/м, практично не залежить від величини поля. При подальшому збільшенні електричного поля спочатку незначне зменшення сприйнятливості (в інтервалі 200 кВ/м – 400 кВ/м) переходить до її істотного падіння при досягненні напруженості  $E$  більше 400 кВ/м.

У зовнішньому постійному магнітному полі, яке направлено перпендикулярно електричному і спрямоване зі змінним вимірювальним полем, характер залежності  $\chi'(E)$  істотно змінюється. Так, починаючи з напруженостей зовнішнього магнітного поля  $H = 400$  А/м, на цій залежності з'являється максимум, відносна величина якого збільшується зі зростанням

напруженості магнітного поля (рис. 4.10 в, г).

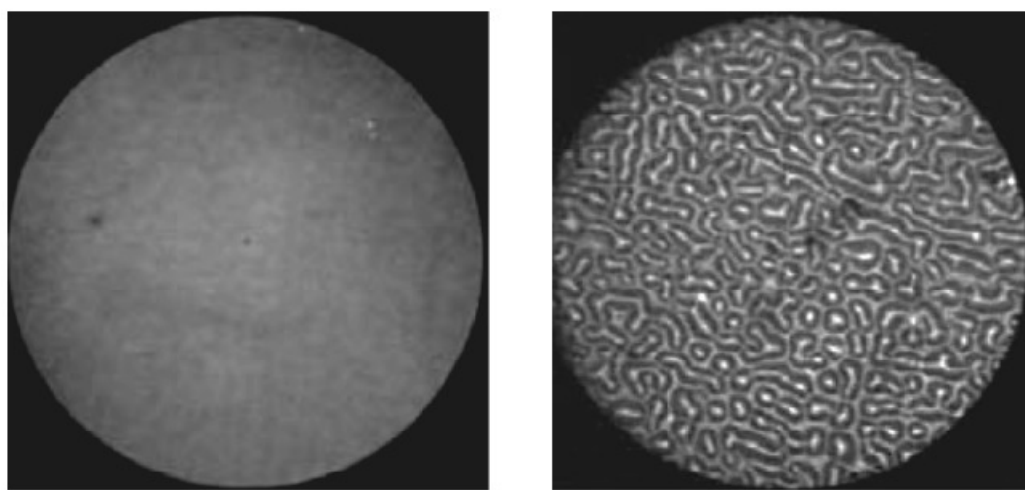
Подібні залежності ефективної магнітної сприйнятливості від напруженості прикладеного електричного поля пов'язані з процесами структуроутворення в досліджуваному середовищі. Як вже було зазначено вище, дія постійного електричного поля, спрямованого перпендикулярно площини шару спочатку однорідної МР на основі гасу, призводить при деякому пороговому значенні напруги на електродах до виникнення структурної решітки [275]. При цьому спочатку в приелектродній області відбувається утворення мікрокрапельних агрегатів, які при подальшому збільшенні напруженості електричного поля трансформуються в лабіринтову решітку. Проведені за допомогою оптичного мікроскопу спостереження показали, що в дослідженому зразку МР на основі поліетілсілоксана при напруженості електричного поля близько 200 кВ/м відбувається утворення лабіринтової структури, причому вона носить пороговий характер (рис. 4.11).



Напруженість МП, кА/м: а) – 0, б) – 160, в) – 400, г) – 800

Рисунок 4.10 - Зміна залежності магнітної сприйнятливості від напруженості електричного поля при додатковій дії магнітного поля

Внаслідок виникнення подібної структури і відбувається зменшення магнітної сприйнятливості МР. Сформована в приелектродному шарі лабіринтова решітка є областю підвищеної концентрації дисперсних частинок, які надходять сюди з основного об'єму МР. Можна припустити, що зменшення магнітної сприйнятливості відбувається в результаті зменшення концентрації частинок магнетиту в основному об'ємі та збільшення ефективного розмагнічуючого фактора  $N$  структури приелектродного шару в напрямку вимірювального поля.



а)

б)

Напруженість електричного поля, кВ/м: а) – 150, б) – 200

Рисунок 4.11 – Структура, що формується в тонкому шарі МР на основі ПЕС-3 під дією постійного електричного поля

Максимум в залежності  $\chi'(E)$ , що виникає при додатковому впливі зовнішнього постійного магнітного поля, обумовлен зміною форми структурних утворень в результаті дії магнітного поля. Ймовірно, його поява взаємозалежна з початковим утворенням в приелектродній області мікрокрапельних агрегатів, які під дією зовнішнього МП витягуються уздовж вимірювального поля, в результаті чого їх розмагнічуючий фактор зменшується. В результаті, магнітна сприйнятливість спочатку збільшується.

Дійсно, як показали спостереження в оптичний мікроскоп, при спільній дії магнітного і електричного полів при деякій напруженості останнього, в тонкому шарі дослідженої МР замість лабіринтової решітки виникає смужкувата структура. Це призводить до збільшення розмагнічуючого фактора агрегатів  $N$ .

Потім відбувається викривлення агрегатів і формування лабіринтової структури, що має виявлятися в ще більшому збільшенні  $N$ .

При досить великій (понад 600 кВ/м) напруженості електричного поля, коли розвиваються електрогідродинамічні течії, ця структура руйнується. Результатом цих процесів і є зменшення сумарної магнітної сприйнятливості магнітної рідини.

Теоретичне обґрунтування експериментально отриманих залежностей  $\chi'(E)$  можна провести, використовуючи вираз для магнітної сприйнятливості двухкомпонентного середовища [58]:

$$\chi_{eff}(E) = \frac{\chi_1 \theta}{1 + N(E) \chi_1} + \chi_2 (1 - \theta), \quad (4.5)$$

де  $\chi_1$  і  $\chi_2$  – магнітні сприйнятливості приелектродного (структурованого) шару і основного об'єму МР відповідно,

$N(E)$  – розмагнічуючий фактор лабіринтової структури,

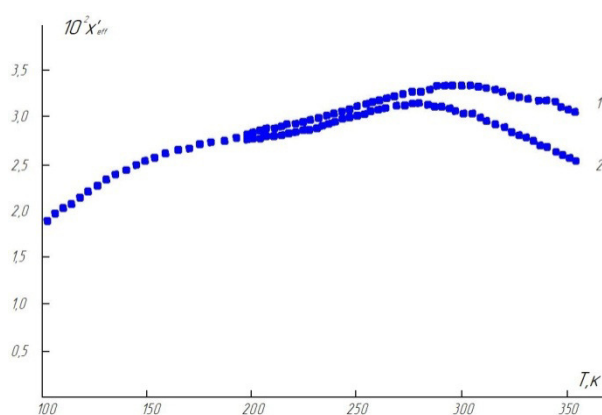
$\theta$  – її об'ємна частка.

Як видно з останнього виразу, при збільшенні розмагнічуючого фактора приелектродного шару відбувається зменшення сумарної магнітної сприйнятливості системи.

Також експериментально була досліджена залежність ефективної сприйнятливості МР від температури зразка при відсутності (крива 1) і включенні постійного електричного поля напруженістю 200 кВ/м (крива 2). Отримані результати наведені на рисунку 4.12.

Як видно з графіка, включення електричного поля призводить до явного зміщення температурного максимуму магнітної сприйнятливості в область більш низьких температур. Очевидно, подібна поведінка температурної залежності ефективної магнітної сприйнятливості від напруженості прикладеного електричного поля пов'язана з описаними вище процесами структуроутворення в досліджуваному середовищі [277].

Таким чином, результати проведених досліджень дозволяють зробити висновок про можливість управління магнітними властивостями магнітних рідин за допомогою додаткового впливу електричним полем.



Напруженість постійного електричного поля, кВ/м: 1 – 0, 2 – 200

Рисунок 4.12 – Залежність магнітної сприйнятливості магнітної рідини на основі ПЕС-3 від температури

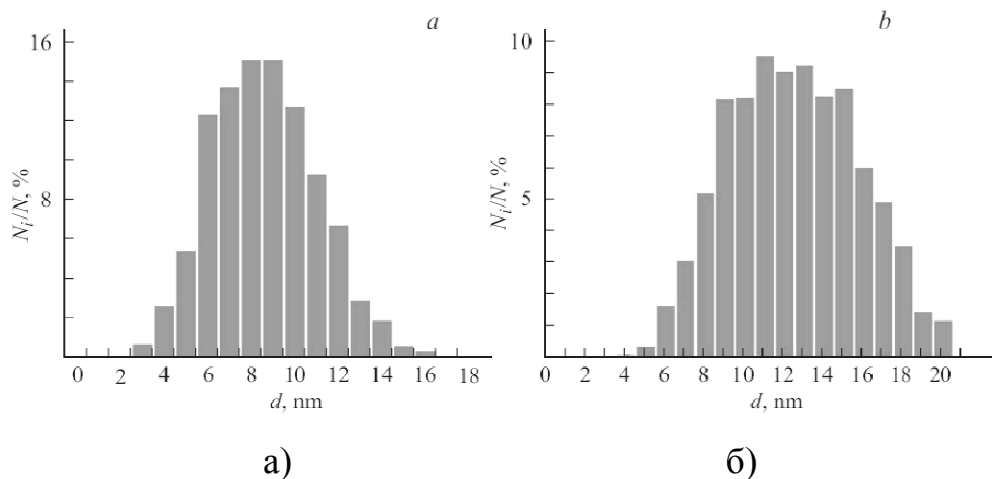
Для більш повного розуміння процесів структуроутворення, які протікають в МР, були необхідні дослідження таких магнітних колоїдних систем, де перехід дисперсійного середовища з рідкого стану в твердий може здійснюватися при кімнатних температурах. Спеціально для цих цілей вперше була розроблена і виготовлена МР на основі парафіну [278, 279].

Як об'єкти дослідження були використані два зразка магнітної рідини з магнетитовими частинками на парафіновій основі, намагніченість насичення

яких становила 80,2 кА/м і 28,0 кА/м. Зразок №1 був отриманий за стандартною методикою шляхом хімічного осадження магнетиту з солей заліза, як стабілізатор використовувалася олеїнова кислота. Зразок №2 був виготовлений шляхом змішування розплаву парафіну з пастою з частинок магнетиту, отриманої випарюванням носія з магнітної рідини на основі гасу з олеїновою кислотою в якості стабілізатора з високою (> 25 %) концентрацією дисперсних частинок.

Гранулометричний склад зразків визначався за результатами просвічуючій електронній мікроскопії, виконаної компанією «Системи мікроскопії та аналізу» (Сколково, Росія) на мікроскопі FEI Tecnai G2 F20 S-Twin TMR. Для отримання зразка для вимірювань магнітна рідина на парафіновій основі осаджувалася в градієнтному магнітному полі гарячим толуолом. При цьому магнітна фаза відокремлювалася від носія – парафіну. Розподіл дисперсних частинок за розмірами представлено на рисунку 4.13. Для магнетитових частинок відомо, що якщо їх розмір не перевищує величину в 50 нм, то вони знаходяться в однодоменому стані. Таким чином, обидва зразки являють собою ансамблі однодомених магнетитових частинок.

На рисунку 4.14 наведено температурну залежність магнітної сприйнятливості зразка №1 на основі парафіну (крива 2). Як видно з рисунка, спочатку, під час збільшення температури, спостерігається зростання магнітної сприйнятливості, що, однак, сповільнюється з виходом на плато при температурах близьких до 273 К, на якому в інтервалі температур 273 К–323 К простежується слабо виражений пологий максимум. За температури, що відповідає переходу зразка з твердого стану в рідкий (323 К), спостерігається невеликий гострий максимум, а потім різке зменшення магнітної сприйнятливості. Такий же характер, але з більш вираженими



а) – зразок № 1, б) – зразок № 2

Рисунок 4.13 – Гістограма розподілу дисперсних частинок за розмірами

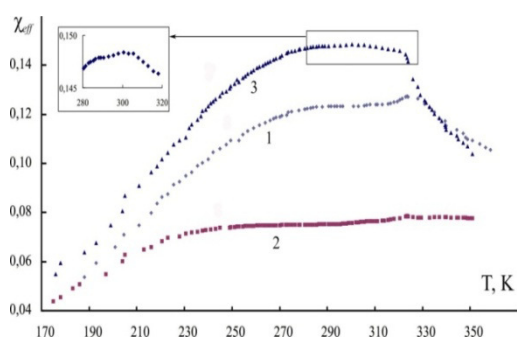
максимумами, має і крива температурної залежності магнітної сприйнятливості зразка №2, (рис. 4.14 б, крива 1).

Досліджена магнітна сприйнятливість одного із зразків (№1) після затвердіння його розплаву в магнітному полі. Для цього кювету з розплавленим зразком поміщали в соленоїд, який створював магнітне поле напруженістю 24,8 кА/м і витримували в ньому при кімнатній температурі до переходу в твердий стан. Після цього кювета із зразком віддалялася з поля, охолоджувалася до температури 77 К і поверталася в вимірювальну систему, за допомогою якої проводилися дослідження температурної залежності магнітної сприйнятливості. Виявилося, що в цьому випадку сприйнятливості такої магнітної рідини значно збільшується ( $\approx 20\%$ ) при збереженні характеру її температурної залежності, при цьому, температура, відповідна максимальному значенню сприйнятливості, залишається трохи нижче температури плавлення (рис. 4.14 а, крива 3). Очевидно, після затвердіння такої магнітної рідини в магнітному полі, в ній зберігається структурна анізотропія після виключення поля, яка обумовлює анізотропію магнітної сприйнятливості зразка.

Проведені дослідження можливості виникнення залишкової намагніченості в зразку, затверділому в магнітному полі, виявили, що в таких зразках дійсно, виявляється залишкова намагніченість, величина якої релаксує до постійної величини протягом деякого часу.

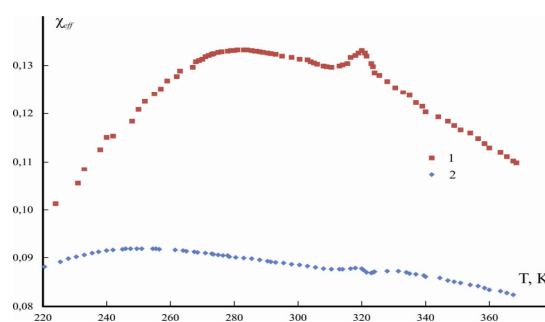
На рисунку 4.15 представлена залежність залишкової намагніченості досліджуваного зразка, охолодженого до температури нижче точки плавлення (293 К) в магнітному полі напруженістю 28,7 кА/м, отримана за допомогою балістичного методу (крапки).

Дослідження пасти з частинок магнетиту, диспергуванням якої в розплавленому парафіні був отриман описаний вище зразок показало, що температурна залежність її магнітної сприйнятливості також зазнає максимум близько температури 273 К (рис. 4.16, крива 1), який істотно зміщується в область більш низьких температур при впливі постійного магнітного поля (крива 2). Було також встановлено, що збільшення частоти вимірювального поля, призводить до зміщення максимуму в область більш високих температур [189, 271].



а)

а) – зразок №1



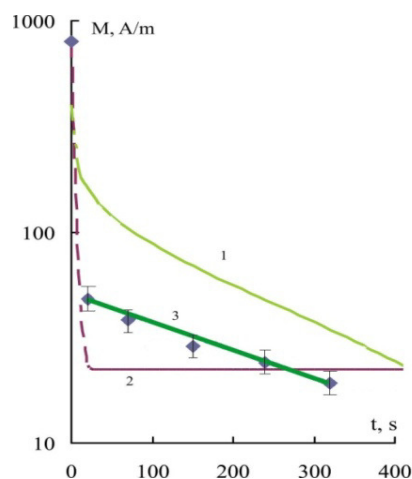
б)

б) – зразок №2

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

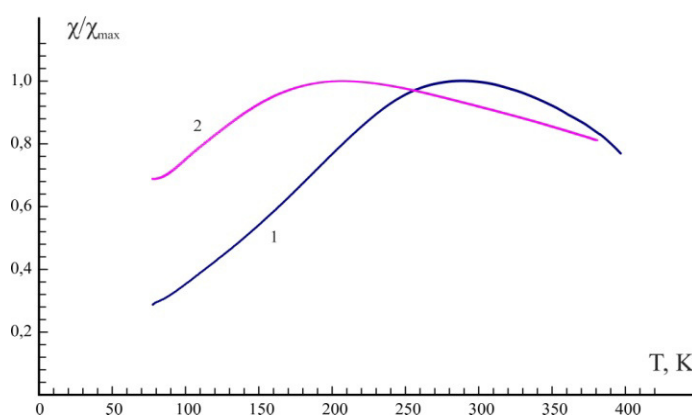
Рисунок 4.14 – Залежність магнітної сприйнятливості зразків від температури





1 – степенева функція; 2 – експоненціальна; 3 – експоненціальна, без урахування першої точки (експериментально отримана залежність)

Рисунок 4.15 – Релаксація залишкової намагніченості зразка №1 при кімнатній температурі



1 – без МП, 2 – постійне підмагнічення МП

Рисунок 4.16 – Залежність магнітної сприйнятливості пасти з магнетитових часток від температури

Аналіз отриманих температурних залежностей магнітної сприйнятливості дослідженого зразка дозволяє стверджувати, що її особливості дійсно можуть бути пов'язані з затвердінням основи і блокуванням броунівських ступенів свободи магнітожорстких частинок. Про це може свідчити гострий екстремум на температурній залежності магнітної

сприйнятливості, що спостерігається при температурі, відповідній температурі плавлення дисперсійного середовища (парафіну). Разом з тим, слід зазначити наявність ще одного, більш пологого максимуму при температурах нижче плавлення парафіну, який зміщується при додатковому діянні постійного магнітного поля в область більш низьких температур. Особливо чітко це простежується для зразка №2 (рис. 4.14). Температурна залежність пасти з частинок магнетиту також зазнає максимум, який не може бути пов'язаний з затвердінням дисперсійного середовища внаслідок її відсутності. Можна припустити, що гострий максимум температурної залежності магнітної сприйнятливості, що спостерігається при температурі плавлення парафіну, дійсно пов'язаний з блокуванням броунівських ступенів свободи частини найбільш великих часток магнетиту, магнітний момент яких жорстко пов'язаний з твердою матрицею. Наявність основного пологого максимуму, відповідного твердому стану зразка, може бути пояснено переходом більшої частини більш дрібних частинок при підвищенні температури в суперпарамагнітний стан, релаксація магнітного моменту частинок при якому визначається неелевським механізмом. При цьому, «розмитість» максимуму пов'язана з розподілом частинок за розмірами і, як наслідок, з розподілом часів релаксації в деякому інтервалі часу.

Відзначимо, що результати проведених досліджень дозволяють зробити висновок про необхідність врахування можливості зміни механізмів релаксації магнітного моменту однодоменних частинок магнітних колоїдів при зміні температури, концентрації частинок, впливу магнітного поля і зміні частоти вимірювального поля [280].

У перший момент часу після виключення поля відбувається разорієнтація моментів досить дрібних частинок, в результаті чого спостерігається стрибкоподібне зменшення намагніченості системи. В подальшому, в зміну намагніченості починають вносити внесок більш великі частки, для яких часи релаксації моментів порівнянні з часом спостереження.

Очевидно, саме цю ситуацію відображає отриманий експериментально відрізок наведеної вище на рисунку 4.15 експериментальної залежності  $M_r(t)$ , початок якого відповідає другій експериментальній точці (перша точка відповідає намагніченості зразка в доданому полі, напруженістю  $H = 27$  кА/м). Таким чином, можна зробити висновок, що наявність залишкової намагніченості досліджуваної магнітної рідини на основі парафіну можна віднести до магнітної післядії в дрібних частинках, які обумовлюють процеси магнітної в'язкості.

Результати дослідження температурної залежності магнітної сприйнятливості висококонцентрованої пасти магнітної рідини, в якій виключені броунівські ступеня свободи частинок у всьому досліджуваному температурному інтервалі, дозволяють також зв'язати спостережувані максимуми їх температурної залежності магнітної сприйнятливості з переходом в суперпарамагнітний стан. Підтвердженням цього можуть служити факти зміщення максимуму в область більш низьких температур при додатковому прикладенні постійного магнітного поля  $i$ , навпаки, в область більш високих температур при збільшенні частоти вимірювального поля.

Виявлена анізотропія магнітної сприйнятливості відтверджених в магнітному полі зразків обумовлена структурною анізотропією, що сформувалася під впливом зовнішнього постійного поля завдяки наявності фракції найбільш великих часток. Структурна анізотропія може вносити певний внесок і в залишкову намагніченість такої системи. Це пов'язано з тим, що при об'єднанні частинок в структурні утворення відбувається зменшення відстані між окремими частинками, а отже, збільшення енергії їх взаємодії. У свою чергу, як вже було зазначено вище, це призводить до збільшення енергетичного бар'єру, в результаті чого частка може набути стабільності, тобто стати магнітожорсткою і підвищити залишкову намагніченість отверділого досліджуваного середовища [281].

## 4.2 Експериментальне дослідження седиментаційної стійкості магнітної рідини різних років виробництва

Фраза «магнітна рідина – це колоїдний розчин зі стійкістю дисперсних частинок, вимірюваною роками» присутня в тому чи іншому формулюванні в будь-якій з нині виданих монографій, присвячених магнітним рідинам. У той же час кількість років, при яких ця стійкість зберігається, як правило, не вказується і не коментується.

Однак останні тенденції експлуатації технологічного обладнання свідчать про те, що промислові підприємства мають потребу в МР, що зберігають стабільними свої властивості протягом не менше 10–15 років [69, 279, 282]. Це пов'язано зі збільшенням міжремонтного пробігу обладнання (термін – не менше 3 років), малою кількістю МР, з одного боку, і складністю розрахувати точну кількість МР для дозаправки, з іншого боку. Від якості МР залежить рівень техногенної безпеки обладнання. Крім того, «екзотичність» самого матеріалу, що змушує комерційні служби закуповувати МР з великим запасом. Тому було вивчено зміну властивостей МР в залежності від часу виготовлення.

В якості зразків для дослідження були обрані магнітні рідини на основі вакуумного масла VM-3, кремнійорганікі ПЕС-3 і гліцерину виробництва 2018 р. Крім того, досліджувалися зразки магнітної рідини на VM-3, виготовлені в 2002 і 2008 роках, і для дослідження колоїду з більш великими частками спеціально розглядався зразок на VM-3, який не піддавався центрифугуванню.

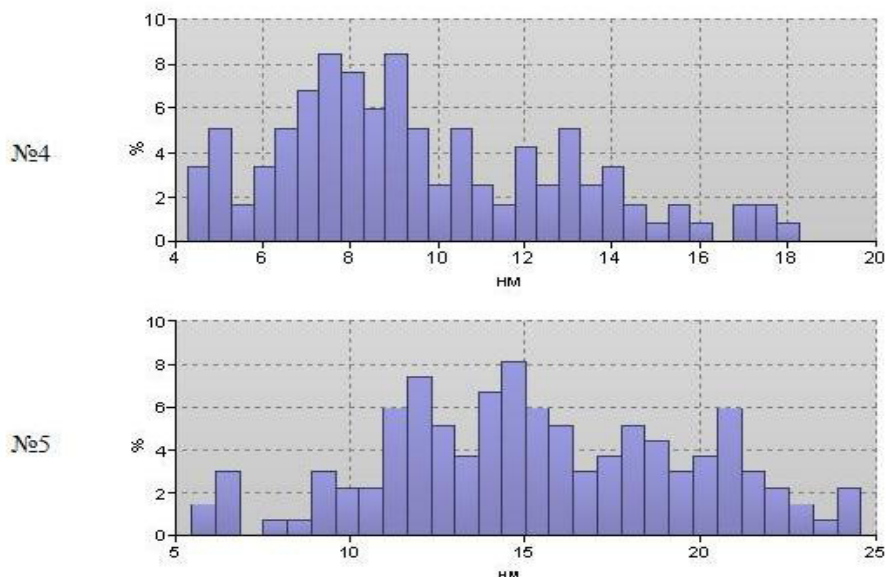
Найбільш ефективним експериментальним способом вивчення розподілу часток за розмірами є застосування електронної мікроскопії. Дослідження зразків магнітної рідини були проведені на просвічуючому електронному мікроскопі (ПЕС) з високою розрізнявальною здатністю Теспаі

G2 F205-TWIN компанією «Системи мікроскопії та аналізу» (Сколково, Росія) (рис. 2.4, рис. 2.5).

З них видно, що середній розмір частинок в межах похибки однаковий. Такий же розподіл часток було отримано і для МР на основі поліетілсілоксана ПЕС-3.

На рисунку 4.17 наведені гістограми для магнітних рідин на основі вакуумного масла (зразок 4 – МР виробництва 2002 р., зразок 5 – МР з частковим центрифугуванням виробництва 2018 р.).

З розгляду рисунка 4.17 видно, що розподіл частинок у зразка 4 більш ніж за десятирічний термін зберігання практично не змінився. Середній розмір частинок в межах похибки вимірювання аналогічний раніше розглянутим зразкам. Необхідно відзначити, що кількість великих частинок (діаметром від 14 нм і вище) значно збільшилася, тобто за рахунок перебігу процесів коагуляції стійкість знижується [183, 184].



Зразок №4 – МР виробництва 2002р; зразок №5 – МР з частковим центригуванням

Рисунок 4.17 – Гістограма розподілу наночастинок магнітної рідини на основі вакуумного масла

Однак тільки на основі результатів досліджень на електронному мікроскопі висновок про працездатність МР зробити не можливо. Для відносно слабких магнітних полів такий розподіл часток може мати і позитивний бік, так як основний внесок в намагніченість насичення рідини вносять саме великі частки внаслідок їх великого магнітного моменту.

Результати дослідження зразка, який не пройшов повне центрифугування, підтвердили наявний в НВВП «Ферогідродинаміка» досвід, що такі рідини зберігають свою стійкість протягом максимум тижня в різконеоднорідних сильних МП [283–285]. Необхідно відзначити, що навіть частки з максимальним розміром (24,6 нм) зберігають однодоменну структуру. Якщо цю рідину однозначно не можна застосовувати в зазорі МРГ, то для інших магніторідинних пристроїв це може бути досить прийнятним варіантом.

Як параметри для дослідження були також обрані магнітні властивості цих середовищ, а саме магнітна сприйнятливність, її дисперсія в частотному діапазоні 12 – 10000 Гц, основна крива намагнічування.

Результати досліджень представлені в таблиці 4.1. Очевидно, що в межах похибки магнітні властивості вивчених середовищ не зазнають змін, що свідчить про їх високу якість. Спостереження досліджених рідин в оптичний мікроскоп дозволило встановити, що навколишнє середовище є однорідним і не містить включень.

Таблиця 4.1 – Намагніченість насичення і магнітна сприйнятливність магнітних рідин на основі ВМ-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 для перших трьох зразків МР на ПЕС-3, гліцерині і ВМ-3 (рис. 4.18 – 4.20) мають класичний характер без зламів, екстремумів тощо. Це в цілому свідчить, що дані МР досить високої якості і можуть бути рекомендовані для застосування в магніторідинних герметизаторах.

До таких же висновків можна прийти після розгляду кривої намагнічування для зразка 4. Дана рідина після дванадцятирічного зберігання була процентрифугована, і, як видно з рисунка 4.21, криві намагнічування збіглися. Зразок 5 відрізняється досить високою намагніченістю. При цьому крива намагнічування не має гістерезисного характеру, що говорить про

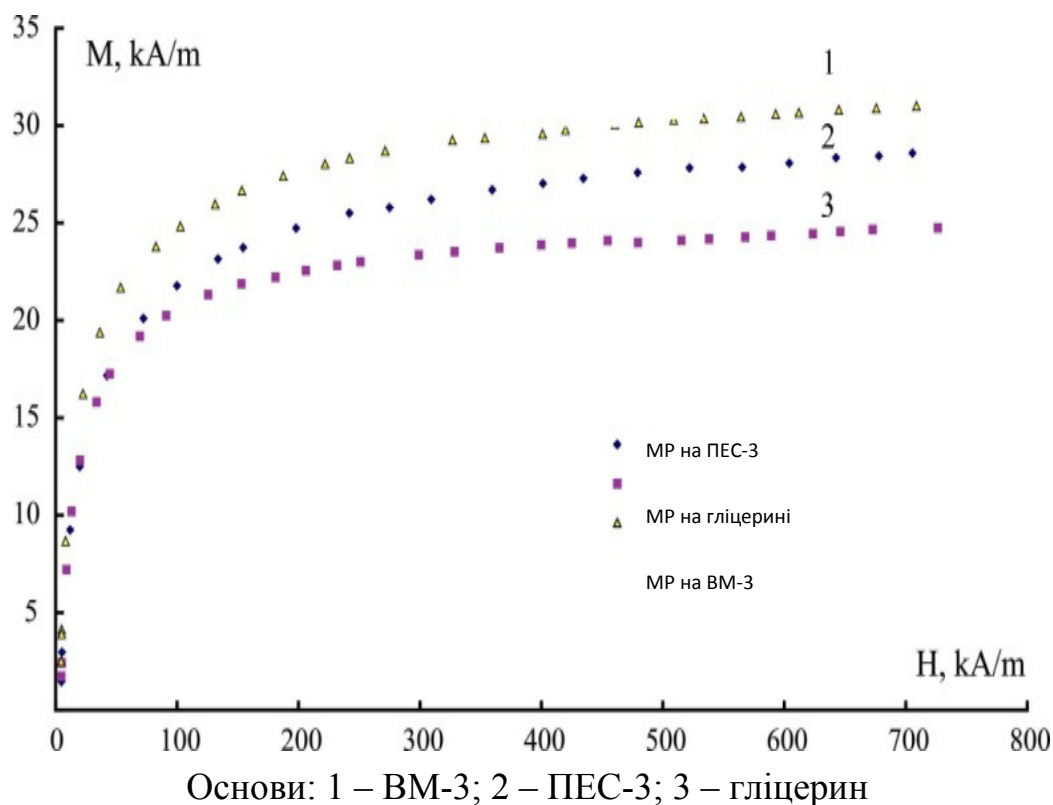
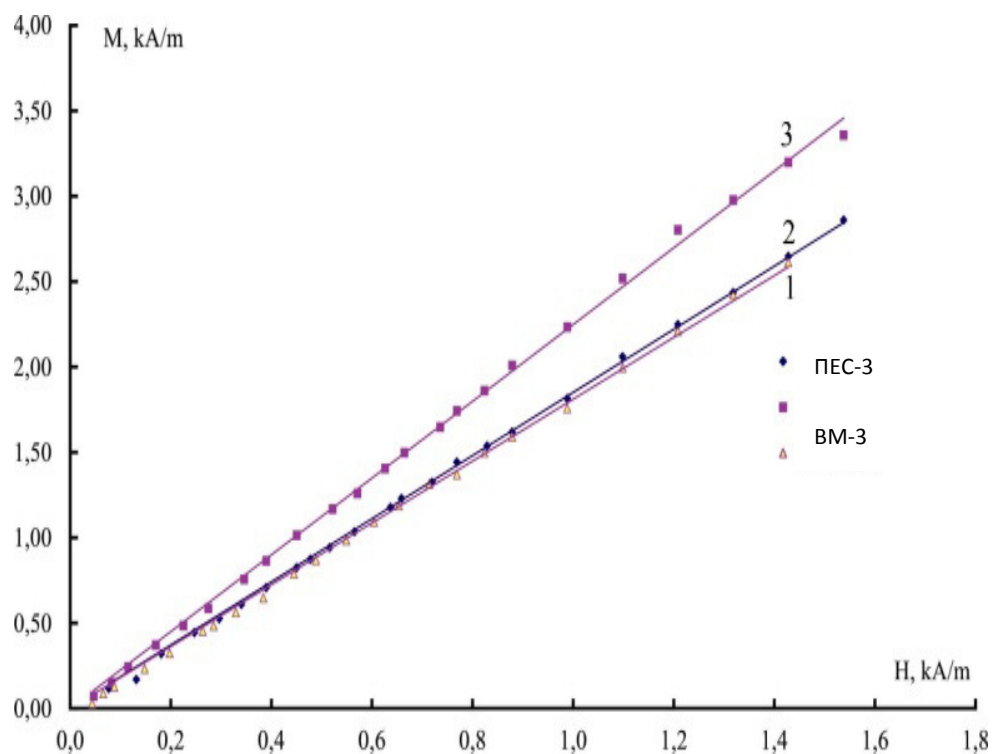
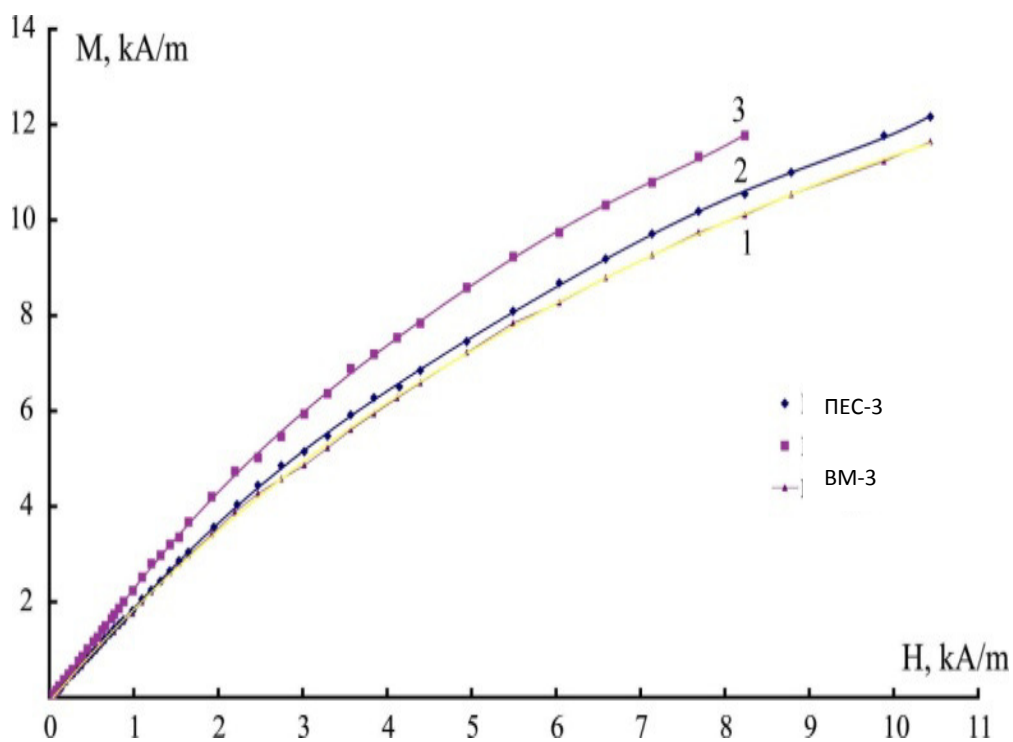


Рисунок 4.18 – Крива намагнічування магнітних рідин



Основи: 1 – VM-3; 2 – ПЕС-3; 3 – глицерин

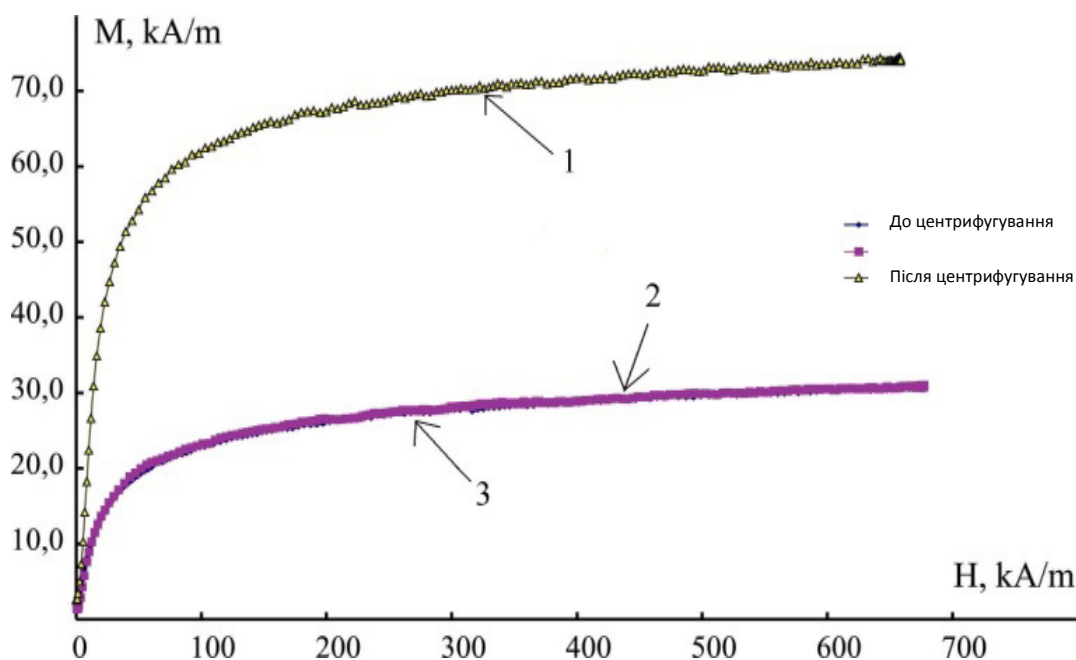
Рисунок 4.19 – Лінійний відрізок кривих намагнічування магнітних рідин



Основи: 1 – VM-3; 2 – ПЕС-3; 3 – глицерин

Рисунок 4.20 – Початковий відрізок кривих намагнічування магнітних рідин





1 – осад від центрифугування; 2 – рідина до центрифугування;  
3 – рідина після центрифугування

Рисунок 4.21 – Криві намагнічування магнітної рідини на основі VM-3

відсутність залишкової намагніченості і намагнічених агрегатів. Однак, виходячи з середнього розміру частинок можна констатувати, що в даній рідині відбулося утворення ланцюгових структур з пов'язаних між собою дипольних частинок і ймовірність розшарування такої рідини в сильних магнітних полях досить висока.

### 4.3 Дослідження структуроутворення в магнітних рідинах магнітогранулометричним і кластерним аналізом

Ступінь неоднорідності магнітної рідини в рівноважному стані визначається балансом між магнітофорезом, седиментацією і градієнтною дифузією частинок і залежить від об'ємної кількості частинок, їх розміру і конкуруючих міжчасткових взаємодій [286]. Найбільш важливу роль в зменшенні просторової неоднорідності концентрованих розчинів грають стеричні взаємодії між захисними оболонками (ефекти виключеного об'єму).

За рахунок збільшення об'ємної частки  $\varphi$  частинок в колоїдному розчині коефіцієнт сегрегації можна зменшити на три – чотири порядки [287]. Однак можливості такого прийому обмежені зростанням в'язкості. Іншим важливим фактором, який сильно впливає на розшарування магнітної рідини в зовнішньому силовому полі, є присутність багаточасткових агрегатів (кластерів), що утворюються за рахунок ван-дер-ваальсових взаємодій. Такі агрегати здатні збільшити неоднорідність магнітної рідини в градієнтному полі приблизно на два порядки [278]. Вплив магнітодіпольних міжчастинкових взаємодій на просторовий розподіл часток менш істотний. Він спостерігається тільки при великих значеннях параметра магнітодіпольних взаємодій  $\lambda = \mu_0 m^2 / (4\pi d^3 kT)$ , не типових для технічних магнітних рідин: тут  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $d$  – гідродинамічний діаметр частинки, який включає подвоєну товщину захисної оболонки, нм.

Що стосується одиночних частинок, то сила, діюча з боку магнітного поля на таку частку, пропорційна її магнітному моменту  $m$ , тобто кубу діаметру  $x$  магнітного ядра [181]:

$$\mathbf{f} = \mu_0 (\mathbf{m} \nabla) \mathbf{H}, \quad m = \pi M_s x^3 / 6, \quad (4.6)$$

де  $M_s = 480$  кА/м – намагніченість насичення магнетиту.

З виразу (4.6) видно, що при заданій конфігурації магнітного поля єдиним способом зменшення сили, що викликає магнітофорез, є зменшення магнітного ядра частинки. Додатковий позитивний ефект при цьому полягає в ослабленні (при фіксованій товщині захисних оболонок) ван-дер-ваальсових міжчасткових взаємодій і зменшенні концентрації агрегатів. Очевидним небажаним ефектом буде зменшення загальної концентрації магнітної фази і, відповідно, намагніченості насичення розчину.

**4.3.1 Магнітогранулометричний аналіз.** Об'єктом досліджень служила магнітна рідина на основі колоїдного магнетиту і вакуумного масла ВМ-3 з намагніченістю насичення  $M_0 = 25,5$  кА/м і ефективною в'язкістю  $\eta = 61$  сПз при температурі  $21,5$  °С. Як стабілізатор використовувалася олеїнова кислота. Магнітні моменти частинок і розподіл частинок за діаметрами магнітного ядра визначалися в процесі обробки експериментально отриманої кривої намагнічування [282, 288]. Джерелом однорідного магнітного поля служив довгий охолоджуваний соленоїд. Намагніченість розчину визначалася методом диференціальної прогонки, при якому безпосередньо вимірюється диференціальна магнітна сприйнятливність рідини, а крива намагнічування знаходиться чисельним інтегруванням:

$$M(H) = \int_0^H \chi(H) dH, \quad (4.7)$$

де  $H$  – напруженість магнітного поля всередині рідини, А/м. Диференціальна магнітна сприйнятливність вимірювалася на частоті  $0,1$  Гц, досить низькою, щоб знехтувати релаксаційними процесами.

Дисперсний склад частинок апроксимувався гамма-розподілом, який добре зарекомендував себе і багаторазово використовувався раніше при аналізі магнетитових колоїдів [104, 107]:

$$f(x) = \frac{x^\alpha \exp(-x/x_0)}{x_0^{\alpha+1} \Gamma(\alpha+1)}, \quad (4.8)$$

де  $x$  – діаметр магнітного ядра колоїдної частинки, нм;

$\Gamma(x)$  – гамма-функція;

$x_0, \alpha$  – параметри розподілу, що підлягають визначенню з експериментальної кривої намагнічування.

Для сферичних частинок, що підкоряються розподілу (4.8), момент  $x$  довільного порядку  $q$  дорівнює:

$$\langle x^q \rangle = \int_0^{\infty} x^q f(x) dx = x_0^q \prod_{k=1}^q (\alpha + k). \quad (4.9)$$

Тому середній діаметр магнітного ядра частинки і відносна ширина розподілу рівні, відповідно:

$$\langle x \rangle = x_0(\alpha + 1), \quad \delta_x = 1/\sqrt{\alpha + 1}. \quad (4.10)$$

Кутові дужки в (4.9, 4.10) означають усереднення по ансамблю частинок різного діаметра.

У даній роботі використовувався варіант магнітогранулометричного аналізу, при якому розрахунок параметрів розподілу проводиться за початковим відрізком кривої намагнічування і асимптотиці намагніченості в сильних полях. В слабких магнітних полях намагніченість пропорційна напруженості магнітного поля, і початкова сприйнятливість з хорошою точністю визначається в широкому діапазоні параметрів за формулою [104, 107, 181]:

$$\chi = \chi_L \left( 1 + \frac{\chi_L}{3} + \frac{\chi_L^2}{144} \right), \quad \chi_L = \frac{\mu_0 \langle m^2 \rangle n}{3kT}, \quad (4.11)$$

де  $\chi_L$  – ланжевенівська сприйнятливість, тобто сприйнятливість, обчислена без урахування міжчастинкових взаємодій.

У сильних магнітних полях ( $\xi \gg 1$ ) межчастинкові взаємодії відносно слабо впливають на рівноважну намагніченість, що дозволяє записати

асимптотику кривої в рамках найпростішої моделі ефективного поля Вейсса, найбільш зручній для обробки експериментальних результатів, в цьому випадку [107, 289]:

$$M(H) = M_0 - \frac{nkT}{\mu_0(H + M/3)} = M_0 - nkTz, \quad (4.12)$$

де  $M_0 = \langle m \rangle n$  – намагніченість насичення розчину, А/м;

$n$  – числова щільність частинок;

$z = [\mu_0(H + M/3)]^{-1}$  – нова змінна.

Експериментальні дані, відповідні сильним магнітним полям та побудовані в координатах  $M$ ,  $z$ , дозволяють визначити намагніченість насичення  $M_0$  розчину, як точку перетину кривої  $M(z)$  з віссю ординат, а також розрахувати числову щільність частинок  $n$  і середній магнітний момент  $\langle m \rangle$  частинок з простих співвідношень

$$M_0 = \langle m \rangle n, \quad nkT = -\Delta M / \Delta z. \quad (4.13)$$

Підстановка знайденого з (4.13) значення  $n$  в праву частину формули (4.10) дозволяє знайти середній квадрат магнітного моменту  $\langle m^2 \rangle$ , дисперсію  $D_m$  і відносну ширину розподілу часток по магнітним моментам  $\delta_m$ :

$$D_m = \langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2, \quad \delta_m = \sqrt{\left( \frac{\langle m^2 \rangle}{\langle m \rangle^2} - 1 \right)} \quad (4.14)$$

При виведенні формул (4.10) – (4.13) ніяких припущень про розподіл частинок за розмірами не робиться. У цьому сенсі формули (4.10) – (4.13) універсальні.

Для сферичних частинок параметри розподілу (4.6) рівнозначно пов'язані із середнім магнітним моментом  $\langle m \rangle$  і квадратом моменту  $\langle m^2 \rangle$ :

$$\langle m \rangle = \frac{\pi \langle x^3 \rangle}{6} M_s = \frac{\pi M_s}{6} x_0^3 (\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3), \quad (4.15)$$

$$\langle m^2 \rangle = \left( \frac{\pi M_s}{6} \right)^2 \langle x^6 \rangle = \left( \frac{\pi M_s}{6} \right)^2 x_0^6 (\alpha+1)(\alpha+2)\dots(\alpha+6). \quad (4.16)$$

Система рівнянь (4.15), (4.16) дозволяє знайти шукані параметри  $\Gamma$ -розподілу (4.7). Зокрема, виключаючи з цієї системи параметр  $x_0$ , отримаємо рівняння для  $\alpha$ :

$$\frac{\langle m^2 \rangle}{\langle m \rangle^2} = \frac{(\alpha+4)(\alpha+5)(\alpha+6)}{(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3)}. \quad (4.17)$$

Середній діаметр магнітного ядра частинки і відносна ширина розподілу знаходяться після цього з рівнянь (4.10).

Крива намагнічування і її асимптотика в сильних полях наведені на рисунку 4.22. Штриховими лініями на рисунках позначені лінійний відрізок кривої намагнічування в слабких полях (рис. 4.22 а) і лінійний відрізок в координатах  $(Z, M)$ , відповідний сильним полям [290].

Детальний аналіз кривої намагнічування і рішення системи рівнянь (4.11) – (4.16) приводить до таких параметрів досліджуваної магнітної рідини при температурі 294,7 К [291]:

- намагніченість насичення становить 25,5 кА/м;
- початкова сприйнятливості дорівнює 1,005;
- середній магнітний момент частинки  $\langle m \rangle$  становить  $1,23 \cdot 10^{-19}$  А·м<sup>2</sup>;

- середній діаметр магнітного ядра  $\langle x \rangle$  дорівнює 7,05 нм;
- відносна ширина розподілу часток за розмірами  $\delta_x$  становить 0,35.

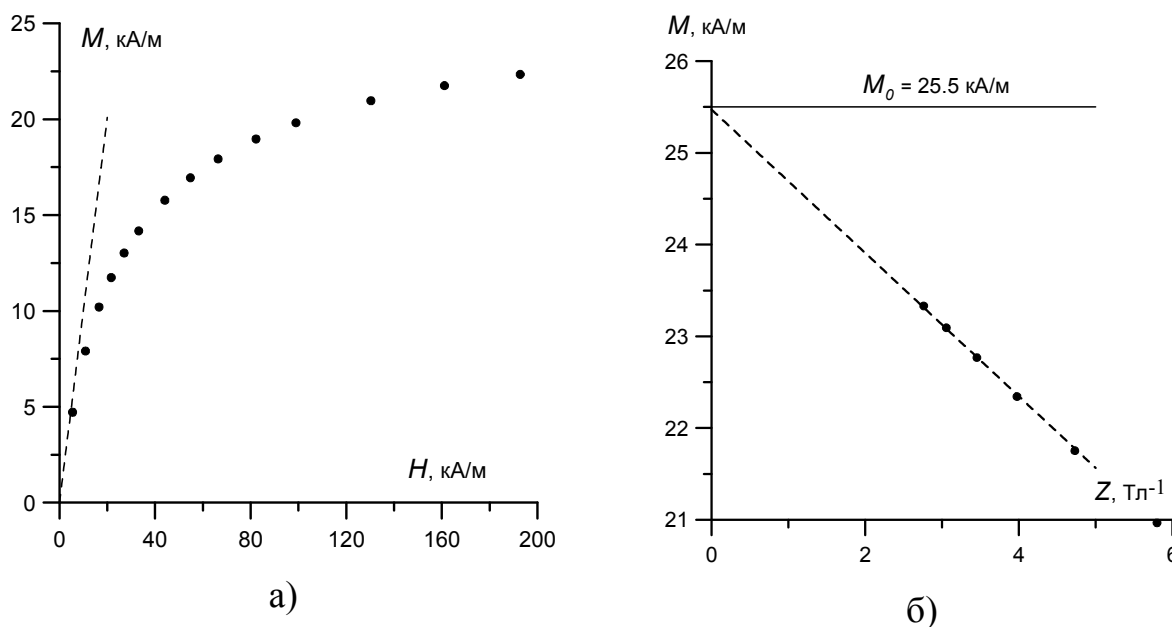


Рисунок 4.22 – Крива намагнічування (а) і її асимптотика в сильних полях (б)

Аналіз отриманих магнітогранулометричним аналізом результатів показує, що якісних відмінностей досліджуваної магнітної рідини від досліджених раніше рідин типу «магнетит-рідкий вуглеводень-олеїнова кислота» не виявлено. Однак кількісні відмінності істотні. Магнітний момент частинок мінімум в два рази менше, ніж у раніше досліджених рідин [64, 66, 292]. Вдалося домогтися і низького середнього діаметра одиночної частинки. Цей діаметр був також підтверджений дослідженнями на просвічуємому електронному мікроскопі з високою розривлювальною здатністю Теспаі G2F205 – TWIN [183].

**4.3.2 Кластерний аналіз.** Для визначення середнього діаметра кластерів і їх внеску в початкову сприйнятливість використовувався метод, докладно описаний в [293] і заснований на розкладанні магнітної динамічної

сприйнятливості в ряд по функціям Дебая. Агрегатом або кластером в даній роботі вважається будь-яка група частинок з некомпенсованим магнітним моментом, яка обертається як незалежна кінетична одиниця під дією слабого магнітного поля. Кластери, що складаються з суперпарамагнітних частинок з неелевським механізмом релаксації і створені за рахунок молекулярних взаємодій, не можуть бути виявлені таким способом і випадають з розгляду. В умовах проведених експериментів до розряду неелевських частинок відносилися дрібні частинки з часом релаксації менш  $10^{-6}$  с. Внесок неелевських частинок в магнітну сприйнятливість на частотах до 100 кГц можна було вважати незалежним від частоти [291].

Дійсна  $\chi'$  і уявна  $\chi''$  частини динамічної сприйнятливості вимірювалися на частоті до 100 кГц.

Частотні залежності  $\chi'(\omega)$  і  $\chi''(\omega)$  розкладалися в ряд по функціям Дебая з дискретним набором часів  $\tau_i$  релаксації магнітних моментів для  $N$  фракцій:

$$\chi_1(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2}, \quad \chi_2(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i \omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2}. \quad (4.18)$$

Діапазон частот в три – чотири порядки перекривався за рахунок рівномірного в логарифмічному масштабі вибору часів  $\tau_i$ . Спектральні амплітуди  $A_i$ , представляли собою внески відповідних фракцій у рівноважну сприйнятливість і визначалися як рішення системи рівнянь (4.18) з відомими з експерименту лівими частинами для частот  $\omega_i = 1/\tau_i$ . Середній по фракції діаметр  $d_i$  частинок або агрегатів визначався за відомою залежністю броунівського часу релаксації від об'єму частинки [294]:

$$\tau_i = \frac{3\eta}{kT} \cdot \frac{\pi d_i^3}{6}, \quad (4.19)$$

де  $\eta$  – в'язкість магнітної рідини, Па·с.

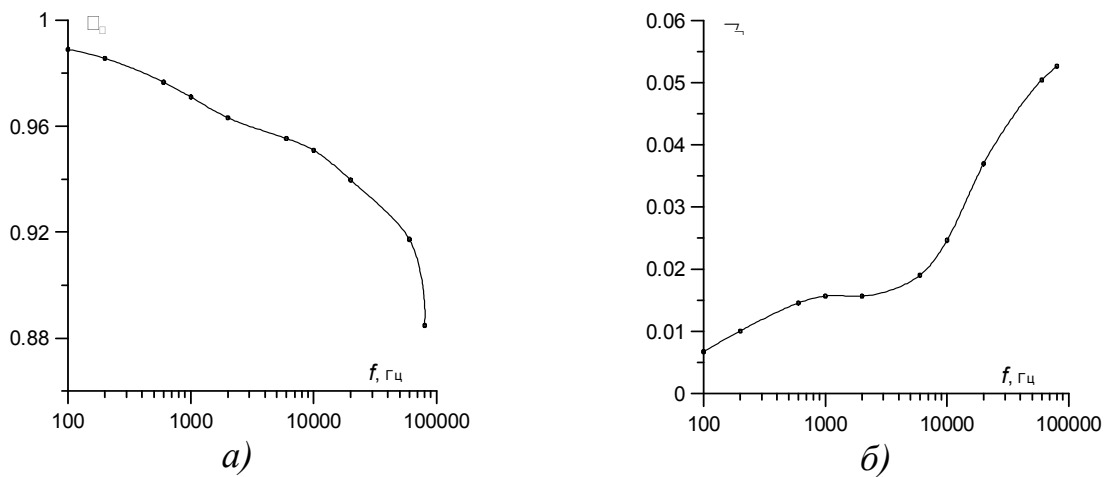


Для одиночних частинок  $d_i = x_i + 2\delta$ , де  $\delta \approx 2,7$  нм – сумарна товщина захисної оболонки і немагнітного шару на поверхні частинки. Форма агрегатів покладалася сферичною.

Усі частинки були розділені на дві групи в залежності від гідродинамічного діаметра, визначеного з (4.19): індивідуальні частинки з повним діаметром  $d < d_{\max} \approx 30$  нм і кластери з ефективним діаметром більше  $d_{\max}$ . Вибір порогового діаметра  $d_{\max}$  частки обумовлений тією обставиною, що згідно з даними, отриманими на електронному мікроскопі [183, 280], ймовірність виявлення в магнетитовому колоїді частинок з діаметром магнітного ядра більше 23–25 нм можна вважати знехтувано малою. З огляду на те, що товщина  $\delta_1$  немагнітного шару на поверхні магнетиту дорівнює 0.5 – 0.7 нм, а товщина  $\delta_2$  захисної оболонки з молекул олеїнової кислоти 2.0–2.2 нм, отримуємо наведену вище оцінку для максимального гідродинамічного діаметра окремої частки  $d_{\max} \approx 28 - 31$  нм. У середині кожної групи проводилося усереднення по фракціям. Таким чином, основним результатом кластерного аналізу була інформація про середні "гідродинамічні" діаметри окремих частинок та ефективні діаметри кластерів.

Частотна залежність динамічної сприйнятливості приведена на рисунку 4.23, а результати кластерного аналізу – на рисунку 4.24. Особливістю кривих є те, що дійсна частина  $\chi'(\omega)$  сприйнятливості змінюється відносно слабко (на 12 – 15 %), а уявна частина  $\chi''(\omega)$  мала у всьому дослідженому діапазоні частот. Це означає, що основний внесок в динамічну сприйнятливість в діапазоні частот до 100 кГц вносять відносно дрібні частинки з неелевським механізмом релаксації магнітного моменту (або з малою енергією магнітної анізотропії). Внесок цих частинок можна вважати не залежним від частоти. В рамках кластерного аналізу, описаного вище, достовірної інформації про ці частинки отримати не можна, однак ця

інформація і не суттєва, так як дрібнодисперсна фракція слабо схильна до магнітофорезу і слабо впливає на розшарування МР. Основний внесок в розшарування рідини вносять частинки з броунівським механізмом релаксації магнітного моменту. Розподіл цих частинок за фракціями наведено на діаграмі (рис. 4.24). По осі абсцис відкладений середній діаметр частинок у фракції з урахуванням захисної оболонки.



а) – дійсна частина, б) – уявна частина

Рисунок 4.23 – Залежності дійсної та уявної частин динамічної сприйнятливості від частоти зондуючого поля

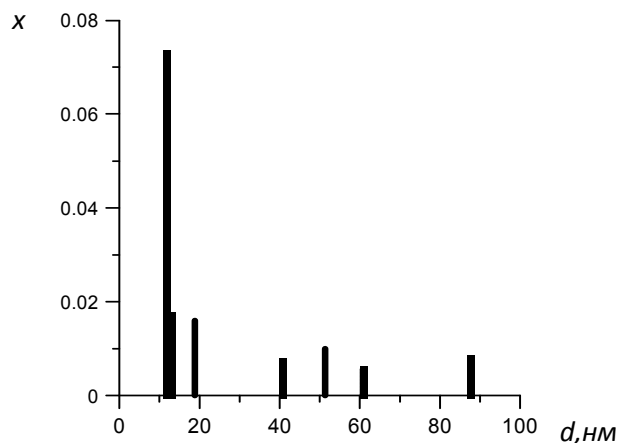


Рисунок 4.24 – Внесок броунівських частинок і кластерів різного розміру в початкову сприйнятливість МР

Середній діаметр одиночних частинок за даними кластерного аналізу виходить рівним  $\langle d_c \rangle = 13,2$  нм, що добре корелює з результатами магнітогранулометричного аналізу. Дійсно, якщо покласти  $\langle d \rangle = \langle x \rangle + 2\delta$ , то при  $\langle x \rangle = 7,05$  нм і  $\delta = 2,7$  нм отримують  $\langle d \rangle \approx 12,5$  нм. Точного збігу  $\langle d_c \rangle$  і  $\langle d \rangle$  очікувати не слід, так як кластерний аналіз не враховує наявність дрібних частинок з неелевським механізмом релаксації магнітного моменту і повинен давати трошки завищене значення діаметра частинок, що, власне, і спостерігається. Ефективні діаметри квазісферичних агрегатів знаходяться в інтервалі 40 – 90 нм, а середній діаметр агрегатів виявився рівним 60 нм, що добре узгоджується з результатами [66, 80, 186, 272], отриманими раніше для МР типу «магнетит – рідкий вуглеводень – олеїнова кислота».

Магнітогранулометричний і кластерний аналізи проведені тільки при кімнатній температурі. Зі зниженням температури повинна посилитися кореляція між магнітними моментами часток всередині агрегату і збільшитися число агрегатів з некомпенсованим магнітним моментом. Нанорозмірні агрегати з переважанням неелевського механізму релаксації магнітного моменту будуть переходити в розряд "броунівських часток" з некомпенсованим сумарним магнітним моментом. Як наслідок, при зниженні температури вклад «броунівських» агрегатів в початкову сприйнятливність розчину буде швидко наростати.

Проведені магнітогранулометричний і кластерний аналізи довели високу седиментаційну стійкість МР, що позитивно впливає як на працездатність, так і на рівень техногенно-екологічної безпеки технологічного обладнання.

#### 4.4 Аналіз випаровуваності промислових магнітних рідин на підставі експериментальних досліджень

Для вивчення випаровування були обрані зразки магнітної рідини, які отримали найбільш широке застосування в промисловості. Рідкими основами для них були: вакуумне масло VM-3 (зразок 1), поліетілсілоксан ПЕС-3 (зразок 2) і робоча рідина ЛЗ-МГ-2 (зразок 3).

Випаровуваність була розрахована відповідно до (2.25). На рисунках 4.25, 4.26, 4.27 показані часові залежності зміни маси МР.

Для МР на основі вакуумного масла і ПЕС-3 на початковому етапі не спостерігалось ніяких змін маси зразків. Для зразка 2 процес випаровування почався через місяць після початку досліджень (рис. 4.26), а для зразка 1 зміни маси стали помітними через три місяці (рис. 4.25). Для зразка 3 зміни маси спостерігалися з перших днів спостереження. Протягом всього часу випробувань всі магнітні рідини залишалися однорідними, без ознак розшарування.

За цих умов відзначені відмінності в перебігу процесу випаровування для обраних зразків МР. Так для зразків 1 і 2 дія магнітного поля призвела до збільшення швидкості випаровування, а для зразка 3 випаровування відбувалося інтенсивніше у відсутності магнітного поля.

Порівняльний аналіз графіків на рисунках 4.25, 4.26, 4.27 показав, що випаровуваність зразків магнітної рідини в полі і без нього відрізняються один від одного незначно. У той же час площа поверхні випаровування при впливі магнітного поля значно вище. Це пояснюється тим, що конфігурації вільної поверхні магнітної рідини у вертикальному магнітному полі аж ніяк не горизонтальна і ідеально гладка, що притаманне всім рідинам. При перевищенні напруженості поля деякого критичного значення на ній починають зароджуватися конічні виступи, які, витягаючись вздовж напрямку поля, утворюють характерну «їжакоподібну» структуру (рис. 4.28).

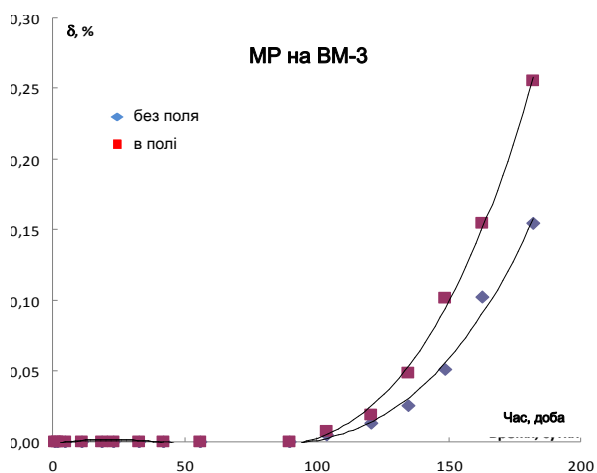


Рисунок 4.25 – Залежність відносної зміни маси МР на основі ВМ-3 від часу

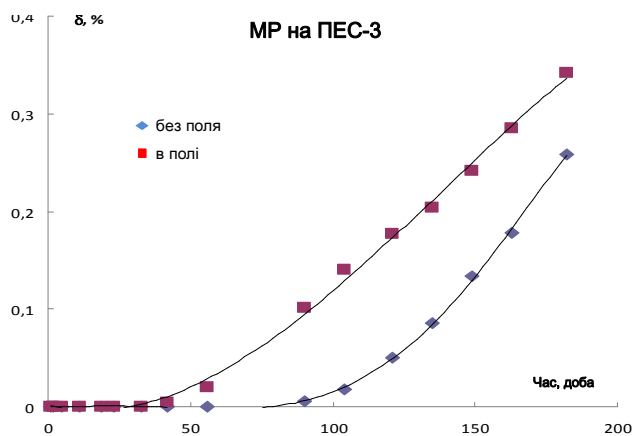


Рисунок 4.26 – Залежність відносної зміни маси МР на основі ПЕС-3 від часу

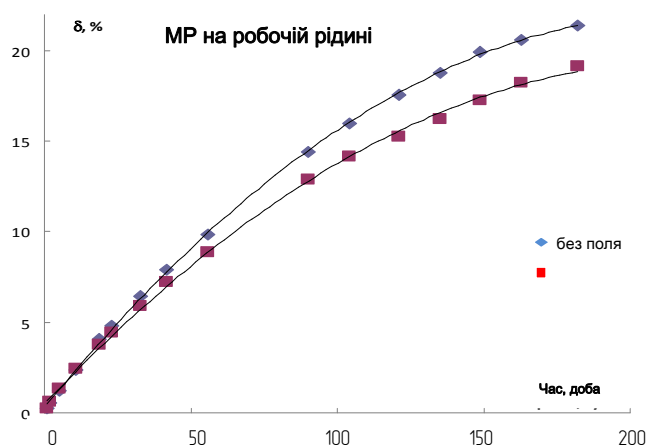


Рисунок 4.27 – Залежність відносної зміни маси МР на основі рідини ЛЗ-МГ-2 від часу



Рисунок 4.28 – Магнітна рідина під дією магнітного поля

Причиною цього є залежність діючої на магнітну рідину пондеромоторної сили від напруженості макроскопічного поля, яка є сумою напруженостей полів зовнішніх джерел і власного поля магнітної рідини, що залежить від форми займаної полем області простору. При періодичній деформації вільної поверхні напруженість поля під її буграми внаслідок прагнення силових ліній замикається через середовище з більш високим значенням магнітної проникності і тому збільшується, а під западинами – зменшується [295, 296].

На наступному етапі було вирішено досліджувати випаровуваність обраних зразків МР в умовах, близьких до їх застосування в МРГ. З урахуванням того, що температура в зазорі магніторідинного герметизатора може змінюватися в широких межах (223 К–373 К), вирішено було визначити швидкість випаровування зразків магнітної рідини при різних температурах.

Для проведення експериментів була використана ємність (рис. 4.29), що складається з двох кришок, що з'єднуються між собою гвинтами. За допомогою гвинтів можна було регулювати товщину шару магнітної рідини в зазорі між кришками. Між кришками був передбачений зазор, що зв'язує МР з навколишнім середовищем.

Другий етап дослідження випаровування трьох зразків МР проводився в сушильній шафі при температурі 50 °С, тому що саме в таких умовах експлуатується значна кількість підшипникових вузлів.

Кожен зразок МР заливався в ємність, показану на рисунку 4.29. Одна ємність з МР встановлювалася на постійний магніт, на другу ємність з МР магнітне поле не діяло. Шість зразків МР випробовувалися в сушильній шафі протягом місяця. Випаровуваність визначалася за формулою (2.25), вимірювання маси для кожного із зразків проводилися раз на добу. Аналіз отриманих результатів показав, що випаровуваність магнітної рідини на основі ВМ-3 не змінилася, як в присутності магнітного поля, так і при його відсутності. Для магнітної рідини на основі ПЕС-3 втрата маси на випаровування для зразка поза магнітного поля склала 0,03 %, а у ємності, встановленої на постійний магніт випаровуваність не змінилася. Зміна швидкості випаровування для робочої рідини ЛЗ-МГ-2 від часу наведено на рисунку 4.30. Тут процес випаровування йшов значно інтенсивніше, ніж при кімнатній температурі (рис. 4.27). Інтенсивність випаровування спочатку була вище у зразка без магнітного поля. З спливанням часу з огляду на підвищення концентрації дисперсної фази зростання випаровуваності сповільнилося і вийшло на «насичення».

Аналіз наведеного на рисунку 4.30 графіка показує, що інтенсивність випаровування МР на основі робочої рідини без магнітного поля на початковому етапі в кілька разів вище, ніж у зразка, до якого підведено поле. У той же час втрата більше 20 % маси рідини на випаровування не дозволяє її застосовувати для відносно високих температур. Це пояснюється тим, що робоча гідравлічна рідина ЛЗ-МГ-2 (ТУ 38.101328-81) містить газові фракції. На даній основі, завдяки відмінним низькотемпературним характеристикам, магнітна рідина була розроблена для аміачних систем [297–299], а для температур від 50 °С вона не може бути застосована.

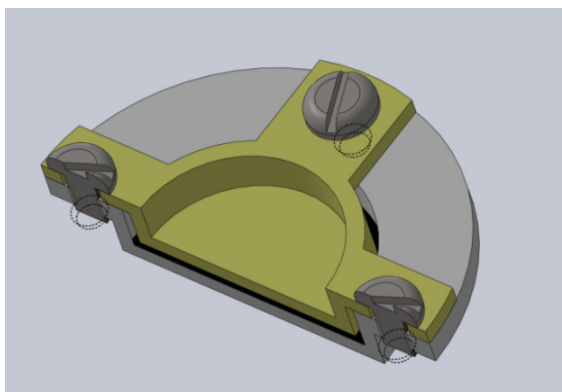


Рисунок 4.29 – Ємність для моделювання випаровування магнітної рідини в зазорі герметизатора

На третьому етапі було вирішено провести випробування в сушильній шафі при практично максимальній для магніторідинних пристроїв температурі, рівній 95 °С, зразків магнітної рідини на основі VM-3 і ПЕС-3 за аналогічною методикою, як на другому етапі. Результати досліджень для МР на VM-3 наведені на рисунку 4.31. Для МР на ПЕС-3 графіки не приводяться, тому що їх загальний вигляд зберігає ті ж тенденції, що і для МР на рідкій основі VM-3.

З розгляду кривих на рисунку 4.31 можна зробити висновок, що магнітне поле зменшує швидкість випаровування рідини, що є позитивним фактором для збільшення часу роботи МРГ. У той же час основним критерієм для виготовлення МР з підвищеними вимогами по випаровуваності є вибір рідкої основи. Найбільш прийнятних результатів слід очікувати від масел, що застосовуються у вакуумній техніці. Тільки для цих масел випаровуваність є найважливішою екологічною та експлуатаційною характеристикою, а показник випаровування як функція тиску насичених парів застосовується в якості основного бракувального показника [300].

Магнітні рідини з основами на алкарені, аріезон і VM-3 є найбільш екобезпечними. Саме тому вони широко застосовуються в МРГК.



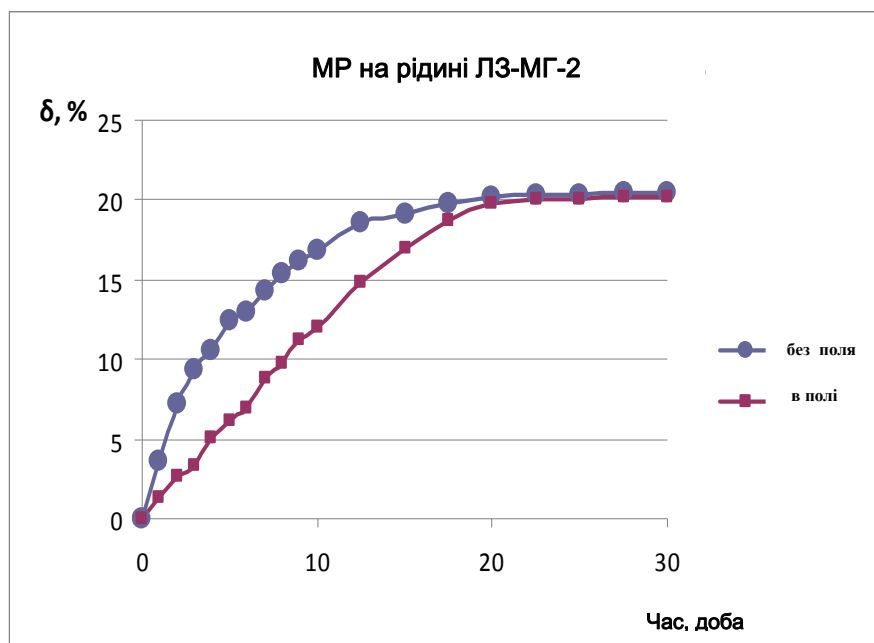


Рисунок 4.30 – Зміна швидкості випаровування МР на основі ЛЗ-МГ-2 від часу

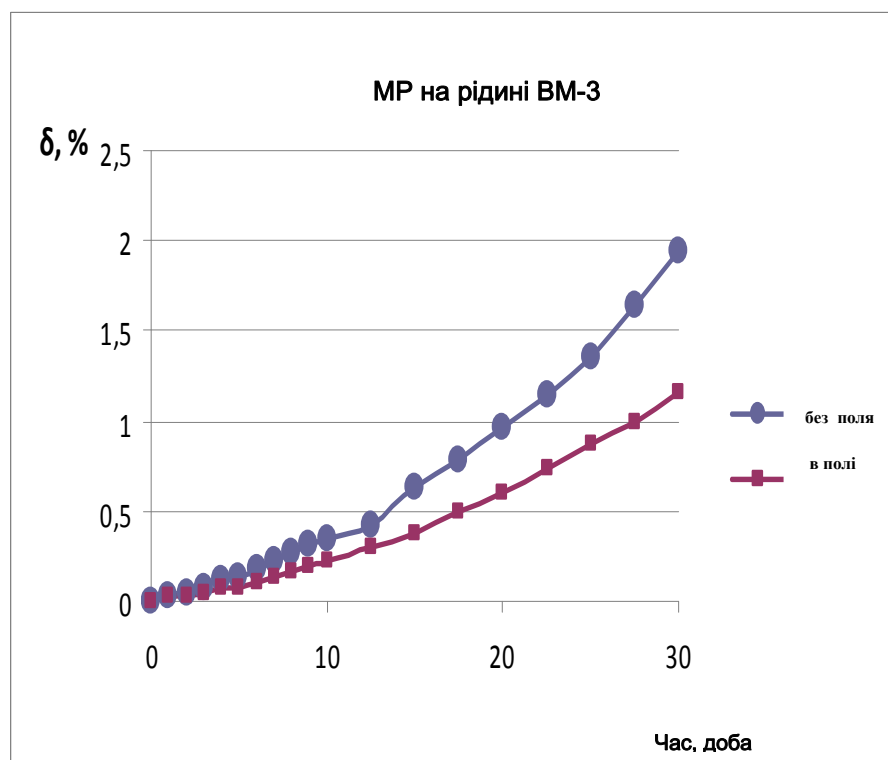


Рисунок 4.31 – Зміна швидкості випаровування МР на основі ВМ-3

#### 4.5 Експериментальні дослідження динамічних процесів в магнітній рідині в неоднорідному магнітному полі герметизатора

Для дослідження були обрані різні типи МР, розроблених і виготовлених в ТОВ «НПВП «Ферогідродинаміка». Основні технічні характеристики МР наведені в таблиці 4.2. Ці рідини знайшли широке застосування в різних конструкціях МРГ. Для більш широкого узагальнення отриманих результатів в роботі досліджувалися також рідини на основі гасу і скипидару, які з огляду на специфічні фізико-хімічні властивості цих основ, поки не знайшли широкого застосування в МРГ.

Для визначення рівня магнітного поля і величини градієнта цього поля в області МР для експериментальної установки виконувався чисельний розрахунок досліджуваної магнітної системи методом кінцевих елементів за допомогою пакета програм Comsol [226]. Результати розрахунку наведені на рисунку 4.32, з яких видно, що величина магнітної індукції в області МР, яка характеризується відносним значенням магнітної проникності  $\mu_r = 2,4$ , становить близько 0,3 Тл.

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики досліджуваних магнітних рідин і результати експерименту

Рідина – носій	Технічні характеристики				Результати експерименту		
	Об'ємна концентрація, %	Намагніченність насичення, кА/м	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Динамічна в'язкість, мПа·с	$k_F$	$\tau$ , с	$V_{F, \max}$ , с <sup>-1</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
Вакуумне масло ВМ-3	11,0	42	1389	32	1,03	100	$8,2 \cdot 10^{-4}$
Поліетілсілоксан ПЕС-3	11,9	38	1329	18	1,017	100	$2,3 \cdot 10^{-4}$

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Алкарен Д24С	8,9	29	1170	51	1,031	200	$5 \cdot 10^{-4}$
Аріезон АР201	11.0	33	1289	43	1,024	100	$3 \cdot 10^{-4}$
Трансформаторне масло ТКп	10.8	44	1315	28	1,037	120	$7 \cdot 10^{-4}$
Гас	12,5	62	1080	11	1,021	100	$6 \cdot 10^{-4}$
Скипидар	11,5	48	1115	12	1,018	60	$4 \cdot 10^{-4}$
Гліцерин	12,2	31	1642	59	1,046	1500	$3,8 \cdot 10^{-4}$

Результати вимірювання змінного в часі відносного значення магнітної сили  $F_m(t)/F_m(0)$ , що діє на зразок з магнітною рідиною різного типу, показані на рисунку 4.33 а. Розраховані за цими даними значення швидкості зміни магнітної сили, що обчислюються як наведено на рис. 4.33.

$$V_F = \frac{F_m(t) - F_m(0)}{F_m(0)t} \quad (4.20)$$

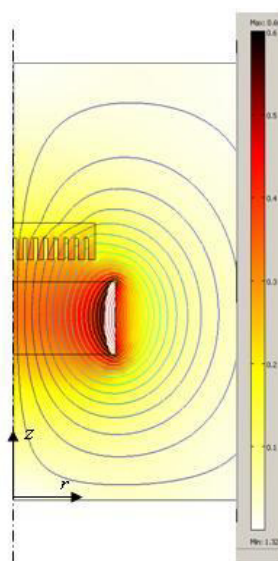


Рисунок 4.32 – Чисельний розрахунок досліджуваної магнітної системи

Для кількісної характеристики динамічних процесів в досліджуваній магнітній рідині в даній роботі розглядалися наступні діагностичні параметри:

- 1) коефіцієнт зміни магнітної сили, що обчислюється як

$$k_F = \Delta F_m / F_m(0), \quad (4.21)$$

де  $\Delta F_m$  – максимальна зміна магнітної сили при закінченні процесу магнітної релаксації (показано на рисунку 4.33 а для скипидару), Н;

$F_m(0)$  – величина сили в початковий момент часу, Н;

- 2) характерний для даної магнітної рідини час  $\tau$ , за який крива зміни в часі магнітної сили досягає значення, близького до «насичення» (час релаксації магнітної сили). Відзначимо, що для деяких МРГ, у яких спостерігається явно виражене насичення в кривій зміни сили (наприклад, криві 4 і 7 на рисунку 4.33а), така характеристика є строго визначеною, а для інших рідин вона може бути визначена з точністю до порядку;

- 3) максимальне значення швидкості зміни магнітної сили  $V_{F,\max}$ , яка характеризує динаміку протікання магнітних процесів в рідині і визначається за графічними залежностями на рисунку 4.33 б (тут показано значення цього параметра для рідини ВМ-3).

Розраховані за результатами експерименту значення цих параметрів для восьми досліджуваних рідин наведені в таблиці 4.2, три стовпці праворуч. З аналізу отриманих графічних залежностей на рисунку 4.33, та значень діагностичних параметрів зроблено такі висновки.

1. Для всіх досліджуваних рідин криві зміни магнітної сили мають практично однаковий характер – спостерігається швидке зростання магнітної сили на початковому етапі тривалістю  $\tau = 60 - 200$  с, і потім відносно повільне зростання або приблизно незмінне значення сили, що можна

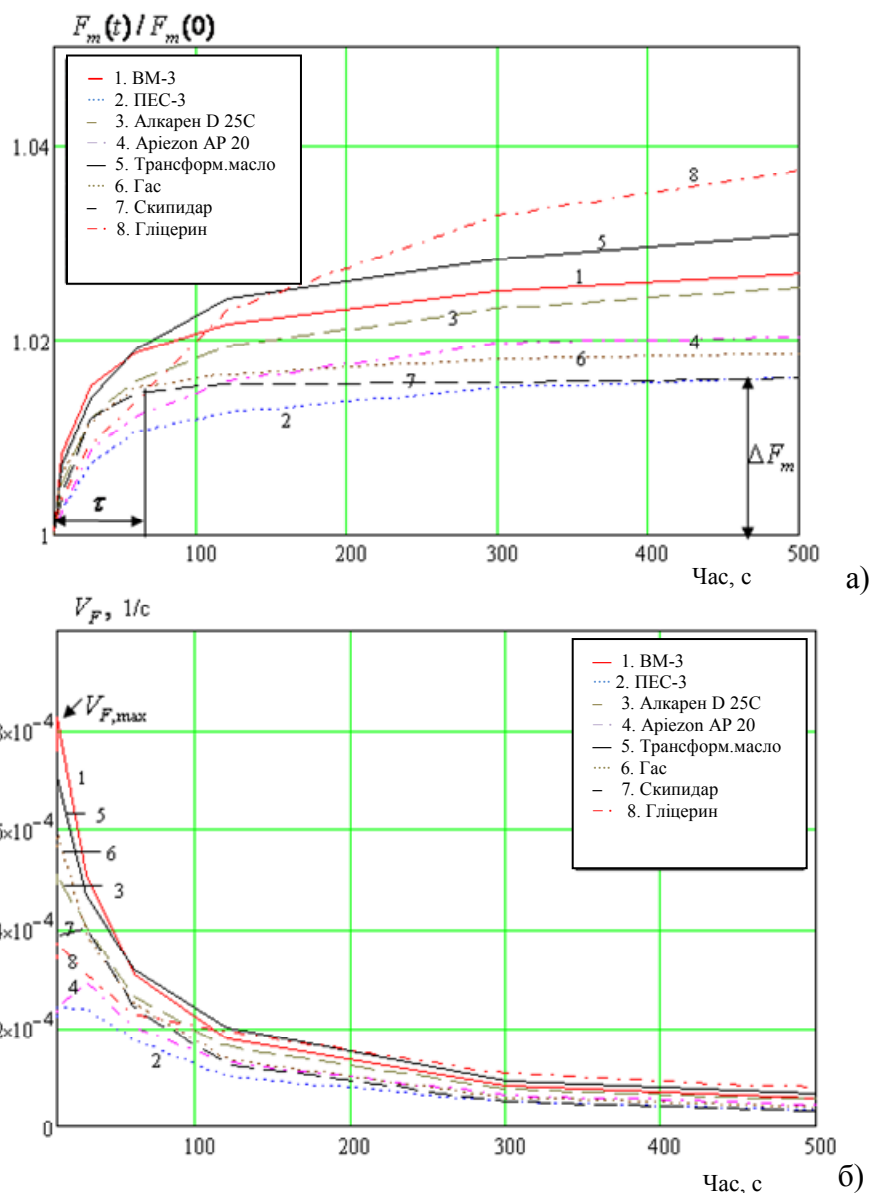


Рисунок 4.33 – Залежність відносного значення магнітної сили (а) і швидкості зміни магнітної сили (б) від часу

пояснити властивостями рідини-носія і самої МР. Всі ці рідини (крім гасу і скипидару) відпрацювали в складі МРГ не менше 1,5 років і претензій під час експлуатації до них не було, крім МРГ на основі гліцерину, яка інтенсивно вбирала вологу, після чого відбувалося її розшарування. Низька ефективність роботи цієї МР була відзначена навіть при експлуатації герметизатора в середовищі інертних газів, коли був відсутній контакт з атмосферним повітрям.

2. Зміна відносної величини магнітної сили, яка визначається коефіцієнтом  $k_F$ , для досліджуваних МР знаходиться в межах від 1,7 % до 4,6 %, причому, найменше значення досягається для ПЕС-3, а найбільше – для гліцерину (рис. 4.33 а і табл. 4.2).

3. Отримані значення часового параметра  $\tau$  для різних МР відповідає значенням їх динамічної в'язкості (табл. 4.2). Для більш в'язких рідин величина  $\tau$  характеризується більшими значеннями. Так, рідина на основі гліцерину, що має найбільшу серед розглянутих рідин в'язкість, характеризується безперервним збільшенням сили протягом всього вимірюваного проміжку часу, рівного 1500 с.

4. Отримані значення швидкості зміни магнітної сили  $V_{F,\max}$  входять у відносно вузький діапазон  $2,3 \cdot 10^{-4} - 8,2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , причому найбільше значення досягається для МР на основі вакуумного масла, а найменше – на основі апіезона (табл. 4.2 і рис. 4.33 б)

З аналізу графічних залежностей на рисунку 4.33 а, а також виходячи з досвіду експлуатації МРГ з різними типами МР можна припустити, що седиментаційну стійкість в неоднорідному магнітному полі буде мати магнітна рідина, зміна магнітної сили для якої протягом 10–15 хв. не перевищить 3 % [301].

Для розробки методики експрес-аналізу седиментаційної стійкості МР доцільно додатково дослідити вплив розмірів і форми магнітних наночастинок (в даному випадку магнетиту) на величину і динаміку зміни інтегральної величини магнітної сили, що діє на зразок.

#### **4.6 Експериментальні дослідження впливу розмірів наночастинок магнетиту на седиментаційну стійкість магнітної рідини**

Високодисперсний магнетит для всіх восьми типів магнітних рідин, досліджуваних в підрозділі 4.5, синтезувався методом хімічної конденсації, в

основі якого лежить процес осадження солей двох- і тривалентного заліза концентрованим водним розчином аміаку (реакція Елмора [302]). Середній розмір частинок, одержаних реакцією Елмора, становить 7 – 20 нм.

Для подальших досліджень потрібно було підготувати зразки МР, що відрізняються середнім розміром дисперсних наночастинок.

Відомо, що фізико-хімічні властивості магнітної рідини досить складним чином залежать від технології приготування МР.

Кількість чинників, а також особливостей технології синтезу, що впливають на властивості промислових МР чисельна, що їх не завжди можливо проконтролювати, отримання рідини з заданими властивостями є нездійсненним завданням.

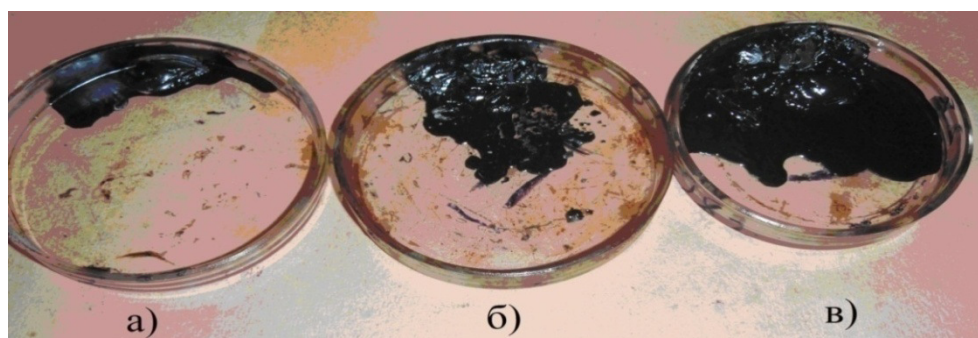
В якості зразків для дослідження була обрана магнітна рідина з однієї партії, але з різним часом центрифугування. Стандартна МР готувалася з тривалістю центрифугування 1 годину, що відповідає технологічному регламенту, прийнятому в НВВП "Ферогідродинаміка". А друга частина партії МР центрифугувалась протягом 10 хвилин, третя партія протягом 4 хвилин. Дисперсійними середовищами слугували вакуумне масло ВМ-3 (найбільш широко застосовується в промисловості), arizon (перспективний новий матеріал для магнітної рідини) і гас (властивості МР на основі гасу досить докладно досліджені іншими авторами і є можливість зіставлення з даними інших дослідників) [303].

Технічні характеристики трьох зразків магнітної рідини змінювалися в залежності від часу центрифугування незначно. Намагніченість насичення МР з рідкою основою на гасі дорівнювала 60,75 кА/м, 57,63 кА/м і 59,84 кА/м, згідно результатів спостережень, за часом центрифугування 60 хв, 10хв і 4 хв відповідно. Такі ж незначні зміни параметрів отримані для об'ємної концентрації та густини МР. Середні діаметри наночастинок, отримані електронною мікроскопією [304], змінювались від 8,3 нм (час центрифугування 60 с) до 11,1 нм (час центрифугування 4 с).

За таких умов вихід магнітної рідини при центрифугуванні протягом години зменшився приблизно на 10 % в порівнянні зі скороченим часом центрифугування, а маса осаду була приблизно в 2 рази більша.

Осад при синтезуванні стандартної МР був щільним, чорного смолянистого кольору і не розтікався. А при отриманні магнітної рідини зі скороченим часом центрифугування осад складався з двох фракцій (тверда і рідка). Тверда фракція була більш пухкою, рідка фракція застигала через добу. Спостережувані процеси характерні для всіх трьох досліджуваних рідких основ. На рисунку 4.34 надані осади після центрифугування МР на основі гасу.

Підтвердження того, що досліджувані зразки з відмінним часом центрифугування мають різні середні діаметри частинок, можна отримати також дослідженням змін в структуроутворенні, які мають виявлятися на характері частотних і температурних залежностей магнітної сприйнятливості МР.



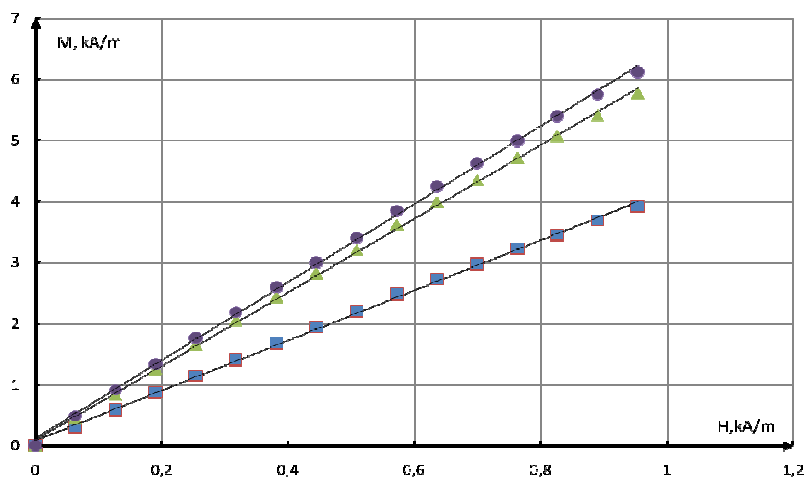
Час центрифугування, хв: а) – 4, б) – 10, в) – 60

Рисунок 4.34 – Осад після центрифугування магнітної рідини на основі гасу

Магнітну сприйнятливості визначають за кутом нахилу початкової ділянки кривої намагнічування. Для трьох типів МР на основі гасу з різним часом центрифугування лінійні початкові відрізки приведені на рисунку 4.35. З його розгляду випливає, що зниження часу центрифугування призводить до



збільшення кута нахилу, а, відповідно, і до збільшення магнітної сприйнятливості.



Тривалість центрифугування: ● – 4 хв, ▲ – 10 хв, ■ – 60 хв

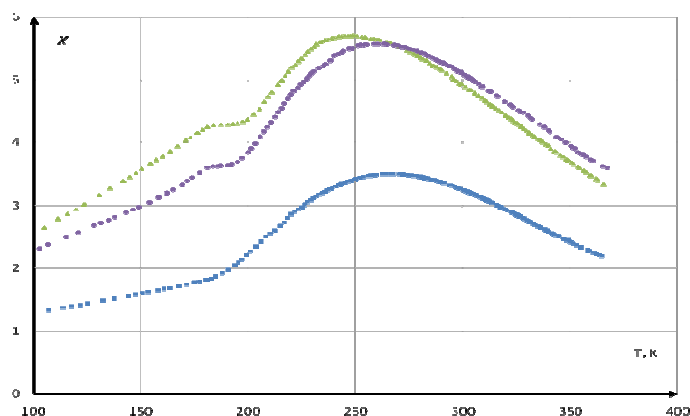
Рисунок 4.35 – Лінійний початковий відрізок кривої намагнічування для магнітної рідини на основі гасу

Експериментальному визначенню частотних і температурних залежностей магнітної сприйнятливості і часу релаксації для МР на основі гасу присвячено досить багато статей, докладних оглядів в ряді монографій, наприклад в [66, 90, 107, 112] і т.д. Їх кількість значно перевищує обсяг публікацій для МР на більш в'язких основах. Для можливості зіставлення отриманих результатів досліджень по дійсній та уявній частини ефективної магнітної сприйнятливості з роботами інших авторів, вони наводяться для МР на основі гасу.

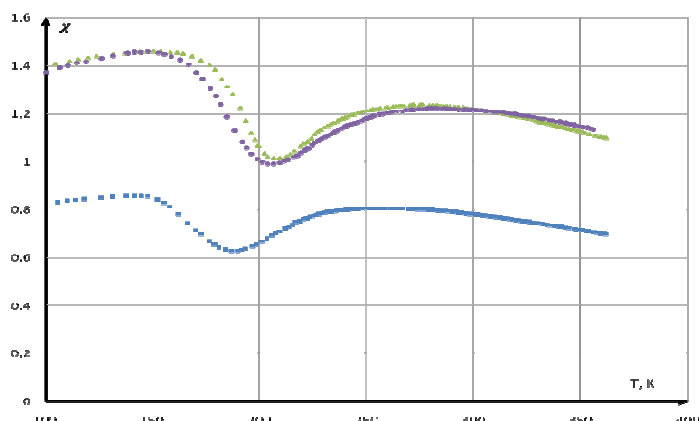
На рисунку 4.36 наведені залежності дійсної  $\chi$  частини ефективної магнітної сприйнятливості від температури для двох випадків – у відсутності магнітного поля (рис. 4.36 а) і при накладенні постійного магнітного поля (рис. 4.36 б). Вимірювання проводились на частоті 1000 Гц.

З їх розгляду випливає, що максимальні значення  $\chi$  при накладенні магнітного поля зміщуються в область більш високих температур для МР зі

зменшеним часом центрифугування. Зважаючи на це, згідно з [271], зразки МР, що пройшли часткове центрифугування, мають більші частки, тому що енергетичний бар'єр для частинок цих зразків має більш високе значення, в зв'язку з чим їх перехід в суперпарамагнітний стан повинен відбуватися при більш високій температурі.



а)



б)

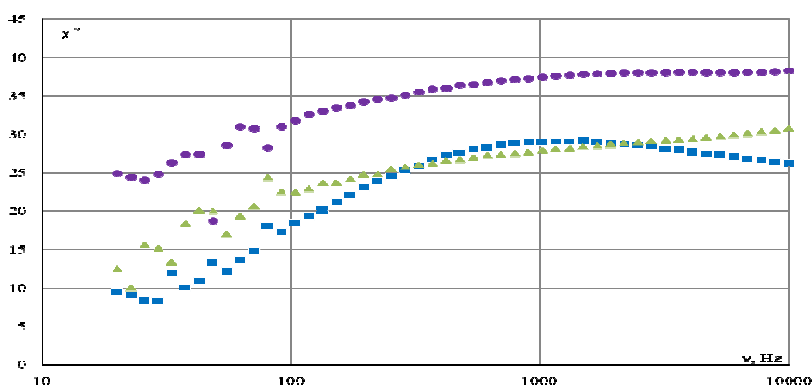
Тривалість центрифугування: ● – 4 хв, ▲ – 10 хв, ■ – 60 хв

а – без МП, б – з МП

Рисунок 4.36 – Залежність магнітної сприйнятливості від температури для магнітної рідини на основі гасу

Той же висновок можна зробити з розгляду частотної характеристики уявної частини магнітної сприйнятливості, представленої на рисунку 4.37, так як в даному випадку екстремум зміщується в бік низьких частот [304].

Отже, для подальших досліджень нами отримані зразки магнітної рідини на трьох рідких основах (вакуумне масло, гас і апіезон) з часом центрифугування 60хв, 10 хв і 4 хв. З викладеного вище зазначено, що можна знехтувати впливом всіх випадкових факторів, які залежать від технології виготовлення МР, дослідити характер зміни в часі магнітної сили, діючій на МР в неоднорідному полі постійного магніту. Експерименти проводилися згідно методики, докладно викладеної в [301].

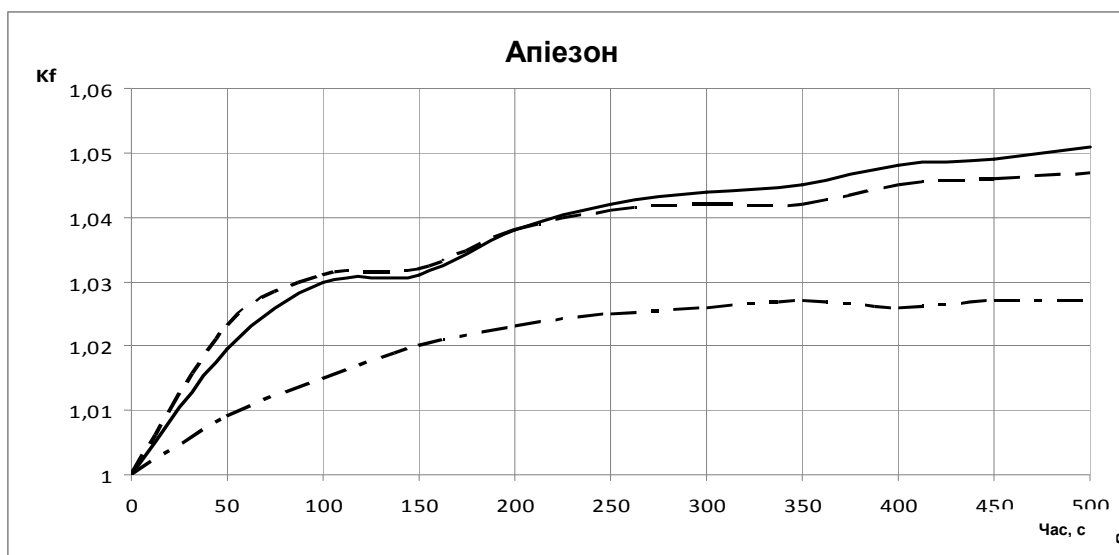
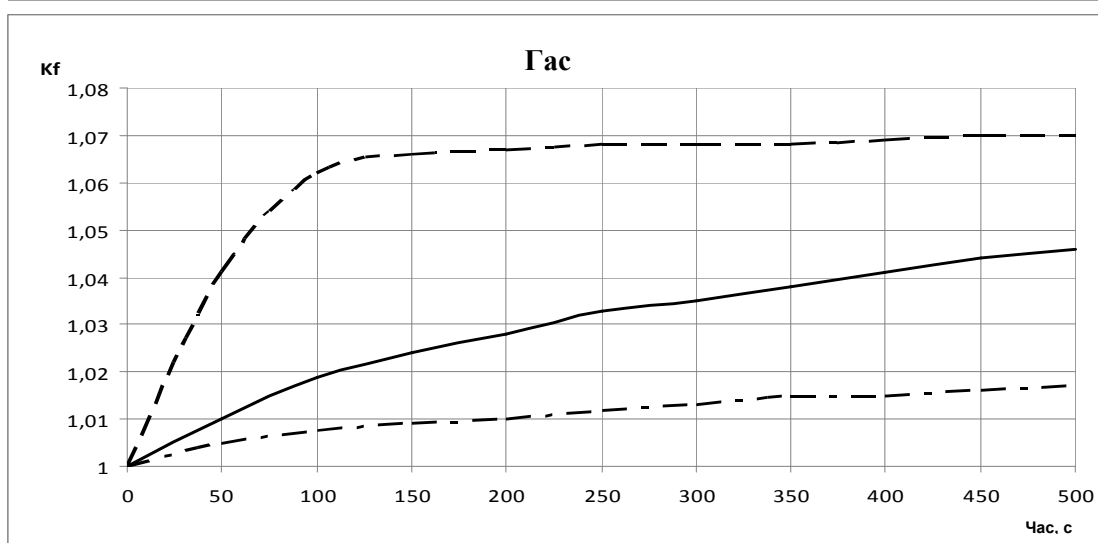
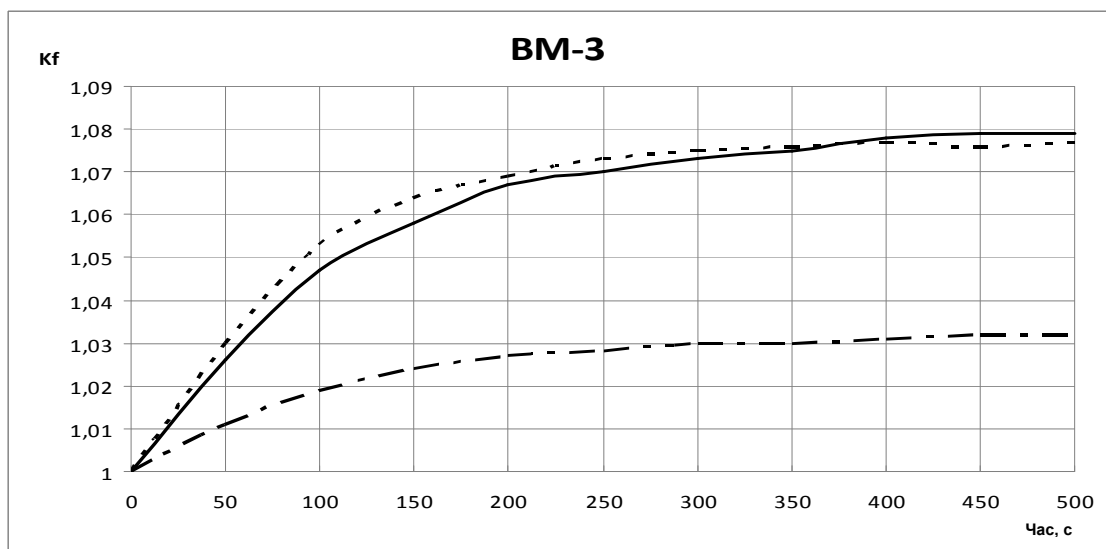


Тривалість центрифугування: ● – 4 хв, ▲ – 10 хв, ■ – 60 хв

Рисунок 4.37 – Залежність уявної частини магнітної сприйнятливості від частоти магнітного поля для магнітної рідини на основі гасу

Для кількісної характеристики перебігу динамічних процесів, в магнітній рідині в якості діагностичного параметра використовуємо коефіцієнт зміни магнітної сили, який обчислюється відповідно до вираза (4.21).

Результати вимірювання змінного в часі відносного значення магнітної сили, діючої на зразки магнітної рідини з різними рідкими основами і часом центрифугування представлені на рисунку 4.38.



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

Рисунок 4.38 – Залежність відносної магнітної сили від часу для магнітних рідин на різних основах і тривалості центрифугування

З розгляду графіків випливає, що характер зміни відносної величини магнітної сили з спливанням часу однаковий. Для магнітних рідин, що пройшли повне центрифугування зміна магнітної сили протягом 10–15 хв не перевищувала 3 %, що відповідно до проведеного в [305] аналізу говорить про високу седиментаційну стійкість МР.

Для магнітних рідин на основі вакуумного масла ВМ-3 і апіезона значення коефіцієнта  $K_F$  фактично не залежить від скороченого часу центрифугування (4 хв і 10 хв). Найбільше зростання відносної магнітної сили на початку експерименту зафіксовано для МР на основі гасу при проведенні центрифугування протягом 4 хв. В цілому МР, що не пройшла стандартного центрифугування протягом однієї години, неможливо рекомендувати для тривалої експлуатації в складі МРГ. Великі частинки, що залишились в них, значно знижують стійкість МР, а, відповідно, надійність МРГ та його техногенну безпеку. Підвищення седиментаційної стійкості МР продовжує ресурс МРГК та запобігає викиду шкідливих речовин, що позитивно впливає на стан екологічної безпеки.

#### **4.7 Експериментальні дослідження впливу магнітов'язкого ефекту на працездатність і безпеку магніторідинного герметизуючого комплексу**

У роботі були досліджені три типи МР, які отримали найбільш широке застосування в промисловості. Рідкими основами для цих рідин були вакуумне масло ВМ-3, кремнійорганічна рідина ПЕС-3 і робоча гідравлічна рідина ЛЗ-МГ-2.

Детально їх характеристики викладені в підрозділі 4.4.

Однією з вимог, що пред'являється до експериментальної установки, є забезпечення ламінарного режиму течії.

Перевірка ламінарного характеру течії показана на рисунку 4.39, де залежність тангенціального напруження  $\tau$  на стінці капіляра від градієнта

швидкості зсуву  $\gamma$  має лінійний характер при напруженості магнітного поля 40 кА/м.

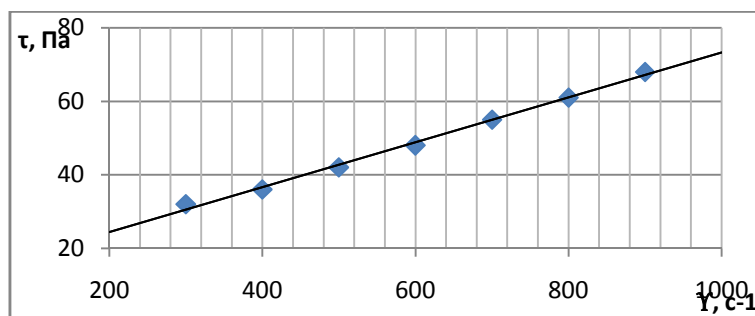


Рисунок 4.39 – Залежність тангенціального напруження  $\tau$  на стінці капіляра від градієнта швидкості зсуву  $\gamma$

Такі ж лінійні залежності отримані для всіх трьох досліджуваних типів МР при різних значеннях напруженості магнітного поля. Власне, тангенс кута нахилу прямої і дає значення ефективної в'язкості для даної напруженості магнітного поля.

На рисунках 4.40, 4.41, 4.42 наведені експериментальні залежності в'язкості від напруженості магнітного поля відповідно для ВМ-3, ПЕС-3 і «робочої рідини».

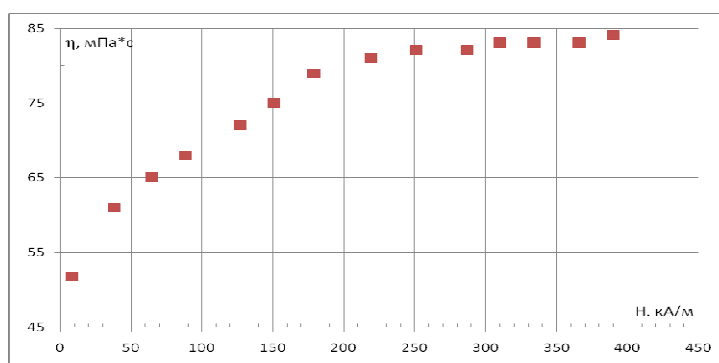


Рисунок 4.40 – Залежність в'язкості магнітної рідини на основі ВМ-3 від зовнішнього однорідного магнітного поля

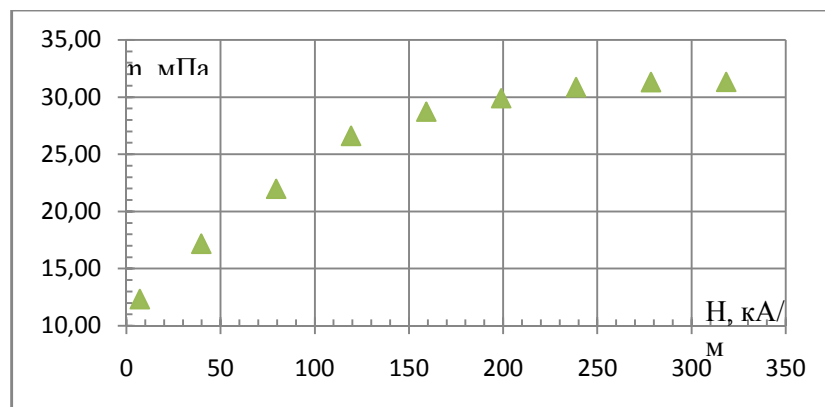


Рисунок 4.41 – Залежність в'язкості магнітної рідини на основі ПЕС-3 від зовнішнього однорідного магнітного поля

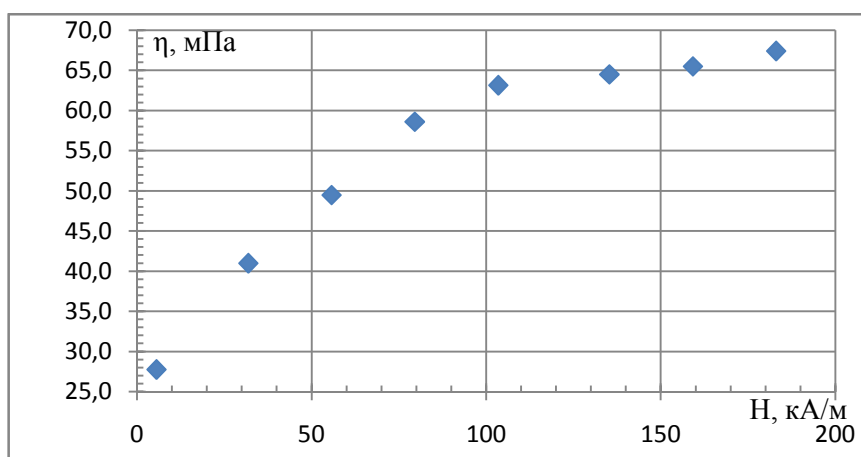


Рисунок 4.42 – Залежність в'язкості МР на основі «робочої рідини» від зовнішнього магнітного поля

Для всіх трьох графіків можна бачити таку закономірність: при відносно малих зовнішніх магнітних полях в'язкість зростає практично лінійно, далі крива має вигин, після чого зі збільшенням величини магнітного поля в'язкість не змінюється і виходить на насичення.

Якісно графіки, наведені на рисунках 4.40, 4.41, 4.42 збігаються, але припинення збільшення в'язкості відбувається при різних значеннях напруженості магнітного поля для кожної з розглянутих рідин.

Таким чином, менш в'язкі рідини швидше досягають «насичення», ніж рідини з більш в'язкою основою. Однак порівняльний аналіз різних МР,

приготовлених за стандартними технологіями, провести складно. Доцільно ввести параметр відносної в'язкості, який характеризує приріст в'язкості МР. В якості початкового значення в'язкості для кожної з розглянутих МР була взята величина в'язкості цієї МР при відсутності магнітного поля. Отримані результати наведені на рисунку 4.43.

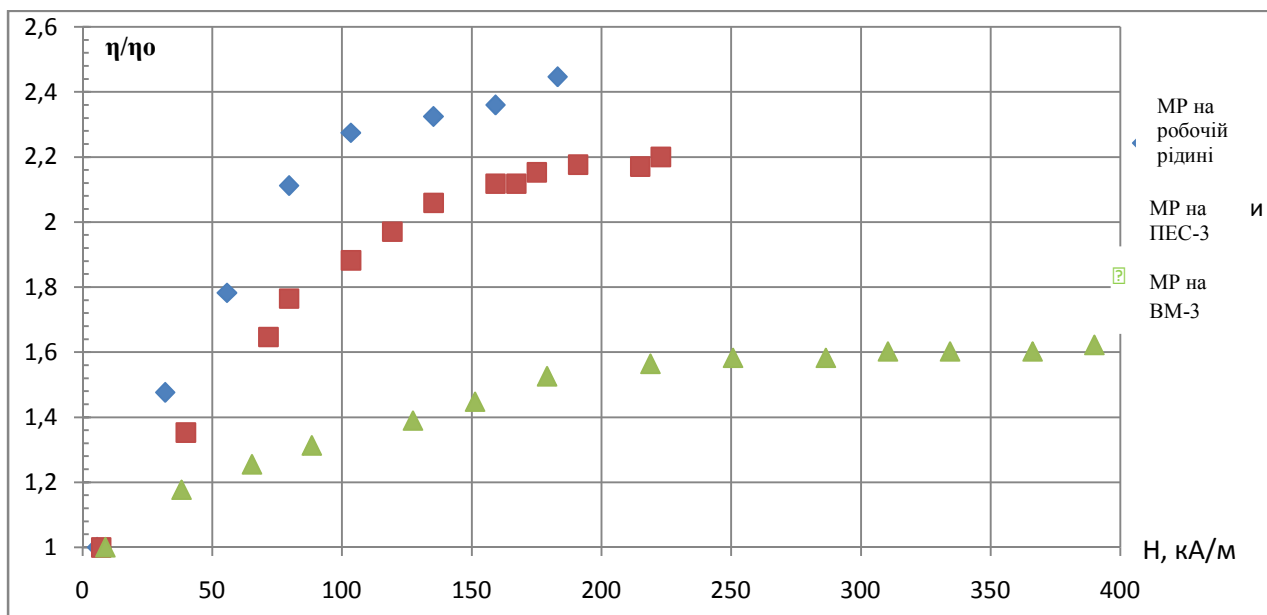


Рисунок 4.43 – Залежність відносної в'язкості МР від зовнішнього магнітного поля

З них видно, що зростання в'язкості припиняється при значно нижчих величинах напруженості МП в порівнянні з тією напруженістю, яка створюється в зазорі магніторідинного герметизатора (як правило вона перевищує 1500 кА/м). За такою ж методикою визначалися значення відносної в'язкості МР на рідких основах: алкарен, гліцерин, трансформаторне масло, гас, апіезон. Отримані величини для різних МР знаходилися в інтервалі 1,6 – 2,5 [193].



#### **4.8 Критерії вибору типу магнітної рідини для забезпечення екологічної безпеки технологічного обладнання**

Проблема надійності експлуатації МРГ у багатьох випадках зводиться до оцінки контролю якості магнітної рідини, пов'язаної з її стійкістю в робочому зазорі герметизатора.

Контроль якості МР і її діагностика, як складної фізико-хімічної системи ставить ряд технічних завдань. Насамперед, це – завдання вибору параметрів якості для адекватної оцінки працездатності МР в тих чи інших конкретних умовах.

Оскільки МР є складною багатофазною системою, керованою зовнішнім магнітним полем, найважливішу роль в забезпеченні її працездатності відіграють магнітні властивості рідини.

У наукових дослідженнях частіше використовуються магнітні характеристики МР. Однак достовірні результати отримуються шляхом використання дорогого і вузькопрофільного приладового обладнання, що неприйнятно, наприклад, для організації вхідного контролю на підприємствах, які експлуатують магніторідинні пристрої.

Це ж характерно і для реологічних методів діагностики, заснованих на оцінці взаємозв'язку структуроутворення в МР з характером їх руху при накладенні магнітного поля.

Більш суттєвим недоліком цих методів є те, що однозначна залежність фізичних властивостей і внутрішнього складу спостерігається тільки для рідин, в яких магнітною взаємодією частинок можна знехтувати. У промислових МР намагніченість насичення є важливою характеристикою; рідини, як правило, висококонцентровані і знехтувати взаємодією частинок неможна.

Пропоновані в ряді робіт [54, 64, 66] критеріальні співвідношення дозволяють оцінити ступінь стійкості МР, пов'язану з інтенсивністю

міжчасткової взаємодії. Однак для обчислення критеріїв потрібно фактично ті ж магнітні та реологічні вимірювання, а прийняті в розрахунках допущення (наприклад, про залежність в'язкості від концентрації згідно рівняння Венда і т.д.), в кінцевому підсумку, не підвищують достовірність отриманих результатів.

Невизначеність фізичних методів практично не дозволяє оцінити експлуатаційні характеристики МР і прогнозувати ресурс роботи МРГ. Тому, як правило, доводиться виконувати стендові або натурні випробування МР в умовах, наближених до експлуатаційних.

Це вимагає спеціально розробленого випробувального устаткування, що також обмежує можливості, пов'язані з вибором МР.

При тривалих випробуваннях зростає ймовірність впливу зовнішніх факторів, помилок персоналу та ін., що не сприяє отриманню достовірної інформації.

Виходячи з вищевикладеного до сих пір становить інтерес на підставі простих вимірювань фізичних властивостей рідини визначити ступінь стійкості магнітної рідини.

У підрозділі 4.5 описано відносно простий метод визначення седиментаційної стійкості МР, заснований на вимірюванні сили, що діє на зразок з МР в неоднорідному магнітному полі, а також вимірі динаміки зміни в часі цієї сили з використанням високоточних електронних ваг.

Для всіх МР, які мають позитивний досвід експлуатації, зміна магнітної сили протягом 15 хв не перевищувала 3 %. З огляду на його відносну простоту і нескладну реалізацію, цей метод можна використовувати для вибору МР.

При вивченні впливу зовнішнього магнітного поля на в'язкість МР було встановлено, що для досліджуваних зразків МР (підрозділ 4.7), параметр відносної в'язкості знаходився в діапазоні 1,6 – 2,5.

Як правило, параметр в'язкості рідко вибирається в якості критерію при

дослідженні МР. Це пов'язано з тим, що в'язкість МР дуже сильно залежить від передісторії зразка, технології приготування МР і т.д. В даному випадку розглядається відношення двох величин в'язкості однієї і тієї ж рідини.

Дослідження були продовжені на 10 зразках МР, у яких раніше визначені магнітні та реологічні властивості, вони пройшли промислову апробацію.

Для кожного типу МР розраховувався параметр відносної в'язкості  $K$ , який характеризує збільшення в'язкості МР в МП. В якості початкового значення в'язкості для кожної з розглянутих МР бралася в'язкість цієї ж рідини при відсутності магнітного поля:

$$K = \frac{\eta_{МП}}{\eta_{нач}}, \quad (4.22)$$

де  $\eta_{МП}$  – в'язкість МР в магнітному полі, Па·с;

$\eta_{нач}$  – в'язкість тієї ж МР при відсутності магнітного поля, Па·с.

За результатами досліджень було визначено, що значення в'язкості МР для всіх типів основ виходить на плато при  $H = 250 - 400$  кА/м і далі не збільшується (для трьох типів основ це можна бачити на рисунку 4.43).

Тому було прийнято рішення при визначенні седиментаційної стійкості магнітної рідини рекомендувати поле напруженістю  $H \geq 400$  кА/м.

Результати експериментів зведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Значення параметра  $K$  відносної в'язкості

Рідина – носій	Динамічна в'язкість у відсутності магнітного поля, мПа·с	Динамічна в'язкість при накладенні магнітного поля, мПа·с	Коефіцієнт $K = \frac{\eta_{МП}}{\eta_{нач}}$
1. Вакуумне масло ВМ-3	47	84	1,79
2. Поліетілсілоксан 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

## Продовження таблиці 4.3

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

З аналізу результатів, наведених в таблиці 4.3, видно, що значення коефіцієнта  $K$  лежить в діапазоні  $1 < K \leq 2,5$ . Причому МР, виготовлені на перших чотирьох рідких основах в таблиці 4.3 мають найменше значення коефіцієнта  $K$  і саме ці МР через свою надійність і довговічність набули найбільшого поширення в магніторідинних пристроях.

З магнітними рідинами з найбільш високим  $K$  ( $K = 2,48$ ) на основі гліцерину і ЛЗ-МГ-2 були певні проблеми при тривалій експлуатації магніторідинних пристроїв. Так, згідно з дослідно-промисловими випробуваннями, ці МР не рекомендуються до застосування при терміні експлуатації більше 1 року.

Для розуміння можливості використання відносної в'язкості як критерія якості МР були проведені дослідження з МР, які в процесі їх синтезу не проходили стадію центрифугування, через що кількість наночастинок з діаметром понад 15 нм становила близько 10 % від загальної кількості частинок. Для такої рідини на основі ВМ-3 вже при напруженості магнітного поля 100 кА/м динамічна в'язкість склала 296 мПа·с, а відповідно коефіцієнт  $K = 6,3$ .

Виходячи з вищевикладеного встановлено, що відносну в'язкість доцільно використовувати як критерій якості магнітної рідини і рекомендувати для застосування при експлуатації магніторідинних пристроїв, в тому числі і магніторідинних герметизаторів. Рекомендоване значення відносної в'язкості  $1 < K \leq 2,5$ . Наданий метод вигідно відрізняється простотою реалізації, відсутністю дорогого спеціалізованого обладнання і

може бути легко реалізований на будь-якому підприємстві, що експлуатує магноторідинні пристрої.

#### **4.9 Аналіз стендових і ресурсних випробувань магніторідинних герметизуючих комплексів**

Незважаючи на велику кількість досліджень статичних і динамічних характеристик МРГ, ряд пов'язаних з їх роботою проблем залишається маловивченими. Це, наприклад, вплив на працездатність МРГ величини робочого зазору. Інші проблеми визначаються особливостями проектного герметизатора, наприклад, сумісність МР і ущільнюємого середовища. Нарешті, найважливішим показником МРГ є ресурс його роботи. Для вирішення цих проблем і були проведені експериментальні дослідження. Конструкції використовуваних стендів детально викладені в підрозділах 2.3.3 і 2.3.4.

Експерименти, проведені на стендах (рис. 2.13 – 2.15) вирішували такі основні задачі: експериментальне підтвердження можливості використання МР в робочому зазорі герметизатора і вибір найбільш прийняттого типу МР; перевірка сумісності МР і середовища, що ущільнюється; виявлення найбільш важливих конструктивних чинників, що впливають на величину утримуваного перепаду тисків, їх зіставлення з результатами математичних моделей і з урахуванням цього розробку рекомендацій щодо практичного конструювання МРГК. Випробування проводилися як в статичних, так і в динамічних режимах.

Стенд, показаний на рисунку 2.10, використовувався для проведення ресурсних випробувань МРГК перед їх установкою на технологічне обладнання. Можливості стенду, докладно описані в підрозділі 2.3.3, дозволяли досліджувати на ньому МРГК з будь-яким діаметром і оборотами обертання з урахуванням експлуатаційних умов (температура, контакт з

ущільнювальним середовищем, наявність абразиву, перепад тисків тощо). Для прискорення проведення випробувань їх програма складалася таким чином, щоб створити в умовах стенду більш жорсткі умови для МРГК, ніж в реальних умовах експлуатації.

Детально досліджувався на стенді вплив попередніх ступенів комплексу (лабіринти, манжети і т.д.) на працездатність МРГК в цілому. Створення подібного багатоступеневого МРГК – досить непросте завдання. По-перше, розроблюваний герметизатор за своїми основними параметрами повинен перевершувати замінне штатне ущільнення, по-друге, МРГК повинен розміщуватися в габаритах замінного штатного ущільнення, по-третє, МРГК повинен бути оптимальним по співвідношенню «ціна/ефективність».

Складно в габаритах штатного ущільнення традиційної конструкції розмістити одночасно магнітну систему, яка при досягненні необхідного утримуваного перепаду тисків мала б мінімальні втрати магнітного потоку і мінімально необхідну кількість магнітів, а також ефективно працююче, наприклад, лабіринтове ущільнення, яке мінімізує контакт масла з магнітною рідиною.

В цілому конкретна конструкція МРГК сильно залежить від осьового розміру штатного ущільнення і від взаємного розташування посадкової поверхні під ущільнення на корпусі і кришці підшипника і маслоскидаючої канавки, розташованої на поверхні вала, які і визначають можливі осьові розміри як лабіринтового ущільнення (і кількість канавок в ньому), так і власне МРГК. При цьому кількість канавок в лабіринтовому ущільненні може коливатися від 1 до 4.

Проведені ресурсні випробування конструкцій МРГК, аналогічних показаним на рисунку 2.12, свідчать, що найкращі результати були отримані при трьохканавковому лабіринтовому ущільненні [306]. Виконання четвертої канавки вже практично не впливає на контакт МР з ущільнювальним

середовищем. У той же час одно- і двохканавкові ущільнення також запобігають контакту ущільнюваного середовища з основним МРГ, але не так ефективно як трьохканавкові. Однак при виконанні модернізації електродвигунів і відсутності конструктивної можливості установки трьохканавкового лабіринту дані попередні ущільнення також вирішували завдання забезпечення герметичності технологічного устаткування.

Особливістю даних конструкцій МРГК є можливість працювати при швидкостях в зазорі до 35 м/с. Для цих досить великих швидкостей використовуються штатні ущільнення безконтактного типу. Але вони на відміну від МРГК не можуть забезпечити повної герметичності. Впровадження МРГК дозволяє запобігти витоку масла та інших небезпечних речовин. Позитивним ефектом є застосування МРГК на вибухонебезпечних виробництвах (галузеві інститути такий дозвіл для МРГК видали). За рахунок забезпечення практично стовідсоткової герметичності покращуються умови експлуатації та рівень техногенно-екологічної безпеки.

Багатофункціональність даного стенду дозволила проводити випробування з урахуванням досвіду експлуатації та монтажу МРГК. На цьому ж стенді проводився вибір манжет (рис. 2.11) для попередньої ступені МРГК.

Також на ньому була перевірена адекватність теоретичної моделі, розробленої в підрозділі 3.2. Для цього в МР на основі вакуумного масла VM-3 і кремнійорганіки ПЕС-3 послідовно додавалися мікронні частки карбонільного заліза в співвідношеннях 1 г, 2 г, 2,5 г і 3 г на 10 мл магнітної рідини. Аналіз інтенсивності тепловиділення в зазорі показав, що працездатність МРГК зберігається при концентрації карбонільного заліза, яка не перевищує 1 г на 10 мл МР.

Отримана бідисперсна магнітна рідина додавалася в робочий зазор МРГК, конструкція якого показана на рисунку 2.12 б. Випробування проводилися для вала діаметром 160 мм і при 3000 об/хв. Результати

випробувань з вивчення залежності температури МР в зазорі протягом 2 годин після запуску наведені на рисунку 4.44. Випробування при концентрації 3 г карбонільного заліза були перервані достроково через швидке досягнення критичної температури.

Відмінностей в динаміці набору температури для двох основ МР помічено не було, як і залежності від початкової температури. Випробування проводилися в різні пори року і температура в робочому зазорі в кінці випробувань відрізнялася від температури навколишнього середовища не більше ніж на 10 °С, що характерно і для звичайних МР без додавання мікронних частинок. З розгляду рисунку 4.44 випливає, що працездатність МРГК зберігається тільки при додаванні 1 г мікронних частинок на 10 мл МР.

Аналіз порівняльних випробувань МРГК для комбайна УКД 200-250, організованих розробником даного вугільного комбайна – ДП «ДОНГІПРОВУГЛЕМАШ», представлені в Додатку Е. Результати дослідно-промислових випробувань різних конструкцій МРГК будуть проаналізовані в розділі 7 спільно з досвідом впровадження та експлуатації МРГК.

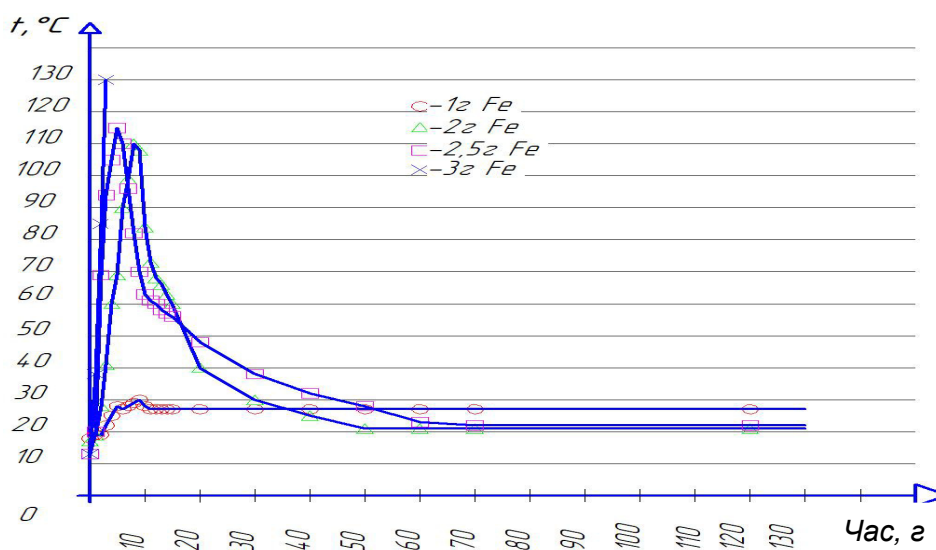


Рисунок 4.44 – Залежність температури в робочому зазорі МРГК від часу при різній концентрації карбонільного заліза в бідисперсній МР



#### 4.10 Висновки до розділу 4

1. Експериментально отримані криві намагнічування, а також частотні і температурні залежності магнітної сприйнятливості для кожного типу МР, які застосовувались в роботі, що послужило основою для дослідження процесів структуроутворення і седиментаційної стійкості МР.

2. Отримала подальший розвиток методика дослідження впливу характеру температурної залежності магнітної сприйнятливості на ступінь упорядкованого стану наночастинок з урахуванням особливостей технічних МР, що важливо для підвищення працездатності і екологічної безпеки обладнання.

3. Обґрунтовано можливість створення МР, що задовольняє суперечливим вимогам: малі розміри одиночних частинок і низька концентрація агрегатів поєднуються з прийнятними значеннями намагніченості насичення і в'язкості.

4. Якісних відмінностей дослідженої МР від відомих рідин типу «магнетит – рідкий вуглеводень – олеїнова кислота» не виявлено. Однак кількісні відмінності істотні. Вони стосуються, в першу чергу, дисперсного складу частинок і концентрації агрегатів. У дослідженому колоїді переважають поодинокі частинки з середнім діаметром магнітного ядра близько 8 нм, що істотно менше, ніж у типових МР. Об'ємна концентрація наноскопічних агрегатів також мала: їх сумарний внесок в початкову магнітну сприйнятливість рідини лише трохи перевищує 3 %. Малі розміри частинок і низька концентрація агрегатів забезпечують високу стабільність колоїдного розчину в сильному магнітному полі і полі відцентрових сил при тому, що намагніченість насичення розчину залишається досить високою.

5. Вперше були проведені дослідження особливостей намагнічування, залишкової намагніченості і залежності її від часу для магнітних колоїдних наносистем, перехід дисперсійного середовища яких з рідкого стану в

твердий здійснюється при кімнатних температурах. Блокування броунівських ступенів свободи частинок дозволило отримати додаткову інформацію про механізми релаксації магнітних моментів наночастинок.

6. Доведено, що вплив електричного поля на технічні МР призводить до розвитку в них процесів структуроутворення, що дозволяє зробити висновок про можливість управління магнітними властивостями МР.

7. На основі вивчення розподілу частинок за розмірами і особливостей кривих намагнічування зроблено висновок, що розмір наночастинок в стійкій магнітній рідині не повинен перевищувати 10 нм, причому кількість частинок діаметром більше 15 нм повинна становити не більше 5 % від загального числа. Це забезпечить високу седиментаційну стійкість в магнітних полях 2 – 2.5 Тл. Великі частинки можна вилучати шляхом центрифугування при різних режимах, що в певних межах дозволяє регулювати їх розмір.

8. Експериментально доведено, що МР, що задовольняє умовам згідно п. 4 і п.7, зберігає свою седиментаційну стійкість і придатність для застосування в експлуатаційних умовах протягом не менше 15 років.

9. Доведено, що дія магнітного поля уповільнює випаровуваність магнітної рідини в порівнянні з її дисперсійним середовищем. Відповідно до існуючої сильної залежності випаровування МР від випаровування її дисперсійного середовища з метою забезпечення заданого рівня працездатності, терміну служби до капремонту та техногенної безпеки МРГК необхідно обирати маловипаровувані рідини в якості рідкої основи МР.

10. Запропоновано і реалізовано на експериментальній установці відносно простий метод експрес-аналізу динамічних характеристик магнітної рідини, що знаходиться в неоднорідному магнітному полі і в умовах, близьких до тих, які реалізуються в активній зоні герметизатора обертового вала. В основі цього методу лежить силовий вплив неоднорідного магнітного поля на магнітні наночастинки в рідині. В якості діагностичних параметрів,

що характеризують динамічні процеси в рідині та визначаються за результатами вимірювання магнітної сили, запропоновано використовувати такі три параметри, що характеризують відповідно величину відносної зміни цієї сили протягом досліджуваного інтервалу часу, час зміни цієї магнітної сили і швидкість її зміни. Виходячи з отриманих даних і досвіду експлуатації МРГ зроблено висновок, що седиментаційною стійкістю буде володіти та магнітна рідина, зміна магнітної сили для якої протягом 10 – 15 хв не перевищить 3 %.

11. Для виключення впливу неконтрольованих факторів при виготовленні зразків МР розроблена технологія отримання магнітних наноколоїдів з однієї партії з різним часом центрифугування для вивчення впливу розмірів наночастинок магнетиту на стабільність МР. Підтверджено, що стадія центрифугування є обов'язковою для отримання стійкої і стабільної МР.

12. Експериментально досліджена в'язкість МР як функція напруженості магнітного поля. Показано, що інтенсивність збільшення в'язкості залежить від кількості і розмірів великих часток в МР.

13. За результатами аналізу експериментальних даних доведено, що для промислових МР, які пройшли експлуатаційну перевірку в складі МРГ, величина відносної ефективної в'язкості не перевищує 2,5. Рекомендоване значення відносної в'язкості  $1 < K \leq 2,5$ . Відносна ефективна в'язкість МР запропонована як критерій якості рідини, а також працездатності і безпеки герметизатора. Запропонований метод вигідно відрізняється простотою реалізації, відсутністю дорогого спеціалізованого обладнання і може бути легко реалізований на будь-якому підприємстві, що експлуатує магніторідинні пристрої.

14. Дослідженнями на експериментальних стендах перевірена сумісність МР з ущільнювальним середовищем; обґрунтовано вибір типу і конструктивні виконання попередньої ступені МРГК; перевірена адекватність теоретичних моделей, розроблених в Розділі 3.

Основні наукові і практичні результати, представлені в цьому розділі, в повній мірі відображені в публікаціях автора [177, 183, 184, 189, 193, 200, 210, 215, 217, 218, 227–229, 238, 268–272, 276–285, 290–292, 297–299, 301, 303–306].

## РОЗДІЛ 5

### РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ У ЗАЗОРІ ЩОДО УМОВ ТЕХНО- ЕКОБЕЗПЕКИ ПРИ МАГНІТОРІДИННІЙ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ

#### 5.1 Результати комплексного дослідження впливу магнітних, електричних і гідродинамічних полів в магніторідинному герметизаторі на його працездатність

Розрахункова область типової конструкції МРГ показана на рис. 2.18. Розрахунок процесів, що відбуваються в активній зоні герметизатора виконувався послідовно в три етапи, що було обгрунтовано в підрозділі 2.4.

Для вирішення магнітної задачі, в першу чергу, потрібно визначити розподіл силових ліній магнітного поля і магнітної індукції.

Розподіл силових ліній магнітного поля (ізолінії  $A_{\varphi r}$ ), і магнітної індукції (в кольорі та стрілками) в магнітній системі МРГ показано на рисунку 5.1 *a*. На рисунку 5.1 *б* відображено розподіл радіальної складової магнітної індукції на поверхні валу. Отже, наявність зубцевої структури на поверхні полюсів створює різко неоднорідне поле в зазорі з максимальним значенням  $B = 2,25$  Тл на поверхні валу в області зубців.

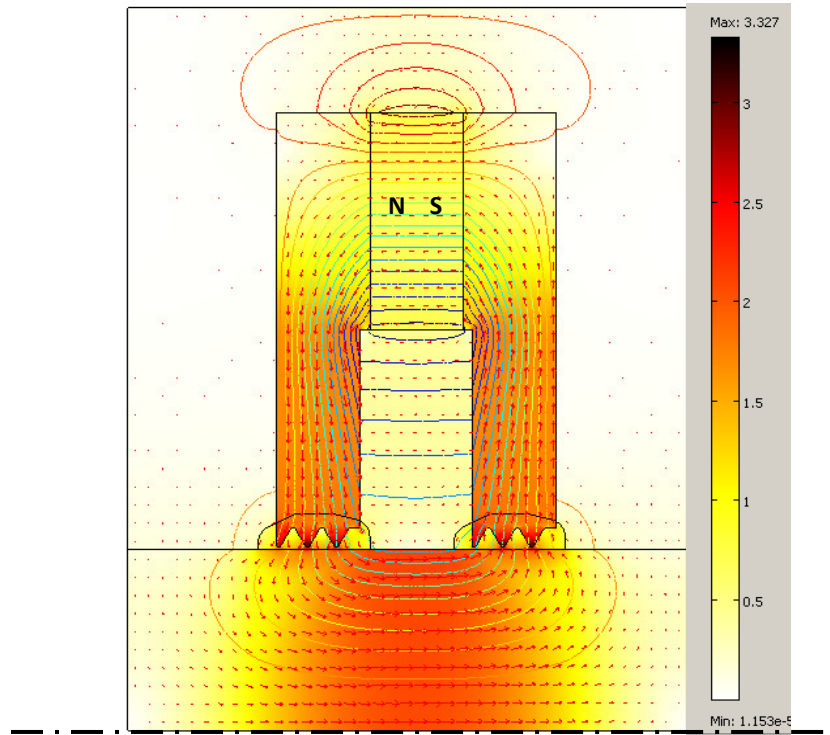
Як відомо величина тиску в магнітній рідині в статиці, що знаходиться в магнітному полі, визначається за формулою [53, 57]:

$$p = \int_0^B M dB + C, \quad (5.1)$$

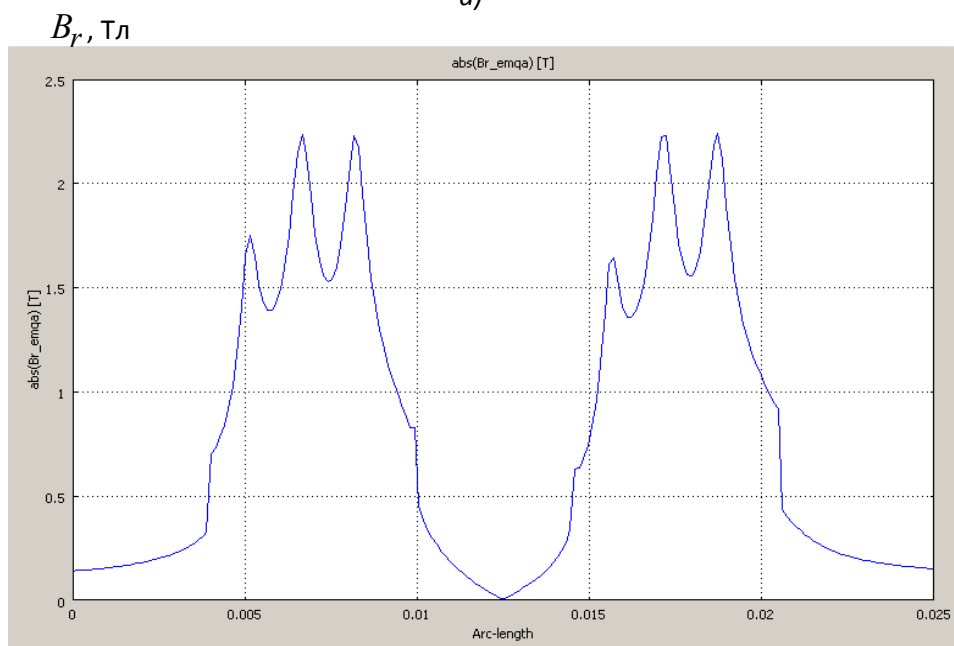
де  $M$  – намагніченість магнітної рідини, А/м;

$B = |\mathbf{B}|$  - магнітна індукція, Тл;

$C$  – константа, що визначається граничними умовами.



а)



б)

Рисунок 5.1 – Розподіл в активній зоні МРГ силових ліній (ізолінії  $A_{\varphi r}$ ), вектора магнітної індукції (кольором та стрілками) (а) і розподіл радіальної складової магнітної індукції на поверхні валу (б)

Припускаючи, що рідина є насиченою, з виразу (5.1) одержимо

$$p = M_s B + C. \quad (5.2)$$

Звідси видно, що лінії рівного тиску (ізобари) при прийнятих умовах співпадають з лініями рівного значення  $B$ .

На рисунку 5.2 показано розподіл магнітної індукції на поверхні валу під одним полюсом в області, де знаходиться магнітна рідина. Видно, що максимальне поле, рівне 2,25 Тл, локалізовано в приповерхневій області середнього та правого зубців. Поле під крайнім лівим зубцем трохи ослаблене (становить 1,65 Тл) через прояв крайового ефекту, пов'язаного з випинанням силових ліній на кінцях полюсів. Розподіл ізоліній  $B$  (або співпадаючих з ними ізобар  $M_s B$ ) дозволяє приблизно визначити конфігурацію магнітної рідини при наявності осьового перепаду зовнішнього тиску [55].

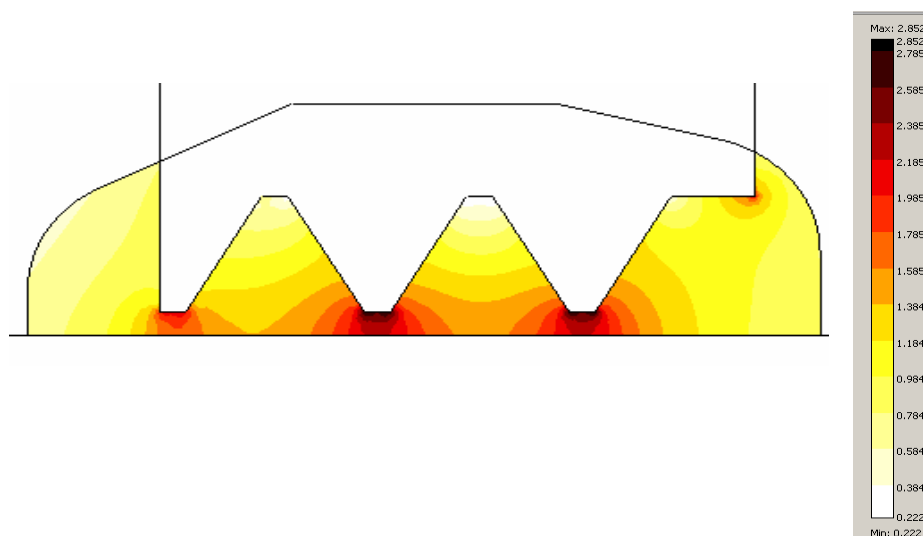


Рисунок 5.2 – Розподіл ізоліній магнітної індукції у магнітній рідині під одним полюсом

Вільна поверхня магнітної рідини, що знаходиться в зазорі МРТ, у статичному стані (випадок нерухомого валу) буде обмежуватися лініями

рівного значення  $B$ . Причому, залежно від об'єму введеної в зазор рідини, займана нею область буде різною, але завжди буде обмежуватися ізолініями рівного значення  $B$ . На рисунку 5.3 показано розрахункову область з рідиною в статистиці та у відсутності осьового перепаду тиску МРГ для різного об'єму рідини. У випадку малого об'єму (рис. 5.3 а) область з рідиною буде обмежуватися ізолініями великого значення поля (1,8 Тл) і буде локалізована в зазорі безпосередньо під двома внутрішніми зубцями. Із збільшенням об'єму рідини ця область буде збільшуватися, займаючи практично увесь зазор для випадку, що відповідає  $B = 0,8$  Тл (рис. 5.3 е).

Величина магнітної сили, що діє на одиницю об'єму магнітної рідини в неоднорідному магнітному полі, визначається таким виразом [55, 57]:

$$\mathbf{f}_m = \mu_0 (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{H}. \quad (5.3)$$

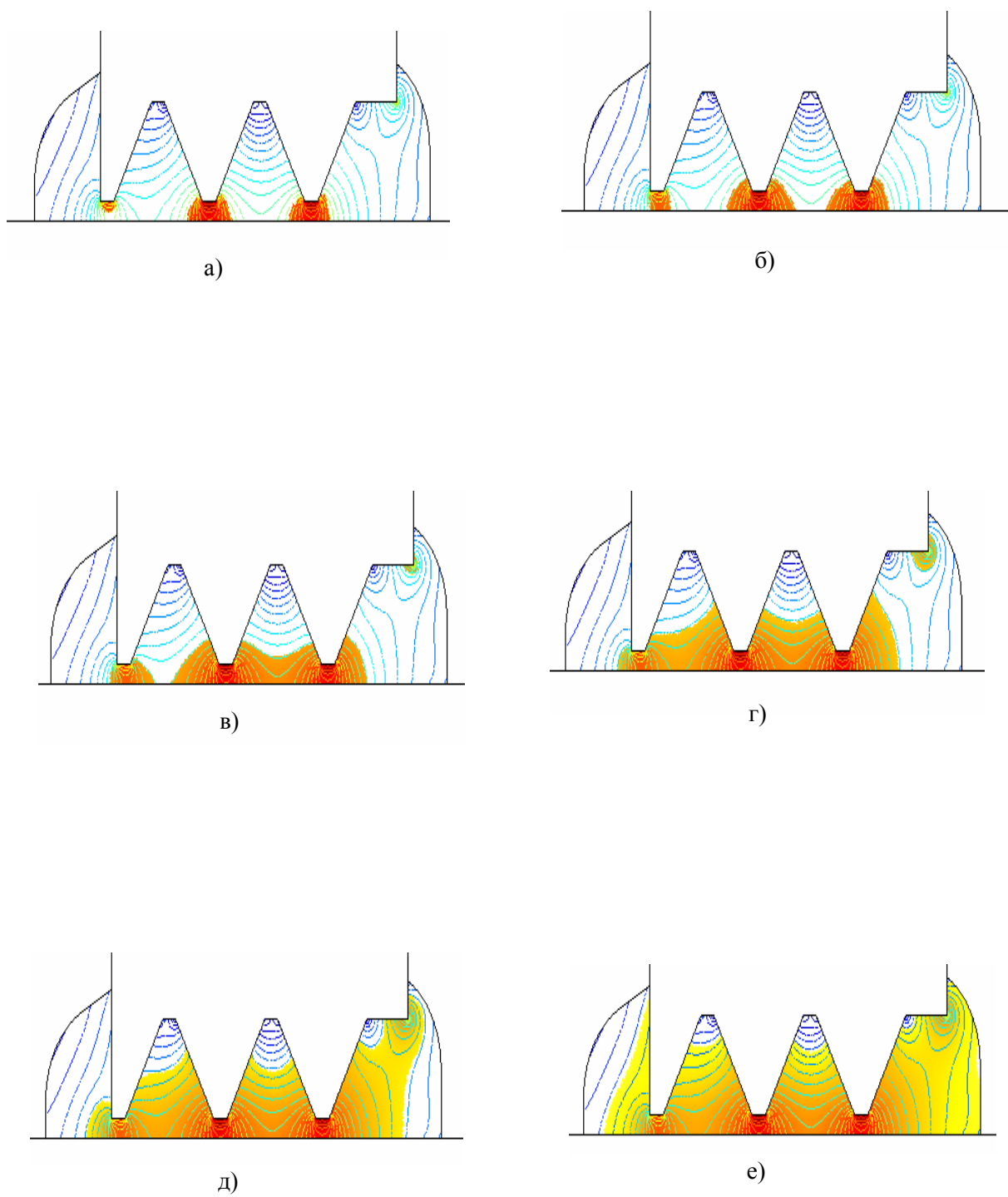
Припускаючи, що вектори  $\mathbf{M}$  та  $\mathbf{H}$  паралельні, тобто справедлива рівність  $\nabla(\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) = 2(\mathbf{H} \cdot \nabla) \mathbf{H}$   $\mathbf{M} = M\mathbf{H}/|\mathbf{H}|$ , і використовуючи векторну тотожність [307], отримують вираз для сили (1.6) у вигляді

$$\mathbf{f}_m = \mu_0 M \nabla H, \text{ де } M = |\mathbf{M}|, \quad H = |\mathbf{H}|. \quad (5.4)$$

Розподіл вектору  $\mathbf{f}_m$ , обчислений за виразом (5.4), у зазорі магнітної системи в припущенні, що увесь він заповнений магнітною рідиною з намагніченістю насичення  $M_s = 30$  кА/м, показано на рисунку 5.4. Видно, що магнітна сила прагне втягти рідину в малу область, розташовану під зубцями магнітних полюсів. Максимальне значення цієї сили становить  $4 \cdot 10^8$  Н/м<sup>3</sup>. Одержаний розподіл об'ємної густини магнітних сил буде використовуватися далі при розв'язанні гідродинамічної задачі.

Для чисельного розв'язання системи (2.29) з урахуванням зазначених граничних умов використовувався метод кінцевих елементів, реалізований у пакеті програм Comsol [226].





Магнітна індукція, Тл: а) – 1,8, б) – 1,6, в) – 1,4, г) – 1,2,  
 д) – 1,0, е) – 0,8

Рисунок 5.3 – Різний об'єм, що займає магнітна рідина під  
 одним полюсом при осьовому перепаді тиску  $\Delta\rho=0$

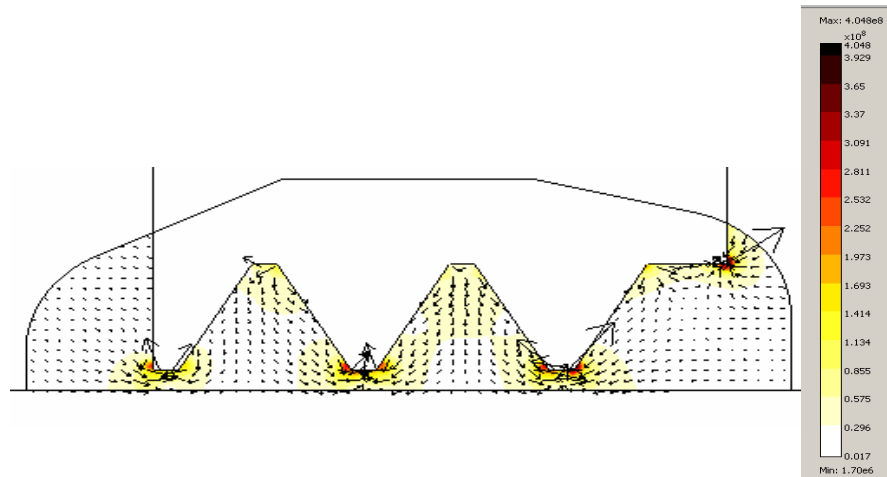


Рисунок 5.4 – Розподіл вектору об'ємної густини магнітної сили  $\mathbf{f}_m$  в магнітній рідині (показаний стрілками та кольором) при  $M_s = 30$  кА/м

При розрахунках задавалися наступні параметри рідини:  $\rho = 1122$  кг/м<sup>3</sup>,  $\eta_{|B=0} = 0,85$  Па·с.

Розподіл азимутальної складової швидкості  $u_\varphi$  в зазорі магнітної системи показано на рисунку 5.5 при кутовій частоті обертання валу  $\omega = 314$  рад/с. Це відповідає лінійній швидкості на поверхні валу з радіусом  $R = 0,105$  м, що дорівнює  $u_{\varphi,0} = 33$  м/с.

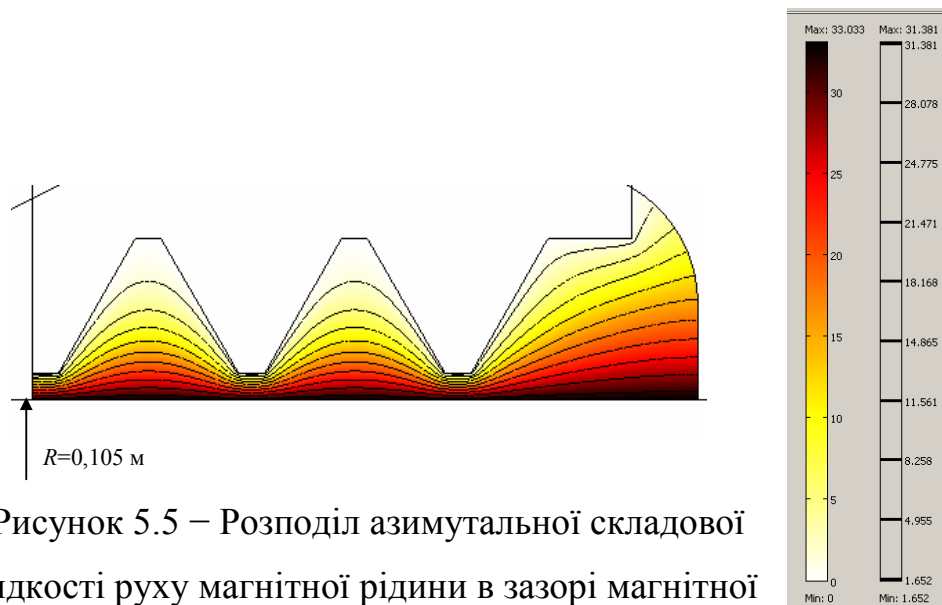


Рисунок 5.5 – Розподіл азимутальної складової швидкості руху магнітної рідини в зазорі магнітної системи при швидкості поверхні  $v_0 = 33$  м/с

З наведених результатів розрахунку видно, що швидкість монотонно зменшується від значення 33 м/с на поверхні валу до нуля на поверхні магнітного полюса. Більш різкі зміни швидкості відбуваються безпосередньо під зубцями магнітної системи, тобто в областях з мінімальним зазором. Цей висновок потрібно враховувати при вирішенні екологічних питань безпеки.

На рисунку 5.6 показано вихрові структури, що виникають у магнітній рідині та утворюються радіальною і азимутальною компонентами швидкості. Як видно, структура з найбільшою вихровою швидкістю, рівною 0,34 м/с, виникає в крайній правій області, що обумовлено наявністю великої за розмірами вільної границі рідини. У двох інших пазових областях також виникають вихрові структури, однак максимальне значення швидкості в них становить приблизно 0,1 м/с, що обумовлено інтенсивним гальмуванням рідини об прилеглі стінки магнітопроводу.

При вирішенні електричної задачі питома електропровідність МР змінюється в межах  $\sigma_{fluid} = 10^{-5} - 10^5 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ . Що стосується величини питомої електропровідності магнітних рідин, використовуваних в МРГ, зазначимо таке. У лабораторії діелектричної спектроскопії гетерогенних систем Білоруського державного університету розроблені високочутливий ємнісний вимірювальний перетворювач (датчик) і методика для визначення комплексу діелектричних показників (відносної діелектричної проникності, питомої електричної провідності, тангенса кута діелектричних втрат) магнітних рідин в діапазоні частот електричного поля від 50 Гц до 1 МГц. Досліджено закономірності зміни відносної діелектричної проникності і питомої електричної провідності магнітної рідини на основі гасу в діапазоні частот електричного поля  $10^2 - 10^6$  Гц. Питома електрична провідність магнітної рідини на основі гасу з концентрацією дисперсної фази в МР (3,6 мас.%), виміряна на частоті  $10^2$  Гц, має той же порядок, що і питома електрична провідність на постійному струмі:  $5 \cdot 10^{-7} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ . При цьому

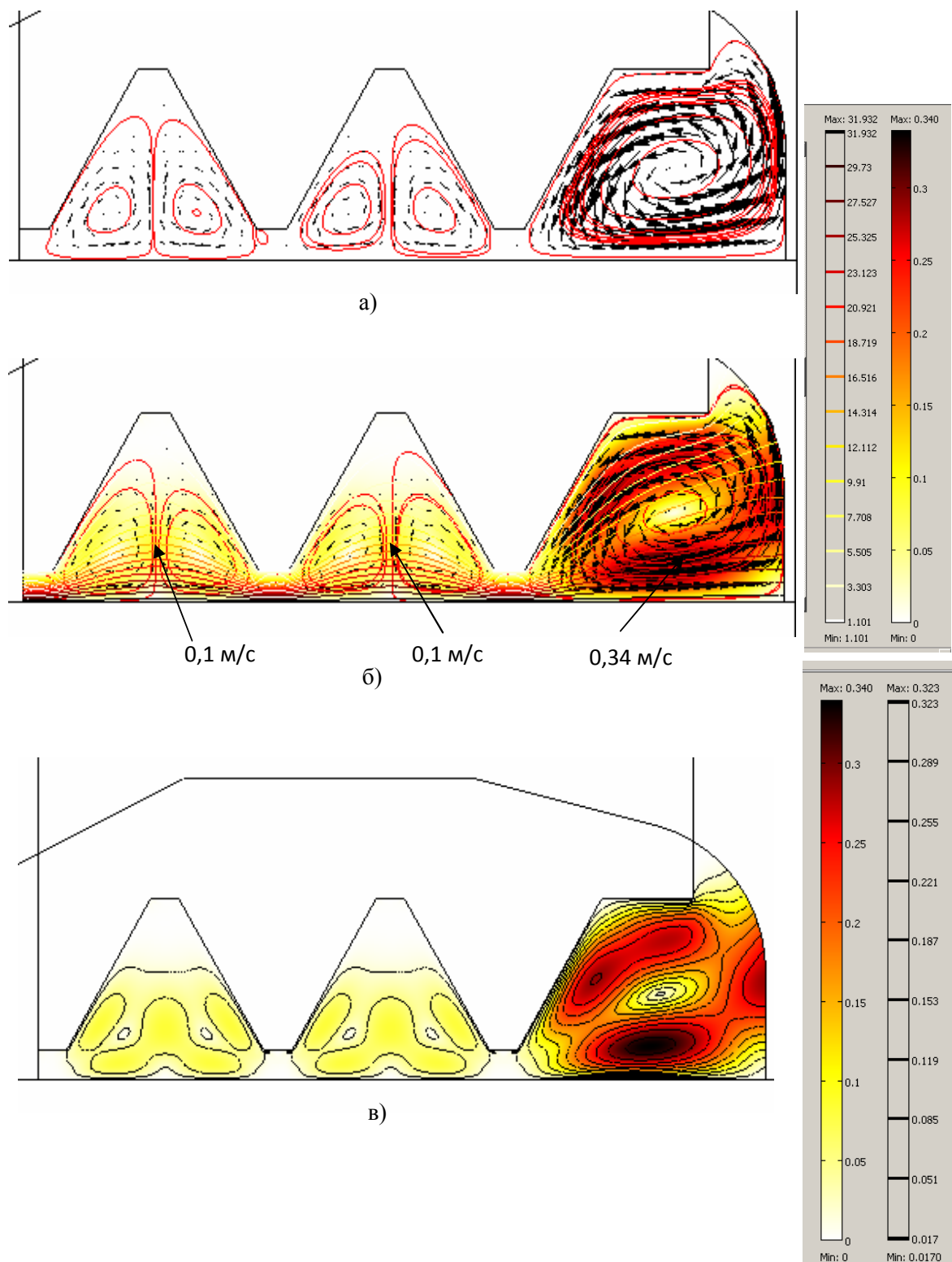


Рисунок 5.6 – Вихрові структури, утворені радіальною  $u_r$  і азимутальною  $u_z$  компонентами швидкості (а); абсолютна величина швидкості  $\sqrt{u_r^2 + u_z^2}$ , показана кольором (б); ізолінії рівного значення  $\sqrt{u_r^2 + u_z^2}$  (в)

питома електрична провідність магнітної рідини на основі гасу при підвищенні концентрації дисперсної фази від 3,6 % до 18,4 % зростає від  $5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  до  $10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . З підвищенням частоти електричного поля від  $10^2$  до  $10^6$  Гц при концентрації дисперсної фази в МР (18,4 %) питома електрична провідність магнітної рідини зростає на порядок: від  $1 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  до  $1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  [93, 308].

Далі за результатами розрахунку магнітного поля визначали розподіл електричного потенціалу  $\phi$ , описуваного рівнянням (2.32), а потім густини струму  $J$ , що обчислюється за виразом (2.30). Результати розрахунків наведені на рисунку 5.7. Джерелом цього струму є ЕРС, наведена в обсязі вала, що обертається в постійному магнітному полі. Замикається цей струм через магнітну рідину і полюса магнітної системи.

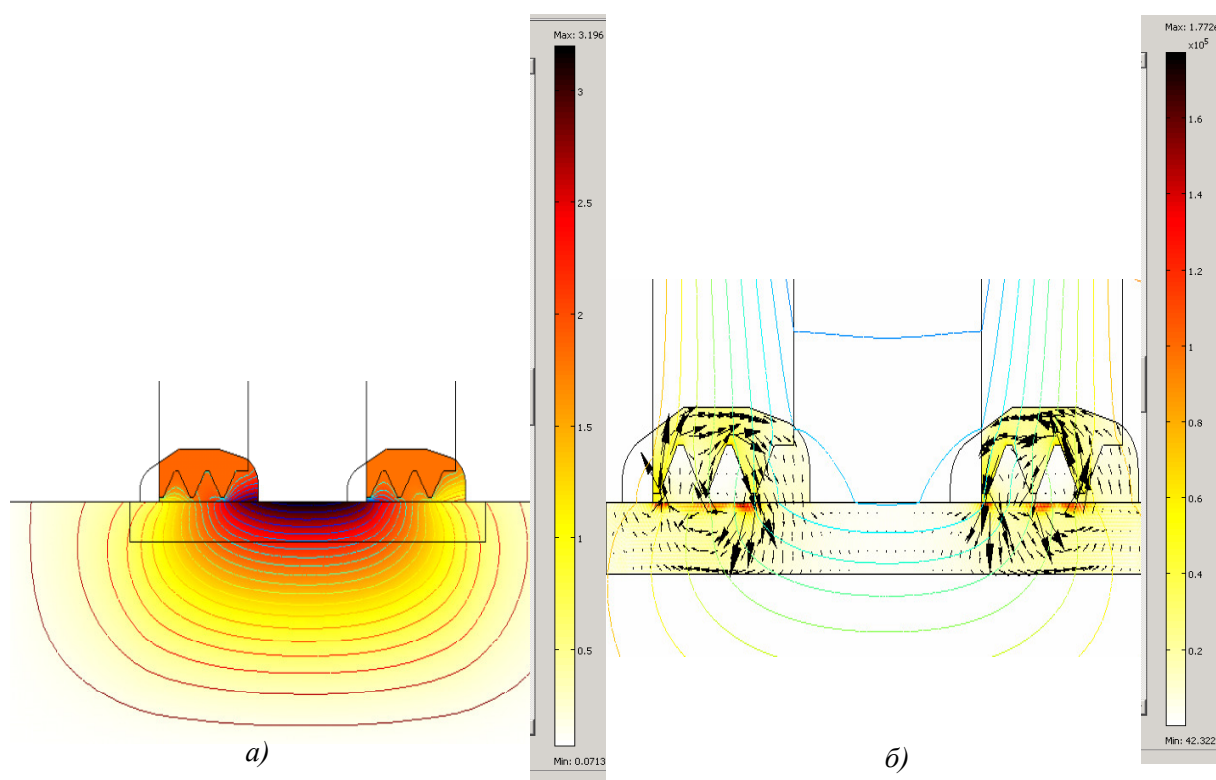


Рисунок 5.7 – Розподіл електричного потенціалу (а) і густини струму (стрілками та кольором) (б) при електропровідності магнітної рідини  $\sigma_{\text{fluid}} = 10^5 \text{ 1}/(\text{Ом} \cdot \text{м})$

За рахунок ЕРС, що виникає під полюсами, електричний потенціал підвищується в центральній області валу до величини 3,2 В. Якщо діелектрична рідина є діелектриком, то в усіх точках валу потенційна складова напруженості електричного поля, що дорівнює  $-\nabla\varphi$ , урівноважується конвективною складовою  $\mathbf{u}\times\mathbf{B}$  та густина струму буде дорівнювати нулю. Якщо магнітна рідина є струмопровідною, тоді виникають дві вихрові структури густини струму, які замикаються по магнітній рідині та полюсам магніту (рис. 5.7 б). Максимальна густина струму в рідині локалізована під крайніми зубцями кожного полюсу. Відповідно в цих місцях густина струму на валу максимальна.

Наявність області з великою густиною струму може потенційно призводити до її локального нагрівання за рахунок джоулевого тепловиділення і до додаткового нагрівання магнітної рідини, яка контактує з цією областю. Ця обставина може негативно позначитися на роботі всього МРГ, що в свою чергу призводить до зменшення рівня екобезпеки.

Очевидно, що величина густини струму, що виникає в активній зоні МРГ, залежить від величини питомої електропровідності магнітної рідини  $\sigma_{fluid}$ . Для кількісного дослідження впливу питомої електропровідності на величину максимальної густини струму виконувалися розрахунки при різних значеннях  $\sigma_{fluid}$ , що змінюються в діапазоні від  $10^{-5} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$  до  $10^5 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ . Результати розрахунків наведено на рисунку 5.8. З оціночних розрахунків випливає, що локальний нагрів зубців на полюсах магнітної системи на 5–10 °С буде відбуватися, при густині струму в зубцях, що перевищує  $10^6 \text{ А/м}^2$ . Таким чином, можна стверджувати, що величина питомої електропровідності магнітної рідини, що використовується в МРГ, повинна бути менше ніж  $10^3 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ . Насправді в промислових МР питома електропровідність на кілька порядків менше цієї величини, тому можна вважати магнітну рідину

діелектриком. Електропровідність МР не впливає на надійність, працездатність та екологічну безпеку МРГ.

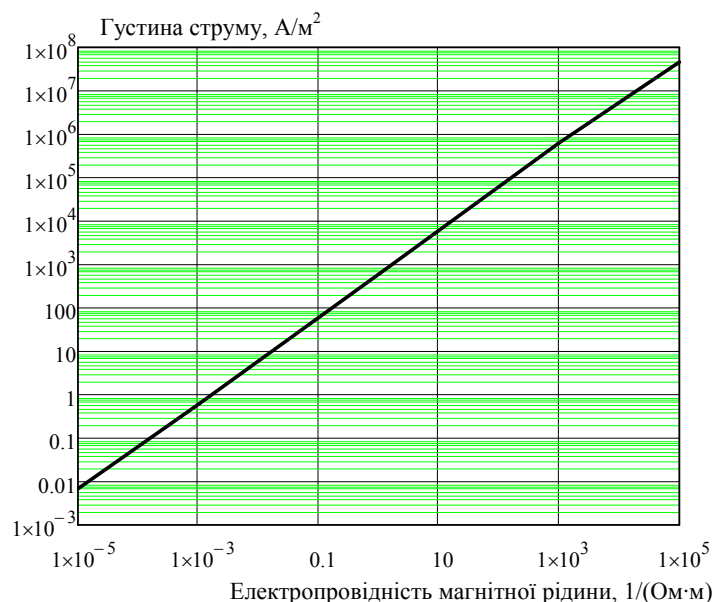


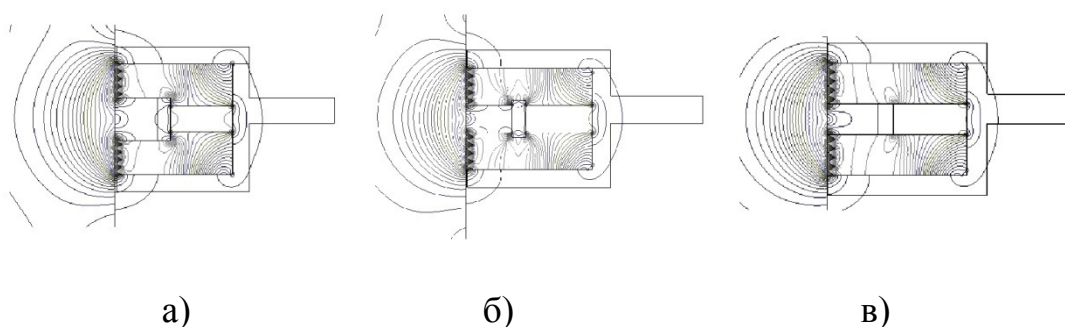
Рисунок 5.8 – Залежність максимального значення густини струму в крайньому зубці полюса від значення електропровідності магнітної рідини

## 5.2 Результати досліджень впливу фізичних полів і конструктивних елементів на екоефективність роботи магніторідинного герметизуючого комплексу

### 5.2.1 Вплив вибору матеріалів деталей магніторідинного герметизуючого комплексу на параметри магнітного поля в робочому зазорі.

Використання розробленої моделі дозволяє оцінювати різні варіанти конструктивного виконання, як деталей, так і всього виробу в цілому, враховувати втрати магнітного потоку, визначати значення магнітної індукції в робочому зазорі й підбирати необхідну кількість магнітів у магнітній системі для забезпечення необхідного утримуваного перепаду тисків (УПТ). Проілюструємо, наскільки навіть зовсім невелика (конструктивно) зміна перерізу магнітопроводу збільшує втрати магнітного поля і приводить до зниження індукції в робочому зазорі.

Як приклад, на рисунку 5.9 наведено розподіл магнітного поля в конструкції МРГ з немагнітним корпусом, сталевими полюсними наконечниками (ПН) з розташованими між ними постійними магнітами і немагнітним роздільним кільцем. Роздільне кільце відокремлює кільцеву міжполюсну порожнину від зони розташування магнітів, зазори між якими зазвичай заповнюються епоксидним компаундом.



а) – ступінчастий ПН, б) – ПН з канавками, в) – плоский ПН

Рисунок 5.9 – Розподіл індукції магнітного поля в МРГ

Для можливості центрування роздільного кільця при збиранні виробу на поверхні ПН, зверненої до магнітів, зазвичай виконується виступ або кільцева канавка. Центрування кільця за допомогою магнітів (поверхня полюсних наконечників плоска) застосовується виключно рідко.

На рисунку 5.9 помітно, що зміна перерізу ПН в місці установки роздільного кільця при інших рівних умовах приводить до втрат магнітного потоку і, в підсумку, до зменшення індукції в робочому зазорі під концентраторами магнітного потоку.

Величина індукції в робочому зазорі для конструкцій, показаних на рисунках 5.9 а і 5.9 б, в порівнянні з конструкцією, показаною на рисунку 5.9 в (плоскі ПН) зменшується на 8-10 %.

Мінімізація втрат магнітного поля особливо важлива при створенні МРГ для високошвидкісних двигунів (частота обертання ротора 1500 об/хв –



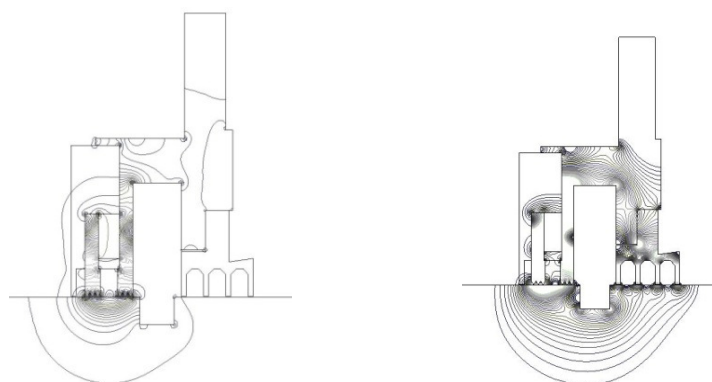
3000 об/хв), так як при високих швидкостях вала відцентрові сили, що діють на магнітну рідину, стають порівнянними з силами внутрішнього магнітного тиску і з'являється ризик «викидання» МР з робочого зазору.

При відпрацюванні загальної конструкції МРГК виникають питання, пов'язані з впливом матеріалів окремих деталей на втрати магнітного поля.

Неправильний вибір матеріалу може різко зменшити індукцію в робочому зазорі герметизатора.

Особливістю конструкції, показаної на рисунку 5.10, є те, що в якості одного з полюсних наконечників МРГ використовується внутрішня частина сталевго корпусу герметизатора. На ній встановлюються магніти з немагнітним роздільним кільцем і другим полюсним наконечником, які закриваються зовні немагнітною кришкою. З тильного боку від МРГК до сталевго корпусу кріпиться лабіринтове ущільнення, виконане у вигляді окремої деталі. Дане ущільнення, зазвичай, виконується з немагнітного матеріалу (алюмінію), більш дорогого, ніж звичайна сталь [309]. Розподіл індукції магнітного поля в деталях герметизатора показано на рисунку 5.10.

Бажання замінити немагнітну деталь на більш дешеву сталеву призводить до різкого ослаблення магнітного поля МРГ.



а) – немагнітне лабіринтове ущільнення, б) – сталеве лабіринтне ущільнення

Рисунок 5.10 – Розподіл індукції магнітного поля в герметизаторі

При розробці МРГ постійно враховується досвід експлуатації і монтажу герметизаторів на різних підприємствах. Треба також забезпечити досягнення високої жорсткості конструкції для збереження точних розмірів під час і після нарізки концентраторів магнітного потоку, які залежать від діаметра вала в місці установки МРГ. Це особливо актуально для МРГ з валами великих діаметрів.

**5.2.2 Вплив величини робочого зазору на параметри МРГК.** За допомогою математичної моделі було розраховано розподіл магнітної індукції в активній зоні МРГ для інтервалу зміни робочого зазору від 0,1 мм до 0,8 мм з кроком 0,1 мм. Висота постійного магніту в цих розрахунках приймалася рівною 10 мм. На рисунку 5.11 показано розподіл магнітної індукції при зазорі 0,2 мм, 0,5 мм і 0,8 мм. Досліджувалися три області - магнітна індукція на поверхні концентратора магнітного потоку або магнітопровода (крива 1), в середині робочого зазору (крива 2) і на поверхні вала (крива 3).

Визначені закономірності розподілу магнітної індукції в особливих зонах робочого зазору. В зонах мінімального зазору між зубцями і валом магнітна індукція максимальна, в області канавок, тобто на кордонах зубців – мінімальна. На зовнішніх кордонах крайніх зубців магнітна індукція нижче, ніж на кордонах середніх зубців. Це пов'язано з проявом кінцевого ефекту і випинанням силових ліній магнітного поля. Магнітна індукція в робочому зазорі змінюється як в аксіальному напрямку, так і в радіальному.

З розгляду рисунку 5.11 видно, що максимум магнітного поля зі збільшенням робочого зазору зменшується з 1,8 Тл при зазорі 0,2 мм до 1,2 Тл при зазорі 0,8 мм. Це зменшення індукції призводить до зниження величини критичного перепаду тиску між внутрішнім і зовнішнім обсягами МРГ, а звідси, до зниження ефективності роботи герметизатора.

На рисунку 5.12 чітко видно відсутність пікових зон, що в цілому свідчить про недостатність магнітного поля для утримання рідини в зазорі

[310]. Цікавим є факт, що при  $\delta > 1,0$  мм вже не можна говорити про різко неоднорідне поле, що досягалось наявністю концентраторів магнітного потоку.

В першу чергу необхідно відзначити прогнозоване зниження індукції. Це видно з аналізу рисунка 5.13.

Одним з можливих шляхів збільшення магнітного поля в робочому зазорі МРГ є збільшення обсягу постійних магнітів. Результати розрахунків магнітного поля для трьох значень висоти постійного магніту при зазорі 0,8 мм показані на рисунку 5.14. З цього рисунка видно, що при великому зазорі і при виборі магнітів більшого обсягу (з висотою 20 мм), можна отримати магнітне поле із середнім значенням 1,75 Тл, тобто практично таке ж поле, як і при малому зазорі (0,2 мм) та висоті магніту (10 мм) (див. рис. 5.11).

Для досліджуваної магнітної системи із застосуванням постійних магнітів зі сплаву Nd-Fe-B з урахуванням досвіду проектування і експлуатації МРГ [311, 312] можна зробити висновок, що створюване магнітне поле на рівні 1,8 Тл здатне забезпечити утримання магнітної рідини в робочому зазорі в статиці при невеликих обертах вала, коли лінійна швидкість в активній зоні герметизатора не перевищує 10 м/с. Це досить часто зустрічається в технологічному обладнанні. У разі великих зазорів для отримання такої величини поля необхідно створювати спеціальну магнітну систему, яка характеризується, по-перше, підвищеним об'ємом постійних магнітів, і, по-друге, реалізацією принципу Хальбаха (коли намагніченість постійних магнітів збігається з напрямком силових ліній магнітного поля). При більш високих лінійних швидкостях в зазорі необхідно проводити комп'ютерне моделювання взаємопов'язаних нелінійних магнітних та гідродинамічних процесів в активній зоні МРГ для кожної з розроблених конструкцій герметизатора.

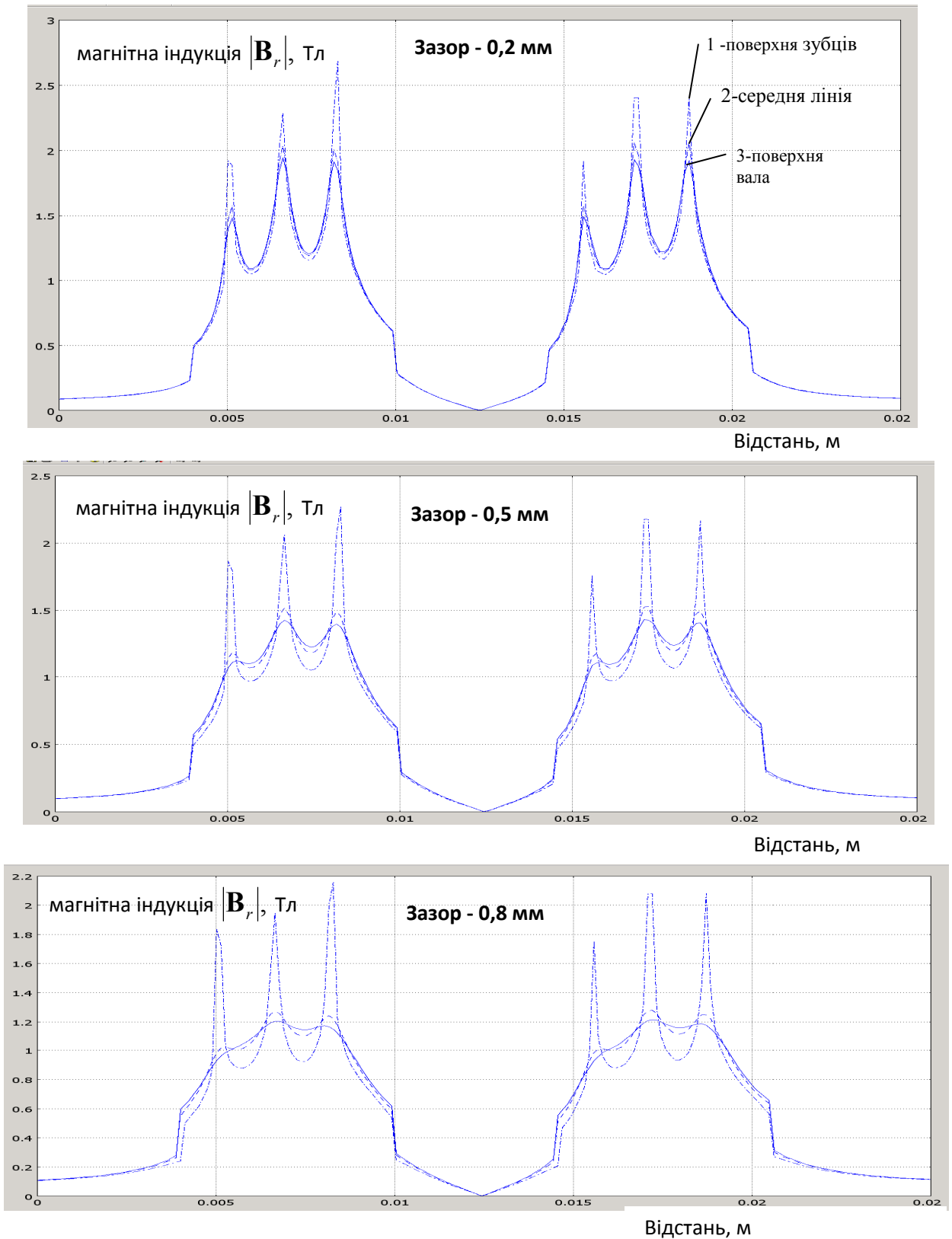


Рисунок 5.11 – Розподіл магнітної індукції в робочому зазорі МРГ при трьох значеннях зазору

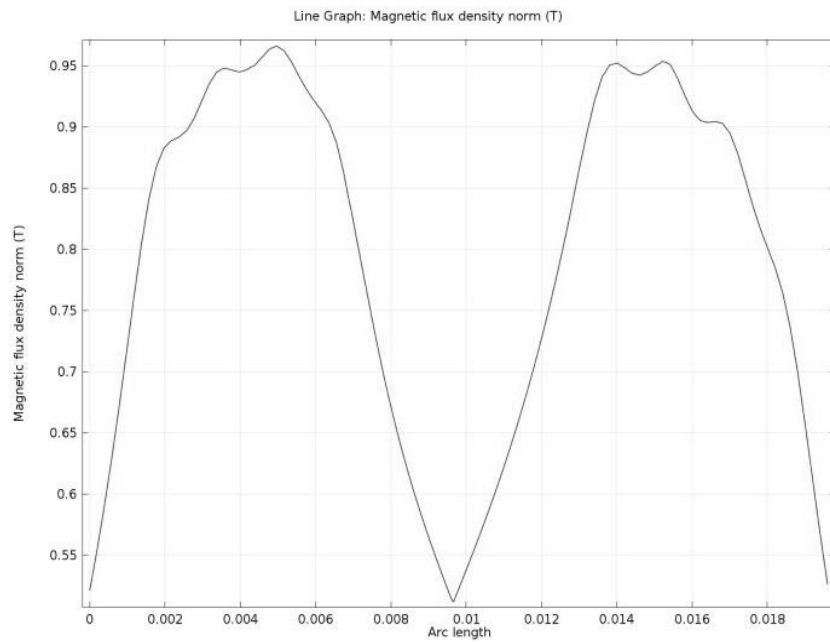
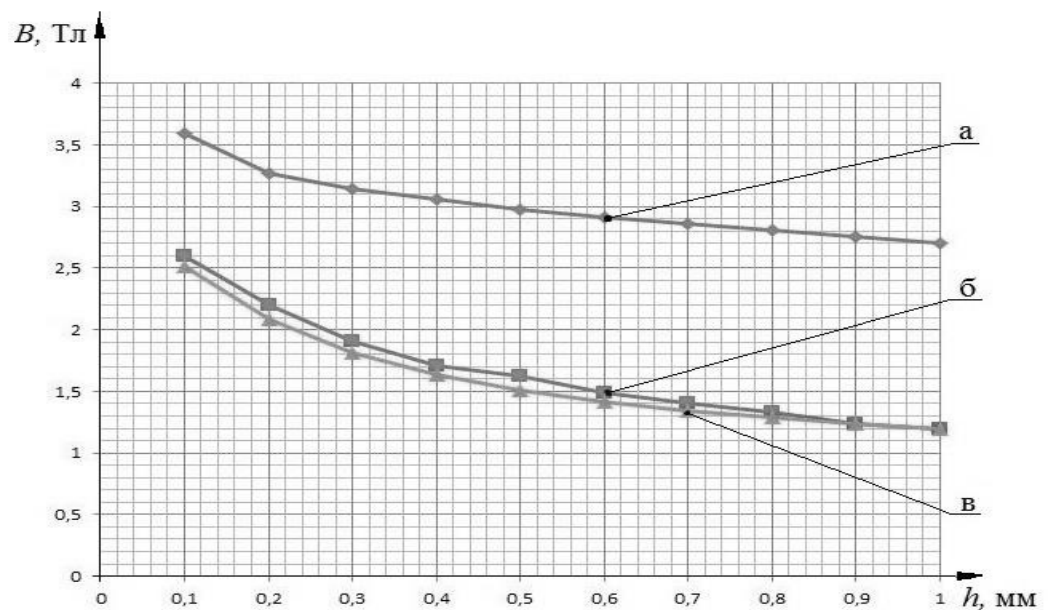


Рисунок 5.12 – Розподіл радіальної компоненти магнітної індукції на поверхні вала при зазорі 1 мм



Магнітна індукція: а) – на зубці магнітопровода, б) – в середині зазора, в) – біля поверхні вала

Рисунок 5.13 – Розподіл індукції магнітного поля від зуба магнітопровода до валу в зазорі

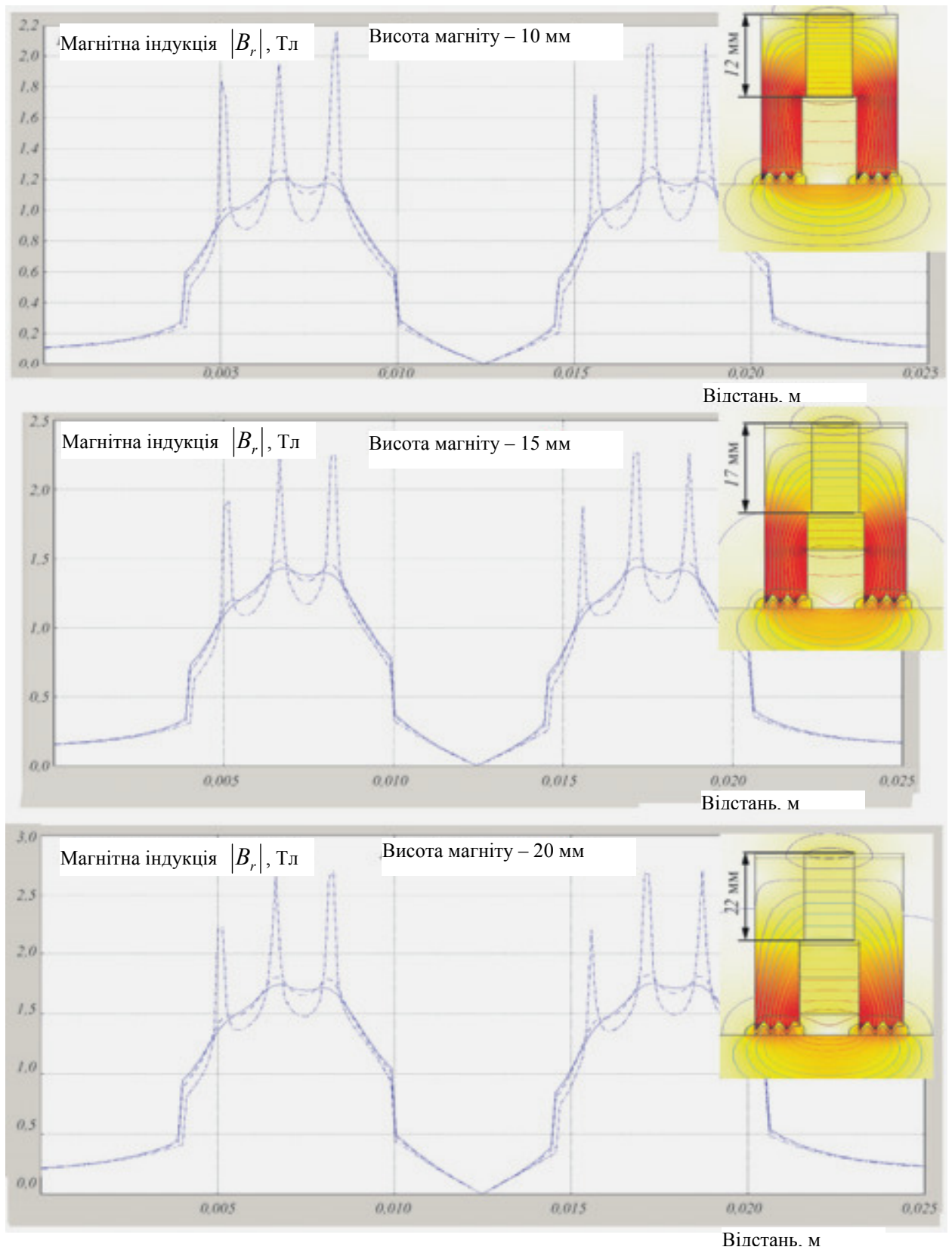
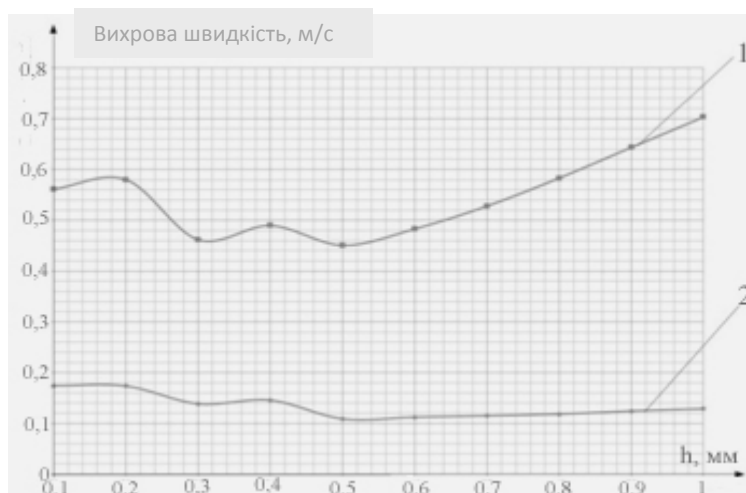


Рисунок 5.14 – Розподіл магнітної індукції в робочому зазорі МРГ при трьох значеннях висоти постійного магніту

На рисунку 5.15 надані результати досліджень залежності максимальної вихрової швидкості в зазорі МРГ від його величини (крива 1) і з урахуванням зміни в'язкості від величини магнітного поля (крива 2) – згідно емпіричної формули з [69].

Звичайно, застосування цієї формули [54, 69] викликає ряд питань, так як в ній не враховані тип магнітної рідини, концентрація дисперсної фази тощо. Більш коректними є експериментальні дослідження.

Тому були додатково проведені розрахунки на підставі експериментальних даних по залежності в'язкості від величини магнітного поля, отриманих в підрозділі 4.7 для МР на основі ВМ-3 і ПЕС-3. Характер кривої залишається таким же, як і для кривої 2 на рисунку 5.15, розбіжності в численних значеннях не перевищили 15 %.



1 – вихрова структура при постійній в'язкості МР; 2 – вихрова структура при змінній в'язкості

Рисунок 5.15 – Максимальні вихрові структури, що виникають в магнітній рідині і утворені радіальною і азимутальною компонентами швидкості в зазорі від 0,1 мм до 1 мм

Якісний аналіз отриманих графіків дозволяє зробити висновок про те, що при великих величинах зазорів сили магнітного поля досить успішно борються з відцентровими силами. Значення максимальної вихрової швидкості зменшується в середньому в 3 рази і найголовніше, що зростання вихрової швидкості при врахуванні зміни в'язкості значно зменшується в порівнянні з кривою 1. Це говорить про принципову можливість розширення області застосування МРГ при роботі на підвищених зазорах.

**5.2.3. Особливості роботи високошвидкісних магніторідинних герметизуючих комплексів.** Досвід стендових випробувань [313] і авторського нагляду за експлуатацією МРГ [284, 285], накопичений в ТОВ «НВВП «Ферогідродинаміка», показує, що проблеми з викидом з зазору МР починаються при перевищенні лінійної швидкості в зазорі величини 15 м/с. Візуально було відзначено, що викид дрібнодисперсних крапель МР відбувається в азимутальному напрямку. Це свідчить про те, що причиною викиду є розвиток нестійкості вільної поверхні. При збільшенні лінійної швидкості до 35 м/с утримати МР в робочій зоні МРГК будь-якої класичної конструкції не вдається. В першу чергу це пов'язано з тим, що при виконанні концентраторів магнітного потоку на магнітопроводах герметизатора дія відцентрових сил збігається з напрямком градієнта магнітної індукції.

Для підвищення працездатності високошвидкісних МРГ необхідно вживати заходи по утриманню МР в робочому зазорі. В деякій мірі виключити вплив відцентрових сил можна за допомогою конструктивних змін МРГК.

Поширенішим і більш ефективним у техніці ущільнювання (гідродинамічні імперлери, лабіринтові, щілинні ущільнення тощо) для зниження впливу відцентрових сил є виконання лабіринтів на валу [45]. За аналогією з цим можна виконати зубцеві концентратори магнітного потоку на валу, а не на магнітопроводі. В цьому випадку відцентрові сили відкидають МР до вершини зубця в область максимального магнітного поля,



що перешкоджає зниженню критичного перепаду тиску і викиду магнітної рідини з зазору.

Для течії Куетта зі складною геометрією робочого зазору на даний час відсутній критерій, що дозволяє класифікувати обертання як стійке або як нестійке [162]. Питання про справжню природу нестійкості течії магнітної рідини в МРГК вирішується в кожному конкретному випадку окремо, так як визначальними є властивості магнітної рідини. Тому характер течії визначається тільки за допомогою прямого чисельного розрахунку.

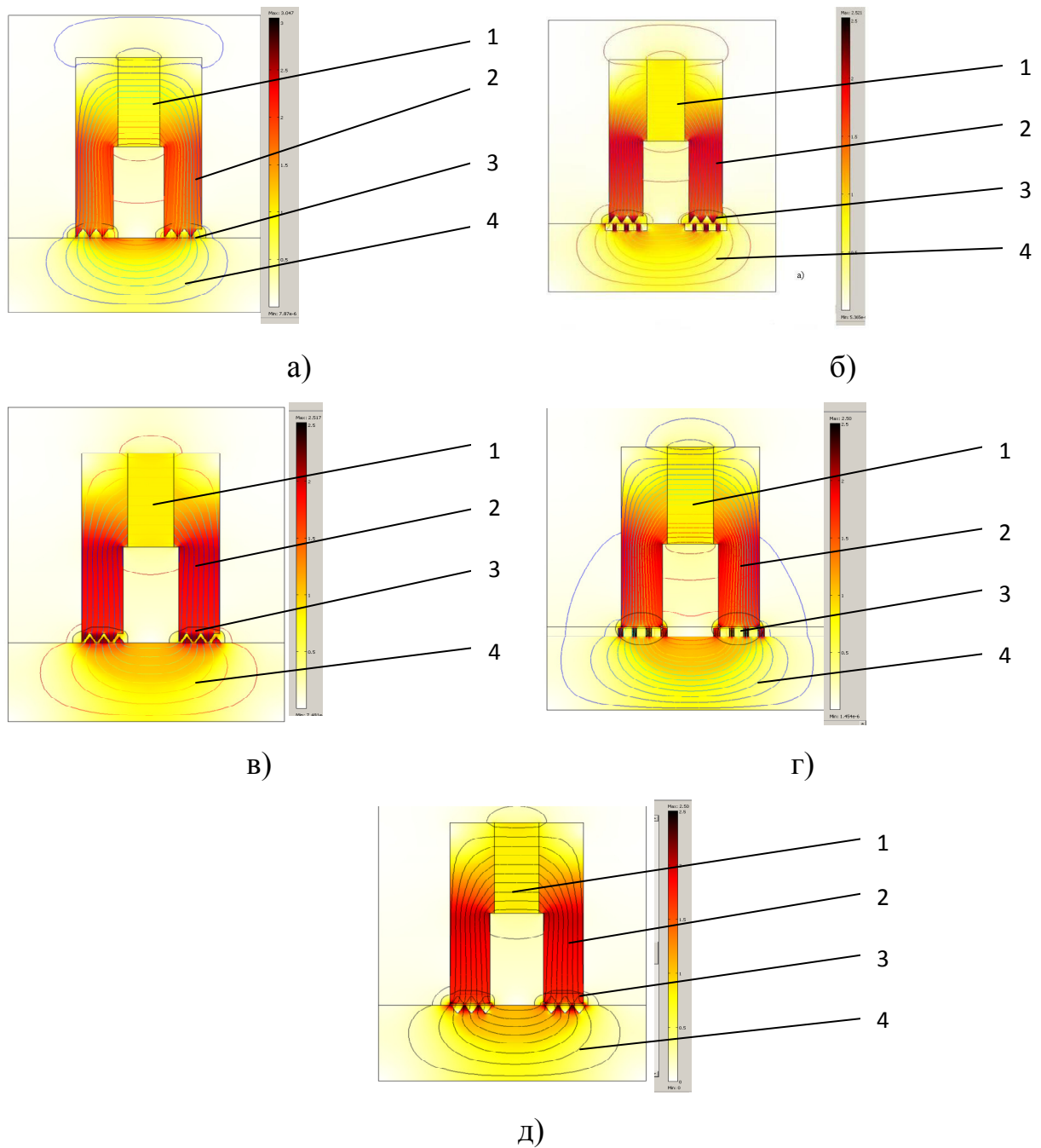
Дослідження проводилися для магнітопроводного валу діаметром 210 мм, частота його обертання становила 3000 об/хв.

Розподіл силових ліній магнітного поля і магнітної індукції показані на рисунку 5.16. На рисунку 5.17 наведено розподіл модуля вектора магнітної індукції під одним концентратором магнітного потоку (полюсом) для різних розрахункових схем.

Криві розподілу магнітної індукції для всіх розглянутих схем мають однотипний хвилеподібний характер. При цьому необхідно відзначити, що розміщення зубців на валу сприяє зменшенню падіння поля під крайнім зовнішнім зубцем полюса (до 10 %), яке завжди виникає через прояви кінцевого ефекту і випинання силових ліній магнітного поля, що є важливим, так як саме через це місце відбувається викид МР [314].

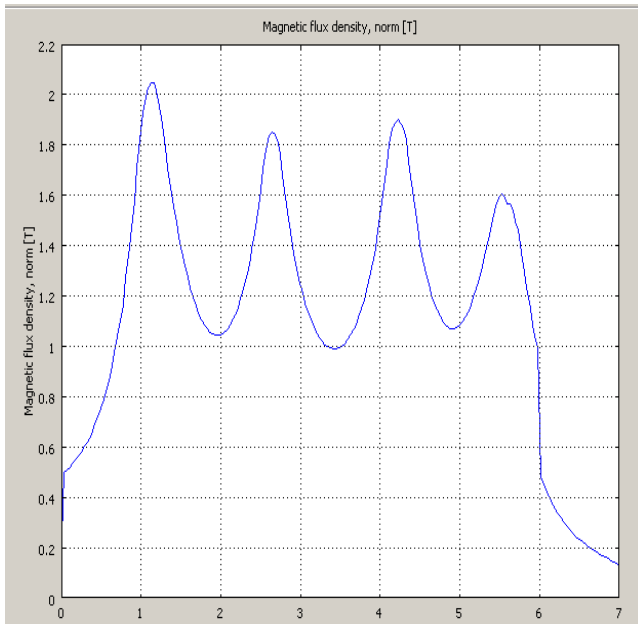
Аналіз рисунка 5.17 б показує зменшення індукції магнітного поля приблизно на 15 % в порівнянні з іншими розглянутими варіантами.

Розподіл азимутальної компоненти швидкості в робочому зазорі показаний на рисунку 5.18. З наведених результатів розрахунку видно, що швидкість монотонно зменшується від значення 33 м/с на поверхні вала до нуля на поверхні магнітного полюса. Більш різка зміна швидкості відбувається під зубцями магнітної системи, тобто в областях з мінімальним зазором. Від швидкості залежить взаємодія магнітних та відцентрових сил. Перевищення відцентрових сил над магнітними призводить до повної

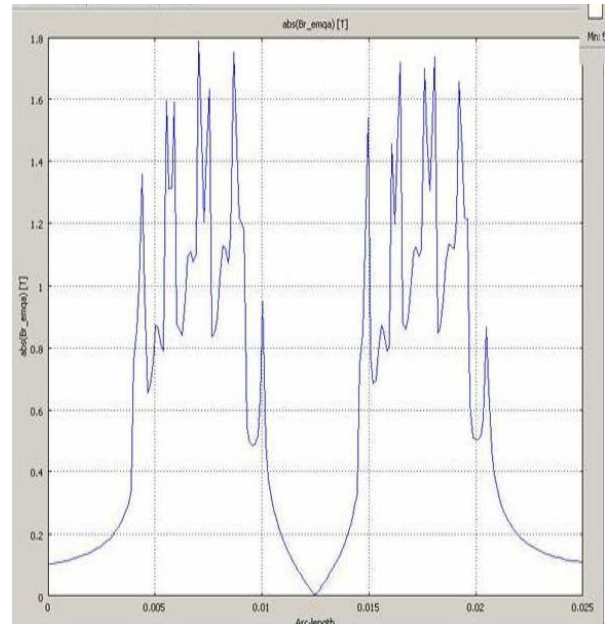


а) – герметизатор класичної конструкції, б) – герметизатор з зубцями на магнітопроводі трапецеподібної форми і «внутрішніми» зубцями прямокутної форми на валу, в) – герметизатор з «внутрішніми» зубцями трапецеподібної форми на валу, г) – герметизатор з «внутрішніми» зубцями циліндричної форми на валу,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

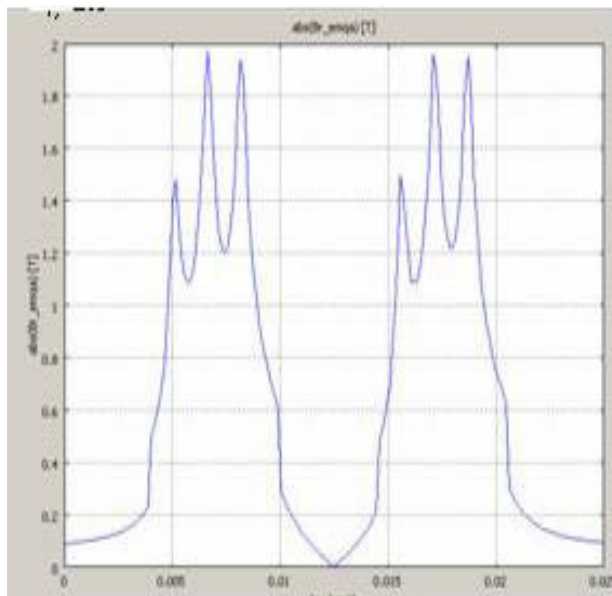
Рисунок 5.16 – Розподіл модуля вектора магнітної індукції (в кольорі) і силових ліній векторного магнітного потенціалу



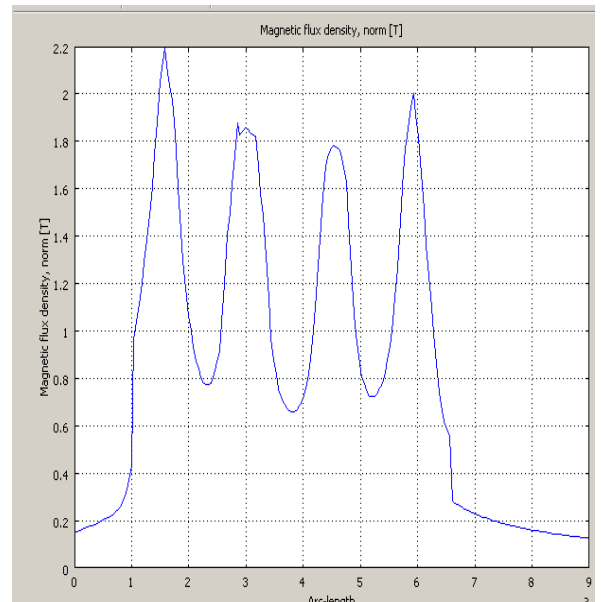
а)



б)



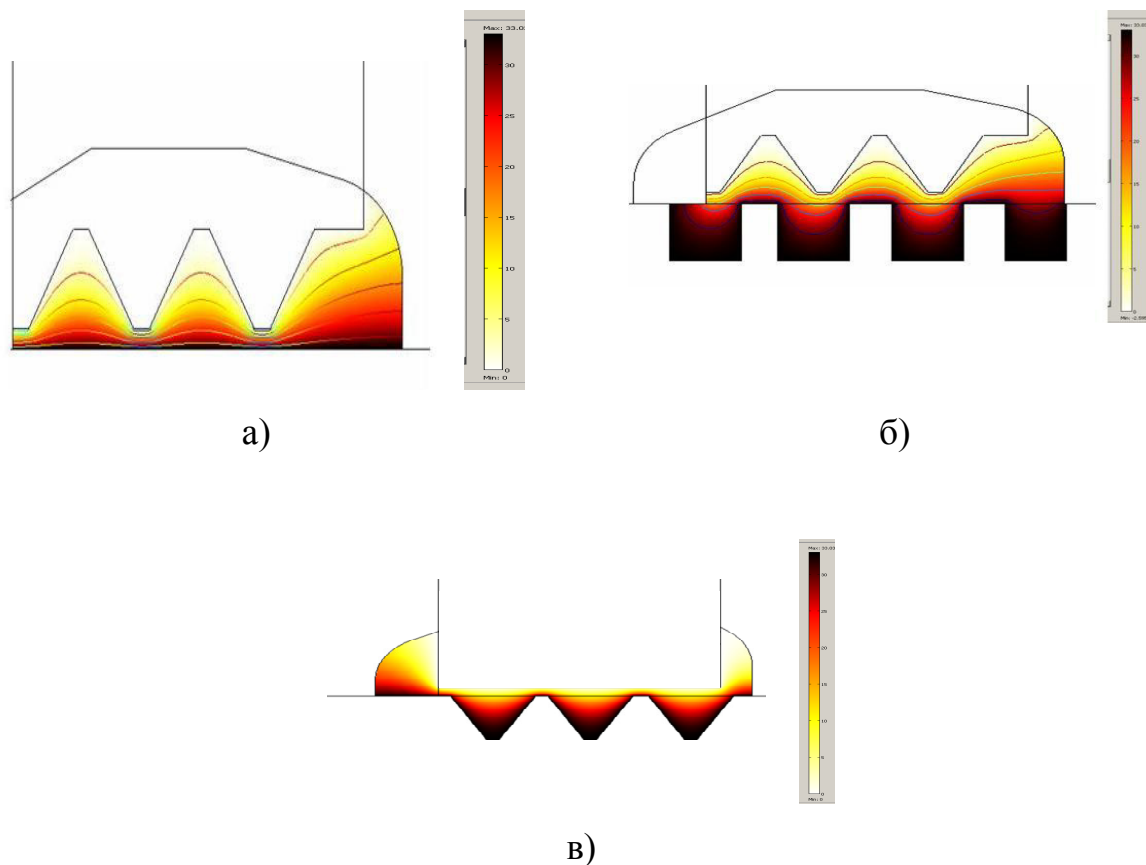
в)



г)

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

Рисунок 5.17 – Розподіл модуля вектора магнітної індукції під одним полюсом герметизатора по середній лінії в зазорі



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

Рисунок 5.18 – Розподіл азимутальної компоненти швидкості течії магнітної рідини в зазорі магнітної системи при швидкості поверхні  $v_O = 33$  м/с

разгерметизації ущільнювальної системи та аварійного викиду шкідливих речовин в атмосферу. З урахуванням того факту, що на всіх небезпечних виробництвах використовується багато небезпечних газоподібних і пароподібних речовин та пилогазових сумішей, ймовірність вибухів та пожеж велика.

Окремо аналізувалось поле швидкостей в кінцевій частині МРГК (крайній зовнішній зубець полюса). З розгляду рисунку 5.18 б, 5.18 в видно,

що величина максимальної швидкості в зазорі для всіх варіантів розміщення концентраторів магнітного потоку на валу нижче, ніж для МРГК традиційної конструкції (рис 5.18 а). Розподіл азимутальної компоненти швидкості при розміщенні на валу зубців трапецеподібної і прямокутної форми практично однаковий, тому на рисунку 5.18 наведено розподіл тільки для одного варіанта. Таким чином, геометрична форма концентраторів магнітного потоку має незначний вплив на розподіл швидкостей в зазорі [315].

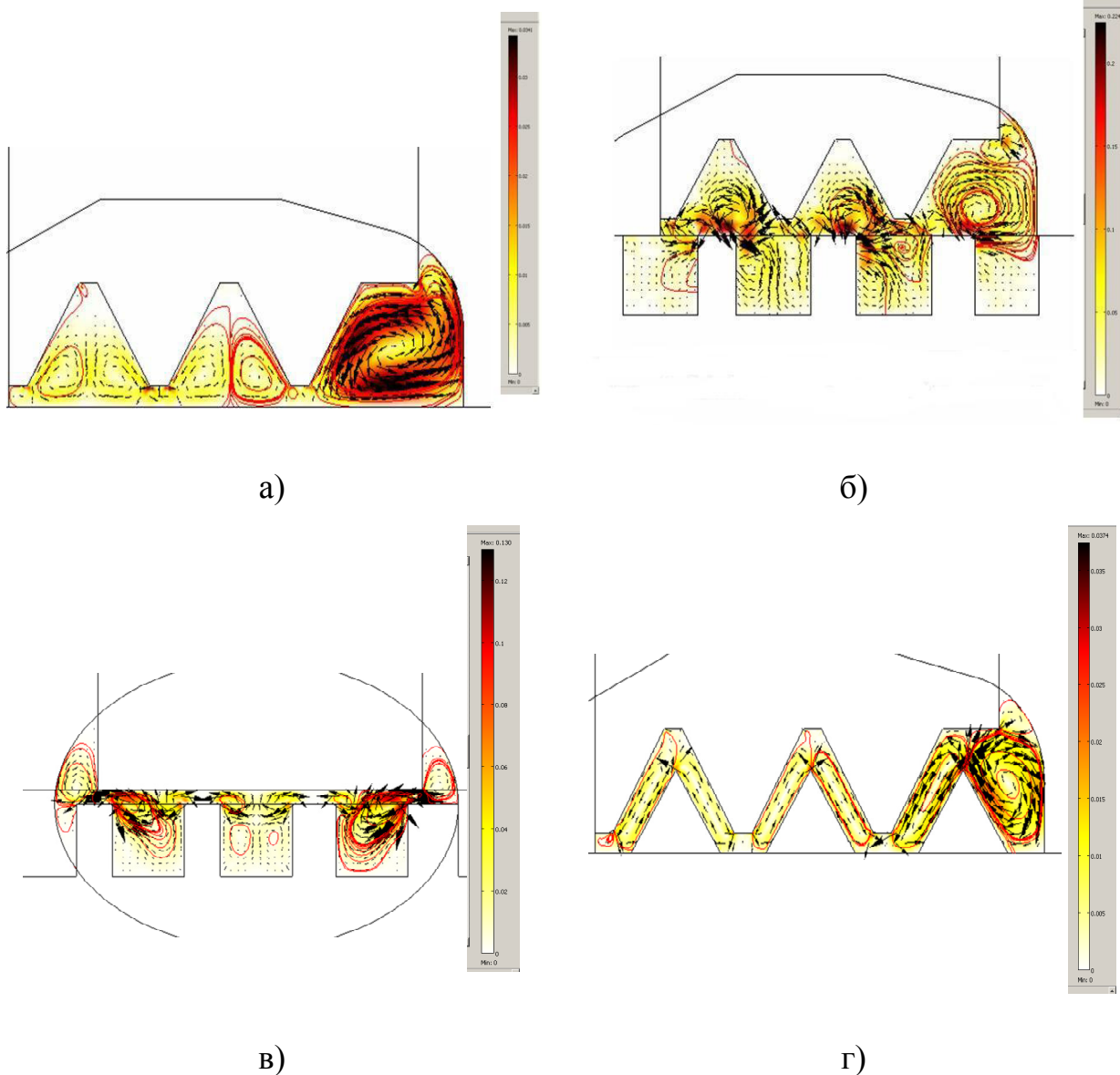
Наступним етапом досліджень був аналіз вихрових структур, які утворюються в магнітній рідині радіальною і азимутальною компонентами швидкості.

Вихрові структури приведені на рисунку 5.19. Зрозуміло, що 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, однак максимальне значення швидкості в них в рази менше, що обумовлено інтенсивним гальмуванням рідини о прилеглі стінки магнітопроводів і особливого впливу на викид МР з робочого зазору вони не надають.

З розгляду рисунка 5.19 видно, що напрямок дій вихору і вектора магнітної індукції прямо протилежні. Порівняння вихрових структур для МРГК традиційної конструкції з усіма варіантами, де концентратори магнітного потоку були розміщені на валу, показує зниження абсолютної величини вихрової швидкості при використанні досліджуваного конструктивного рішення.

З точки зору гідродинамічних процесів, що відбуваються в робочому зазорі, найбільш прийнятною є схема з розміщенням зубців як на магнітопроводі, так і на валу. Однак реалізація цієї схеми вимагає дуже високої точності виготовлення, крім того провести такий монтаж МРГК в багатьох випадках неможливо технологічно [316]. При чому мова йде не лише про зношене обладнання.

Тому порівнювалися варіанти, наведені на рисунках 5.19 б і 5.19 в.



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

Було прийнято рішення зупинитися на варіанті, представленому на рисунку 5.19 в. Незважаючи на те, що вихрові структури у варіанті на рисунку 5.19 б мали нижчі швидкості, але зменшення на приблизно 15 % магнітної індукції в зазорі в порівнянні з варіантом на рис. 5.19 в було вирішальним, щоб вибрати схему з «внутрішніми» зубцями циліндричної форми на валу.

### **5.3 Аналіз результатів досліджень процесів у зазорі для проектування техно-екобезпечної магнітної герметизації**

Розроблена мультифізична модель дозволяє детально досліджувати взаємовплив різних фізичних полів в робочому зазорі герметизатора і, отже, може використовуватися при проектуванні МРГК.

Одним з основних етапів проектування МРГК є розрахунок розподілу магнітного поля.

Магнітне поле розраховується методом кінцевих елементів, який дозволяє врахувати нелінійність магнітних властивостей використовуваних середовищ і досить точно відтворити межу розділу середовищ.

У зазорі герметизатора МР утримується МП. Раціональна геометрія деталей герметизатора поряд з іншими вимогами визначає можливість застосування МРГК різних типів в тих чи інших умовах.

Проведений за допомогою моделі аналіз перебігу процесів дозволяє в МРГК намітити шляхи підвищення довговічності цього пристрою.

Переваги мультифізичного моделювання детально розглядалися в розділі 2. Практична неможливість експериментального дослідження магнітних полів у робочій зоні МРГК звичайними технічними засобами визначає необхідність використання комп'ютерних програм. Звичайні габаритні розміри датчиків Холла (0,5 мм × 0,8 мм × 0,5 мм) не дозволяють помістити його в зазор МРГ і точно виміряти поле поблизу нього, так як

через високу неоднорідність поля індукція в межах розмірів датчика може змінюватися дуже істотно (від 0 до 2 Тл). Застосування датчиків Холла з ниткоподібних кристалів антімоніда індію (товщина до 50 мкм) дозволяє виміряти індукцію МП на поверхні вала або концентраторів магнітного потоку, але й з їх допомогою фактично неможливо отримати повну картину розподілу МП в зазорі [310].

Скористатися перевагами мультифізичного моделювання взаємозалежних процесів, що відбуваються в зазорі МРГК, можна лише за умови відображення реального фізичного об'єкта в математичній моделі.

Стандартної методики перевірки адекватності моделі не існує.

Оцінка відповідності мультифізичної моделі реального фізичного об'єкта зводиться до вирішення двох проблем: верифікація (встановлення працездатності), тобто перевірка відповідності поведінки моделі логіці поведінки системи; оцінка самої адекватності, тобто перевірка між поведінкою моделі і реальної системи шляхом порівняння характеристик об'єкта і системи, що допускає метод якісного збігу результатів порівняння [317, 318]. Під ним мається на увазі можливість на підставі дослідження моделі зробити правильний висновок про напрямок зміни кількісних характеристик параметрів (наявність екстремальних точок, зростання або зменшування параметра тощо); порівняння результатів експерименту і моделювання в тих точках, де можливо, вимір параметра.

На експериментальних стендах, наведених на рисунках 2.10 і 2.14, були проведені вимірювання магнітної індукції на валу і концентраторах магнітного потоку. Розбіжності між експериментальними і розрахунковими значеннями магнітної індукції не перевищило 20 % [310], що можна вважати прийнятним результатом, тому що досвід проектування МРГК довів необхідність забезпечення не менше 50 % [215, 218] запасу за величиною магнітної індукції для надійної експлуатації герметизатора. Істотний вплив на розбіжність результатів також надають технологічні можливості



виготовлення МРГК [236], особливості приготування МР [183] та ін.

Експериментальні дослідження режимів, на яких, згідно з мультифізичною моделлю, відцентрові сили перевищують магнітні, показали неможливість утримання МР в зазорі МРГК.

Порівняння розподілу магнітних, гідродинамічних і електричних полів у зазорі МРГК з раніше наведеними дослідженнями аналітичними і чисельними методами показують прийнятну якісну зіставленість [228, 231].

Проведені порівняння підтвердили адекватність розробленої моделі та дозволили використовувати результати досліджень, викладених у підрозділі 5.2, при проектуванні МРГК і аналіз досвіду їх експлуатації підтвердив обґрунтованість такого рішення.

#### **5.4 Висновки до розділу 5**

1. Розроблена мультифізична математична модель для аналізу взаємовпливу магнітних, гідродинамічних і електричних полів в робочій зоні МРГК з урахуванням нелінійних магнітних властивостей матеріалів магнітопроводу і вала. Для чисельної реалізації цієї моделі використовувався метод кінцевих елементів і пакет програм Comsol.

2. Показано, що максимально неоднорідне магнітне поле знаходиться безпосередньо під зубцями, розташованими на полюсному наконечнику, а під крайнім зовнішнім зубцем полюса поле ослаблене через прояви кінцевого ефекту і випинання силових ліній поля.

3. Сформульовано умови, при яких в обсязі обертового вала за рахунок взаємодії з постійним магнітним полем будуть виникати електричні струми, що призводять до додаткового нагрівання вала і, відповідно, магнітної рідини, що контактує з ним.

4. Кількісне дослідження показало, що в разі наявності у магнітної рідини електропровідності виникають замкнуті контури зі струмом, який

протікає по валу, магнітній рідині і полюсам магнітної системи. За цих умов область з максимальною густиною струму локалізована в крайніх зубцях магнітних полюсів МРГ. Дослідження впливу електропровідності магнітної рідини на величину максимальної густини струму показало, що для отримання густини струму менше  $10^6$  А/м<sup>2</sup>, величина електропровідності повинна бути менше  $10^3$  1/(Ом·м), тобто для реальних конструкцій МРГК вплив електропровідності майже відсутній.

5. Аналіз вихрових структур, що виникають в робочому зазорі герметизатора, надав результати для забезпечення надійної і екологічно безпечної експлуатації МРГК при величинах зазорів, що перевищують 0,3 мм. При зазорах більш 1 мм через згладжування пікових зон концентраторів утримати МР в робочій зоні герметизатора неможливо.

6. Досліджено взаємодію магнітних і відцентрових сил в робочому зазорі МРГК на базі запропонованої мультифізичної моделі, показано можливість розширення області застосування герметизаторів при високих лінійних швидкостях в зазорі. Доведено, що розміщення концентраторів магнітного потоку на валу приводить до зменшення падіння магнітного поля під крайнім зовнішнім зубом до 10 % і в кілька разів знижує величину вихрової швидкості в кінцевій частині герметизатора, причому напрямки вихору і вектора магнітної індукції протилежні.

7. Результати мультифізичного моделювання широко 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.

Основні наукові і практичні результати, представлені в цьому розділі, в повній мірі відображені в публікаціях автора [185, 215, 227, 228, 231–238, 257, 268, 284, 285, 306, 308–312, 314–316].

## РОЗДІЛ 6

### ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ОЦІНКИ ТЕХНОГЕННОГО ТА ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКІВ ПРИ ПЕРЕХОДІ НА МАГНІТОРІДИННІ ГЕРМЕТИЗУЮЧІ КОМПЛЕКСИ

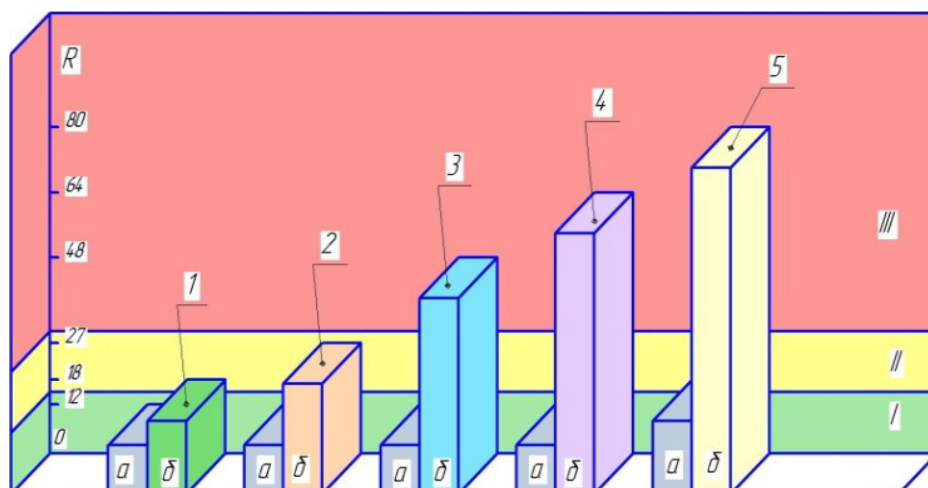
#### 6.1 Оцінка ризику техногенних аварій і екологічних наслідків для різних потужностей електродвигунів

Запропонований в підрозділі 2.5 метод дозволяє обґрунтувати вибір заходів щодо забезпечення рівня техногенного ризику шляхом співвіднесення величини ризику, визначеного за формулою (2.34) з граничними значеннями категорій ризику, розроблених автором на основі умов експлуатації обладнання небезпечних виробництв і викладених в таблиці 2.5 [319]. Проведений порівняльний аналіз техногенного ризику при заміні штатних ущільнень на МРГК показав переваги останнього щодо досягнення необхідних умов безпеки [320–322]. Впровадження МРГК технологічно усуває причини аварій складних систем за рахунок підвищення працездатності та надійності обладнання. Високий рівень техногенного ризику забезпечується відсутністю необхідності втручання людини при експлуатації герметизаторів. Таким чином, вплив людського фактору зведено до мінімуму.

Розрахунки техногенних ризиків згідно формули (2.34) були проведені для синхронних електродвигунів типу СДН, що випускаються ТОВ «Завод крупних електричних машин» (ТОВ «ЗКЕМ», м. Нова Каховка), при комплектації виносних підшипникових стійок лабіринтовими ущільненнями і МРГК. Вони подані на рисунках 6.1, 6.2, 6.3. Зазначені електродвигуни застосовуються в якості приводу для водяних, шламових насосів; цементних, вуглерозмельних, рудорозмельних і інших промислових млинів; шахтних вентиляторів головного провітрювання; на магістральних нафто- і

газопроводах тощо. Вони можуть експлуатуватися як в приміщеннях, так і на відкритому повітрі. Навколишнє середовище при експлуатації синхронних машин може містити значну кількість вологи, пилу, абразиву (цементний, вугільний пил, штиб і т.д.)

З рисунку 6.1 видно що умови експлуатації електродвигунів однакового року випуску (початку 90-х років), однакової потужності і обертів валу доволі суттєво впливають на рівень техногенного ризику. Більш комфортні умови експлуатації – у приводу водяних насосів, розміщених в закритих приміщеннях. Це ілюструється низьким рівнем ризику і, напевно, пояснює той факт, що МРГК для таких умов ніколи не встановлювалися.



а) – комплектація МРГК, б) – комплектація лабіринтовими ущільненнями для приводів відповідного обладнання

1 – водяних насосів в закритих приміщеннях; 2 – водяних насосів на відкритому повітрі; 3 – цементних млинів; 4 – вуглерозмельних млинів;  
5 – шахтних вентиляторів

Рисунок 6.1 – Залежність техногенного ризику електродвигунів типу СДН від різного призначення

Потреба у впровадженні МРГК для всіх інших існує на заводах

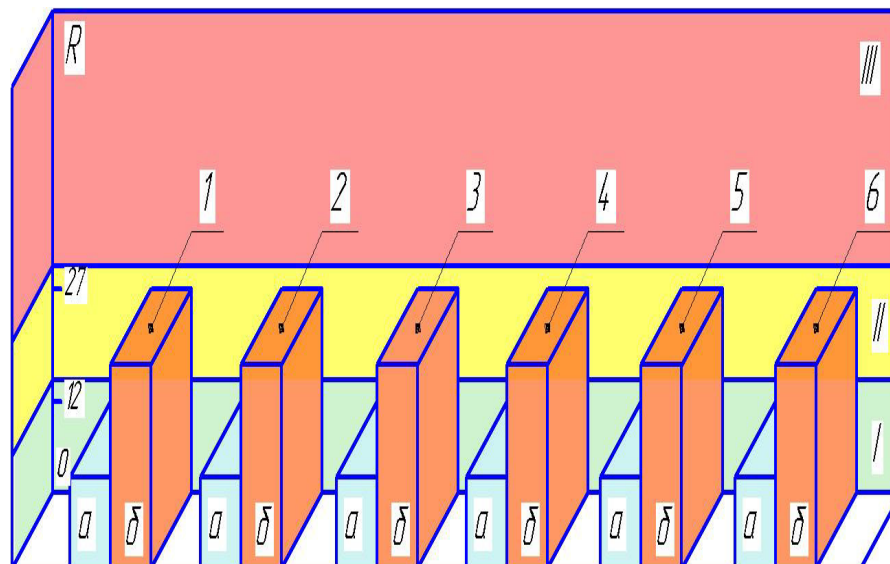
постійно. Найбільш важкі умови експлуатації у шахтних вентиляторів головного провітрювання, тому що при їх експлуатації обов'язково відбувається налипання пилу на поверхню лопаток, що призводить до дисбалансу ротора та сприяє появі підвищеної вібрації підшипникових вузлів. Це трохи збільшує величину техногенного ризику для МРГК [323], а як наслідок погіршуються екологічні умови експлуатації, зростає ймовірність аварійної ситуації з важкими наслідками, зумовленої можливим вибухом вентилятора.

Можливість МРГК забезпечити практично повну герметичність та захист підшипникових вузлів дозволяє підтримувати техногенну безпеку на постійному і доволі високому рівні.

Аналіз рівнів 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 в якості приводів водяних насосів, показав, що при зростанні потужності електричної машини рівень техногенної безпеки не змінюється (рис. 6.2).

Такий результат дозволив на наступному етапі проаналізувати вплив частоти обертання валу на техногенний ризик при приблизно однаковій потужності електродвигунів. Розглядалися електродвигуни серії СДН-14 і СДН-15 випуску початку 90-х років з наступним показниками: 375 об/хв, 1000 кВт; 500 об/хв, 1250 кВт; 600 об/хв, 800 кВт; 750 об/хв, 1250 кВт; 1000 об/хв, 1000 кВт. Аналіз результатів на рисунку 6.3 показує незначний вплив збільшення обертів валу на техногенний ризик. Збільшений ризик при невеликих обертах пов'язаний з тим, що конструктивно на них застосовуються манжетні ущільнення, які виявилися менш надійними, ніж лабіринтові. Цей висновок можна застосувати тільки до даного конкретного випадку, а саме для електродвигунів, що експлуатуються близько 25 років, із низьким значенням ефективності манжетного ущільнення за рахунок

зношення. Техногенний ризик при використанні МРГК практично не залежить від числа обертів вала.



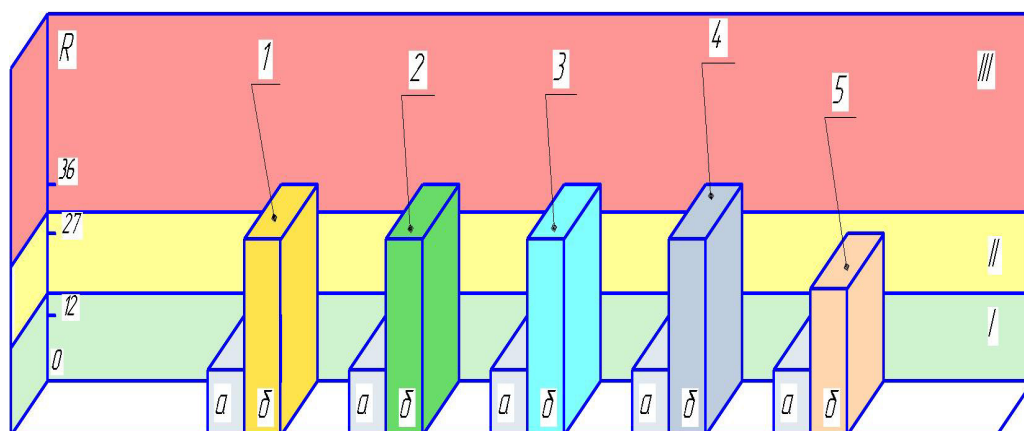
а) – комплектація МРГК, б) – комплектація лабіринтовими ущільненнями обладнання різної потужності

1 – 800 кВт; 2 – 1,25 МВт; 3 – 1,25 МВт; 4 – 1,6 МВт; 5 – 2,5 МВт;  
6 – 3,2 МВт

Рисунок 6.2 – Техногенний ризик електродвигунів серії СДН-14 і СДН-15 з різним діапазоном потужності

Аналіз проведених розрахунків показує, що всі досліджувані електродвигуни знаходяться в зоні терпимого ризику. Це пояснюється тим, що вони знаходяться в експлуатації і тому повинні задовольняти вимогам, у тому числі і з екологічної безпеки. При проектуванні нового обладнання або модернізації діючого необхідно прагнути до максимально можливого зниження техногенного ризику, тому що аналіз великих техногенних катастроф останнього часу показує, що саме ущільнювальні системи часто були першою ланкою в ланцюжку відмов, каскадне переростаючи в аварію. Саме тому роботи в III категорії (табл. 2.5) зі зниження ризику є

актуальними, що підтверджує впровадження МРГК замість традиційних ущільнень.



а) – комплектація МРГК, б) – комплектація лабіринтовими ущільненнями

1 – 375 об/хв; 2 – 500 об/хв; 3 – 600 об/хв; 4 – 750 об/хв; 5 – 1000 об/хв

Рисунок 6.3 – Залежність техногенного ризику електродвигунів типу СДН в залежності від частоти обертання валу

## 6.2 Дослідження впливу кліматичних показників на рівень ризику техногенних аварій і екологічні наслідки

При вивченні умов виникнення техногенних аварій на прикладі асинхронних електродвигунів серії ВАСО, ВАСВ, АСВО (надалі використовуємо тільки термін ВАСО) встановлено, що рівень ризику їх реалізації залежить від природно-кліматичного стану середовища (див. підрозділ 2.5).

Висока вірогідність і об'єктивність інформації про працездатність і надійність АД забезпечується спостереженням в певних умовах експлуатації, яке враховує навантажувальні режими, кліматичні впливи і особливості технічного обслуговування. Використання цього методу збору інформації

(незважаючи на досить велику статистичну вибірку, що складається з близько 3000 електродвигунів серії ВАСО тільки з МРГК) призводять до таких труднощів: необхідність тривалого періоду спостережень за електродвигунами ВАСО, так як в цілому вони є надійними і неможливо отримати достатню кількість їх відмов за невеликий проміжок часу; недостатня кількість контрольно-вимірювальної апаратури і кваліфікованого обслуговуючого персоналу, здатного якісно вести облік інформації про відмови ВАСО; трудомісткість збору інформації про досвід експлуатації на різних підприємствах, які територіально значно віддалені один від одного.

Незважаючи на перераховані труднощі був прийнятий метод експлуатаційних спостережень, що дозволяє на підставі інформації про відмови АД системно вирішити такі задачі:

- виявлення найбільш "слабких" вузлів і деталей, якими визначається надійність і працездатність АД в цілому і причин виникнення їх відмов;
- встановлення закономірності зміни надійності і працездатності вузлів АД під впливом тих чи інших умов навколишнього середовища;
- виявлення недоліків проектування, виготовлення і експлуатації;
- уточнення показників надійності, встановлених в нормативно-технічній документації на конкретний тип ВАСО.

Для визначення характеру і причин відмов електродвигунів ВАСО було проведено системне вивчення умов експлуатації значної кількості двигунів з урахуванням ПКУ в різних галузях промисловості. При дослідженні експлуатаційної надійності за період з 1992 року по 2018 рік були розглянуті АД як з традиційними ущільненнями, так і з МРГК. Дані про відмови були зібрані в електроремонтних цехах хімічних підприємств Сєверодонецька, Горлівки, Одеси, Череповця, Гродно, Алмалику і т.д.; нафтопереробних підприємствах Лисичанська, Кременчука, Атирау, Кіришей, Тобольська, Омська і т.д.; а також на газоперекачувальних станціях в Долині і Тюмені. Всього було зібрано та опрацьовано статистичний матеріал про більш ніж



4000 електродвигунів ВАСО, що вийшли з ладу. Аналіз отриманої інформації із спостережень проводився з використанням методів математичної статистики й урахуванням кліматичних показників середовища – середньомісячної відносної вологості, температури повітря, тривалості випадання роси і т.д., які бралися з архівів метеостанцій, вільний доступ до яких є в Інтернеті [324].

При дослідженні відмов АД прийняті такі допущення:

- АД в вибірках аналогічні за конструкцією;
- АД мають аналогічні умови експлуатації;
- вибірки складаються з АД, що мають різний час початку і кінця експлуатації;
- всі АД з серйозними відмовами замінюються новими, кількість експлуатованих електродвигунів залишається постійною.

Розглянуті АД піддаються комплексному впливу теплоти, вібрації, пилу, вологи і тощо. Так, коливання температури протягом року в різних кліматичних зонах складають від плюс 40 °С до мінус 55 °С), коливання відносної вологості – від 15 % до 100 %, запиленості повітря – під час піщаних бур до 900 мг/м<sup>3</sup> [321].

На підставі аналізу статистичних даних про причини передчасного виходу електродвигунів з ладу виділені в якості «слабких ланок» такі елементи конструкцій електродвигуна ВАСО: підшипниковий вузол – пошкодження складають 73 %, обмотка статора – 24 %, ротор – 3 % від загального числа відмов АД (вбірка містила АД тільки із застосуванням традиційних ущільнень). Інші пошкодження АД були в інтервалах похибки і тому далі не розглядалися.

На рисунку 6.4 подана діаграма змін характеру пошкоджень електродвигунів ВАСО на хімічних і нафтопереробних заводах України та середньої смуги Росії за період 2000 – 2005 рр. (так як в ці роки кількість експлуатованих електродвигунів була максимальною). Ці дані добре

корелюються з результатами інших досліджень [325], в яких 80 % відмов пов'язані з ушкодженнями підшипників, 16 % – з обмоткою статора і 4 % – з ротором. Згідно з інформацією, що обговорювалися на першому семінарі з проектування, управління та діагностики електричних машин WEMDCD'2013, при певному терміні експлуатації пошкодження підшипників склали 69 %, обмоток статора – 21 %, ротора – 7 % і елементів, пов'язаних зі з'єднувальними муфтами вентилятора – 3 % [326].

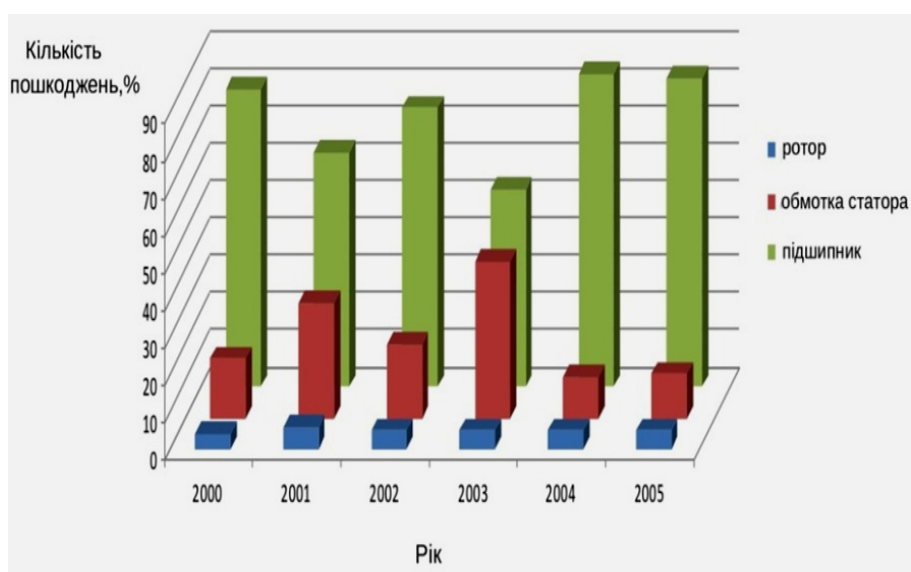


Рисунок 6.4 – Діаграма характеру пошкоджень електродвигунів ВАСО на хімічних і нафтопереробних заводах України за п'ять років

Вплив сезонних змін ПКУ на інтенсивність відмов АД встановлений за результатами обробки даних методами математичної статистики про відмови електродвигунів ВАСО зі штатними ущільненнями в різних кліматичних умовах на територіях України, Росії, Білорусі, Казахстану та Узбекистану, причому аналізувалися електродвигуни тільки зі штатними ущільненнями (табл. 6.1) [320, 322].

Таблиця 6.1 – Середньомісячні інтенсивності відмов електродвигунів  
ВАСО

Компоненти аналізу	Місяці											
	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Середня інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-5}, \text{ч}^{-1}$	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

Примітка: \* експлуатація з водяним зрошенням.

Високі значення коефіцієнтів варіації пояснюються тим, що статистично оброблялися результати роботи АД в різних умовах експлуатації, причому аналізувалися електродвигуни серії ВАСО – різної потужності і різних заводів - виробників (Н. Каховка, Тирасполь, Лисьва, Сафоново) з метою зниження впливу технології виготовлення. Це було зроблено для збільшення обсягу вибірки.

За наданою інформацією в таблиці 6.1 інтенсивність відмов значно вище в найспекотніші та холодні місяці року. Однак необхідно враховувати, що в період високих літніх температур багато заводів застосовують установку систем зволоження повітря, що складається з насосної станції, розподільників і форсунок. За рахунок високого тиску в системі вода розпорошується до високого ступеня дисперсності, що забезпечує її випаровування протягом відносно короткого шляху від повітрязабірника до

поверхні оребрених труб. Однак це значно погіршує експлуатаційні умови АД. Відносно низькі значення інтенсивності відмов в травні і вересні можна пояснити тим, що в цей час частіше нафтопереробні та хімічні підприємства проводять капітальні ремонти з повною зупинкою виробництва.

При проведенні комплексного аналізу статистичних даних по відмовах АД було виявлено домінування фактора вологості повітря порівняно з усіма іншими факторами, пов'язаними з кліматичними умовами. В значно меншій мірі на знос АД впливають вплив агресивних газів і пилу [238, 299].

Таким чином, доцільно розглянути негативний вплив виділених факторів на працездатність і надійність електродвигунів ВАСО.

Волога проникає в середину АД, головним чином, через вихідний вал внаслідок недостатньо ефективною роботи ущільнення. Аналіз статистичних даних показав, що вибухозахищені електродвигуни виходять з ладу через відмову підшипникових вузлів так само, як і АД загальнопромислового призначення, навіть не дивлячись на те, що вони проектується більш надійними, в тому числі це стосується і ущільнювального вузла [327, 328].

Найчастіше волога проникає всередину АД в ті періоди, коли останній знаходиться в непрацюючому стані. Особливо інтенсивно цей процес йде під час охолодження електродвигуна після його роботи, так як виникає різниця тисків між повітрям всередині АД і зовні, при цьому повітря засмоктується всередину АД. При нагріванні тиск повітря всередині АД підвищується і повітря виходить назовні. При наступних включеннях – відключеннях АД – цикл повторюється. Зниження температури електродвигуна практично завжди супроводжується випаданням роси [282].

Тривалий вплив високої вологості викликає змивання мастила з верхнього підшипникового вузла, корозію металевих деталей, набухання і гідроліз органічних матеріалів ізоляції. Продуктом гідролізу є органічні кислоти, що руйнують матеріали і інтенсифікують корозію. Наявність у вологій атмосфері промислових газів і пилу призводить до прогресуючої

корозії. Вологе повітря (іноді разом з пилом) всмоктується, в основному, через підшипникові вузли, що підтверджує дефектація відмов електродвигунів ВАСО зі штатними ущільненнями. Мастило всіх підшипників або повністю змито, або сильно забруднено [329].

Під впливом вологи відбувається зміна електричних, фізико-механічних і хімічних властивостей електроізоляційних матеріалів в бік їх погіршення. Через постійні зміни відносної вологості середовища при експлуатації (добові коливання відносної вологості середовища, зміни вологості електроізоляційних матеріалів обмотки при роботі і простої електродвигунів) волога проникає в матеріал то на одну, то на іншу глибину, за таких умов зовнішні і внутрішні шари розбухають у різному ступені. Внаслідок цього в поверхневому шарі обмотки ізоляції утворюються дрібні тріщини, які сприяють інтенсивному проникненню вологи всередину матеріалу, що призводить до погіршення електричних характеристик електроізоляційного матеріалу, зменшення механічної міцності за швидкістю, пропорційною частоті змін відносної вологості повітря.

Такі зміни у стані двигунів за реалізацією ситуації техногенної небезпеки викликають низку екологічно негативних наслідків. Електродвигуни серії ВАСО застосовуються в якості приводів апаратів повітряного охолодження. Аварійна зупинка електродвигуна в кращому випадку призводить до аварійної зупинки технологічного обладнання, але ситуація може супроводжуватися викидами токсичних матеріалів, вибухами та пожежами. Враховуючи те, що АПО в великій кількості використовуються при виробництві аміаку, крекінгу нафти, видобуванні та транспортуванні газу, то негативними екологічними наслідками будуть викиди в навколишнє середовище аміаку, вуглеводнів, а також продуктів їх горіння. В якості приклада розглянемо аварію на Йонавському заводі азотних мінералів 20 березня 1988 року, коли вибухнула ємність з рідким аміаком. Близько 7000 тон рідкого аміаку розлилося на території заводу, утворивши озеро отруйної

рідини загальною площею 10000 м<sup>2</sup> та глибиною 0,5 м<sup>2</sup>. Рідкий аміак загорівся. В зону пожежі потрапив склад готової продукції, де знаходилося 24 тис. тон міндобрив. Утворилася хмара токсичних газів і аерозолів, яка піднялася на висоту 80 м. Глибина поширення зараженого повітря досягла 30 км. Тільки сприятливі умови не призвели до людських жертв – хмара пройшла по незаселеним районам. У ліквідації аварії брали участь близько тисячі осіб і понад двохсот одиниць техніки [330]. Докладний аналіз цієї аварії обумовлений тим, що в Україні аміак виробляється по тій же самій технології. Шкідливі викиди аміаку були на ПАТ "ДніпроАзот" (м. Кам'янське) в 2004 р. і ВАТ "Концерн Стирол" (м. Горлівка) в 2012 р, але в значно менших масштабах.

У електродвигунах серії ВАСО, в більшості випадків, застосовують сальникові ущільнення. Досвід багаторічної експлуатації показав недостатню надійність даних типів ущільнень: вода потрапляє всередину підшипникового вузла, що призводить до значного зменшення його працездатності і надійності згідно вище наведеним причинам. Ремонт електродвигунів типу ВАСО можливий тільки в умовах спеціалізованої дільниці електроремонтного цеху підприємства. Механічний контакт сальника з валом призводить до його зношування, що викликає необхідність наплавлення і обробки вала або його заміни [233, 236, 270].

Оцінка техногенного ризику згідно формули (2.34) потребує уточнення, тому що параметри  $E$  і  $A$  є також функцією від ПКУ та їх сезонних змін. Коефіцієнти, що враховують вплив ПКУ, визначалися на підставі статистичної обробки інтенсивності відмов для різних умов експлуатації. Аналіз результатів моніторингу стану двигунів на певних виробництвах показав, що врахування кліматичних факторів підвищує ризик техногенних аварій, для різних регіонів і пір року його значення коливається в межах 1–1,20 [331].

Уточнену формулу для оцінки техногенного ризику устаткування можна записати в такому вигляді:

$$R = K \cdot (Koc_1 \cdot E) \cdot (Koc_2 \cdot A) \cdot S, \quad (6.1)$$

де  $Koc_1$  і  $Koc_2$  - коефіцієнти, що враховують вплив природно-кліматичних умов у даний момент часу відповідно на ймовірність виникнення небезпечної ситуації і на ймовірність того, що небезпечна ситуація призведе до нанесення шкоди.

На рисунку 6.5 подані результати оцінки техногенного ризику АД серії ВАСО для шести регіонів з різними кліматичними умовами в залежності від пори року.

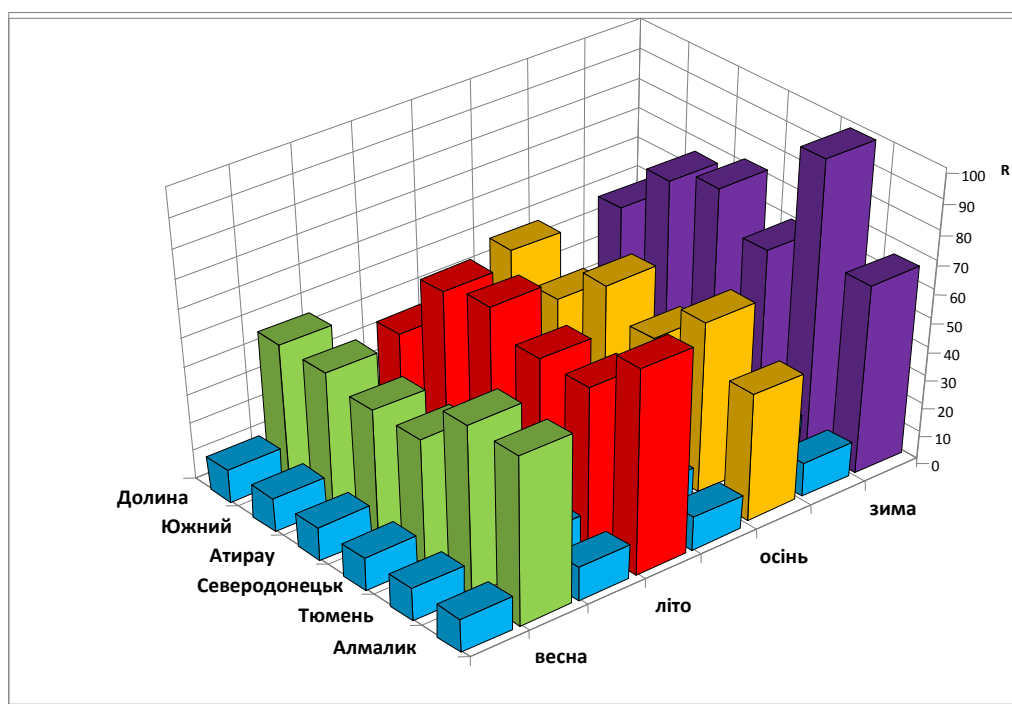


Рисунок 6.5 – Оцінка техногенного ризику АД серії ВАСО із застосуванням сальникових ущільнень та МРГК

За даними рисунка 6.5 видно, що найбільш небезпечним є зимовий

режим з великими від'ємними температурами навколишнього середовища, високою відносною вологістю повітря, з увімкненнями-вимкненнями АД, що чергуються. 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  $30 \leq R \leq 125$ ), проте в цьому разі вже необхідно вживати заходи щодо зниження ризику [332,333].

Розглянутий електродвигун є важливим елементом технологічної установки по видобутку газу. В результаті його відмови 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.

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

### **6.3 Дослідження залежності рівня безпеки від режимів роботи асинхронних електродвигунів серії ВАСО і частотних перетворювачів, їх вплив на оцінку ризику техногенних аварій**

Для утримання обладнання в стані безпеки техногенних та екологічних наслідків при різних режимах його роботи необхідно встановити ущільнення, яке працездатне у будь-яких умовах експлуатації чи визначитися з динамікою його змін відповідним чином [233, 236, 282].

За результатами експериментальних досліджень визначена оцінка



впливу режимів роботи АД на техногенний ризик як при застосуванні штатних ущільнень, так і МРГК. Критерієм працездатності ущільнювальних систем запроваджено величину техногенного ризику, оцінка якого проводилася за вдосконаленим методом, запропонованим у підрозділі 2.5.

За статистичною вибіркою (див. п. 6.2.) надана оцінка техногенного ризику на прикладі АД, які використовуються для привода АПО.

За допомогою формул (2.34) і (6.1) була проведена оцінка техногенного ризику для таких режимів роботи: S1, S2 і S3 при комплектації електродвигунів ВАСО сальниковими ущільненнями і МРГ. Результати досліджень представлені на рисунку 6.6.

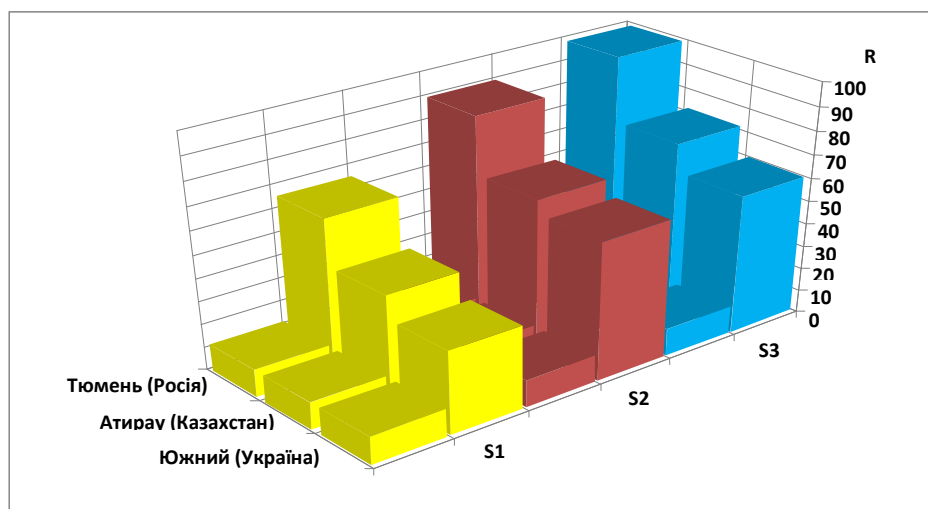


Рисунок 6.6 – Оцінка техногенного ризику АД серії ВАСО із застосуванням сальникових ущільнень і МРГ в залежності від режимів роботи

За отриманою інформацією найбільш комфортним є режим S1. Значно вище ризик техногенної небезпеки при режимах S2 і S3. При повторно-короткочасному режимі роботи ризик відмови суттєво зростає, що потрібно вжити спеціальні заходи, спрямовані на запобігання аварії. Оцінка техногенного ризику для МРГ однакова для всіх режимів роботи, тому що

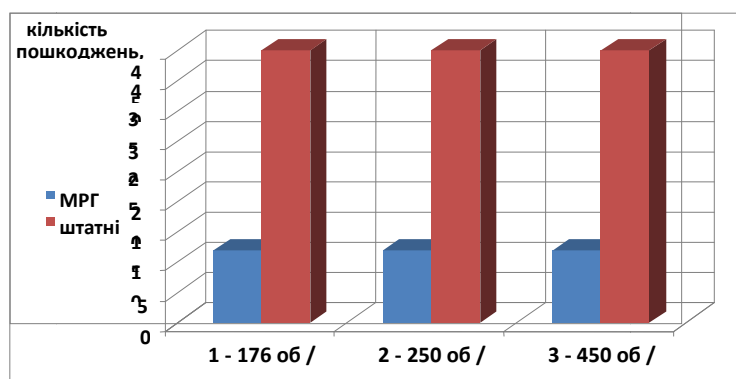
основною перевагою даного типу ущільнення є забезпечення практично повної герметичності при будь-якому ступеню дисперсності вологого середовища. Вона проводилася для трьох регіонів з різними кліматичними умовами.

Номінальні режими роботи електродвигунів, які регламентуються міжнародними нормативними документами, тісно пов'язані з експлуатацією АД із застосуванням ПЧ. В останні роки вони широко впроваджуються на всіх приводах АПО.

Для визначення вагомості ПЧ у загальній оцінці техногенної безпеки спочатку вивчено вплив частоти обертання АД на ступінь техногенного ризику. Розглядалися електродвигуни ВАСО з 14, 24 і 34 парами полюсів (відповідно 450 об/хв, 250 об/хв і 176 об/хв) без застосування ПЧ. При експлуатації АД з комплектацією ПЧ частота змінюється автоматично в залежності від великого числа факторів. Аналізувалися електродвигуни як зі штатними ущільненнями, так і з МРГ [333]. Ймовірність виникнення небезпечної ситуації, що залежить від сезонних змін клімату, усереднювалась за рік [320].

Відповідно розрахункової формули (2.34) проведена оцінка техногенного ризику для трьох частот обертання при комплектації електродвигунів ВАСО штатними ущільненнями і МРГ (рис. 6.7).

З розгляду рисунка 6.7 випливає, що частота обертання електродвигуна ВАСО не впливає на техногенний ризик. Тому було вирішено провести загальну оцінку техногенного ризику для короткочасних переміжних реверсних режимів роботи S4, S5, S6, S7, S8. Режим S8 відрізняється від інших тим, що при ньому допускається робота двигуна на декількох різних швидкостях обертання. Решта відмінностей, з точки зору умов експлуатації, несуттєві і всі розглянуті режими відносяться до жорстких умов експлуатації.



1 – 176 об/хв; 2 – 250 об/хв; 3 – 450 об/хв

Рисунок 6.7 – Техногенний ризик електродвигунів серії ВАСО в залежності від частоти обертання валу

На рисунку 6.8 приведена оцінка техногенного ризику АД серії ВАСО для режиму S8, а також для основних режимів роботи АД: S1 – тривалий режим роботи; S2 – короткочасний режим роботи; S3 – повторно короткочасний режим роботи.

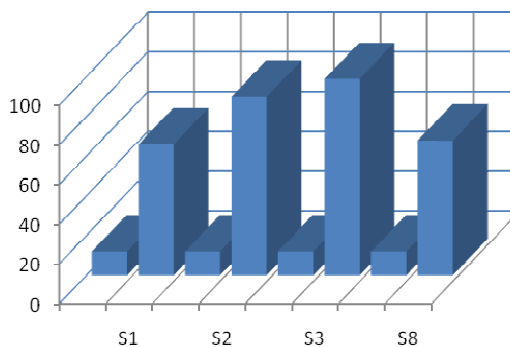


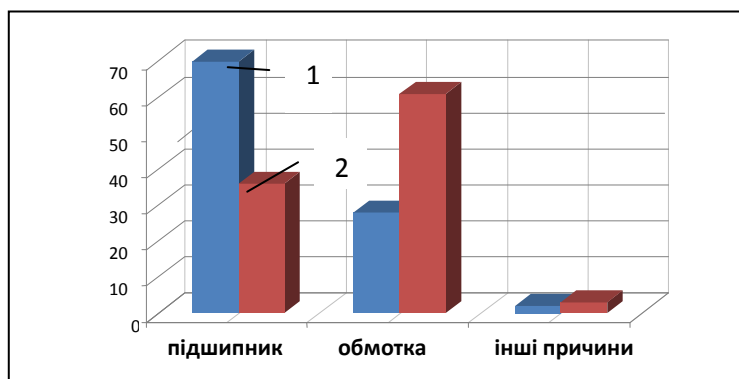
Рисунок 6.8 – Оцінка техногенного ризику електродвигунів серії ВАСО із застосуванням штатних ущільнень і МРГ в залежності від режимів роботи

Аналіз рисунку 6.8 показує, що зниження загальної кількості послідовних включень–відключень АД, що характерно для режимів S2 і S3, за рахунок регулювання потужності зміною частоти обертання призводить до зниження ризику техногенної безпеки електродвигуна. Рівень техногенної безпеки режиму S8 з використанням ПЧ практично такий же, як і для режиму

S1. Для досліджень, результати яких наведені на рисунку 6.8 були використані дані про відмови електродвигунів АТ «СібурТюменьГаз», визначено, що кліматичні умови Тюмені є найбільш важкими для експлуатації електродвигунів ВАСО.

Спільне застосування МРГ і ПЧ дозволяє домогтися зниження рівня екологічної небезпеки на всіх режимах роботи АД.

За результатами статистичного аналізу пошкоджень електродвигунів ВАСО на заводах, де вже тривалий час всі АД укомплектовані МРГ, зроблено висновок, що підшипниковий вузол не є основною причиною передчасного виходу електродвигунів з ладу. Це добре ілюструється рисунком 6.9, де наведені причини виходу з ладу електродвигунів за даними експлуатації ПАТ «Укртатнафта» (м. Кременчук) за 1994 – 1998 рр (комплектація штатними ущільненнями) і за 2011 – 2016 рр (комплектація МРГ).



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

Рисунок 6.9 – Діаграма характеру пошкоджень електродвигунів серії ВАСО на ПАТ «Укртатнафта» (Кременчук) зі штатними ущільненнями та МРГ

«Вузким місцем» при експлуатації ВАСО стала ізоляція обмотки статора. З цієї причини передчасно вийшло з ладу 61 % АД, через підшипниковий вузол було зафіксовано 36 % відмов і з інших причин – 3 %

відмов. Дані по експлуатації АД серії ВАСО зі штатними ущільненнями добре узгоджуються з даними, наведеними на рисунку 6.4.

#### 6.4 Висновки до розділу 6

1. Порівняння рівнів техногенної безпеки при застосуванні різних ущільнювальних систем можливо вдосконаленим методом оцінки ризиків з урахуванням системного багаторівневого аналізу на основі методу Файн-Кінні для трирівневої ієрархічної системи «МРГК – технологічне обладнання – техногенна безпека».

2. Аналіз оцінки ризиків для синхронних електродвигунів серії СДН виробництва ТОВ «ЗКЕМ» (Нова Каховка) при різних умовах експлуатації, потужності і оборотах обертового вала показав зниження техногенного ризику при впровадженні МРГК в діапазоні 1,5 – 4 рази.

3. Порівнянням середньомісячної інтенсивності відмов електродвигунів ВАСО встановлено, що при комплектації їх сальниковими ущільненнями інтенсивність відмов залежить від сезонних змін кліматичних умов і досягає максимального значення в зимовий період, а з МРГК не змінюється протягом року.

4. Показано, що вплив зрошення при експлуатації двигунів при комплектації їх сальниковими ущільненнями підвищує інтенсивність відмов в літні місяці року. За рахунок цього суттєво зростає ймовірність викидів шкідливих речовин, вибухів та пожеж. При застосуванні МРГК інтенсивність відмов не змінюється.

5. Підтверджено, що експлуатація асинхронних двигунів з МРГК практично не залежить від кліматичних факторів і дозволяє знизити рівень техногенного ризику ущільнювальної системи при заміні сальникового ущільнення на МРГК в 4 – 7 разів. Таким чином, вдається суттєво зменшити ймовірність шкідливих викидів, пожеж, вибухів тощо. Це знижує екологічну

напругу та створює умови надійної безпеки життя та діяльності людини, враховуючи критичні ситуації, що можуть виникати під час техногенних аварій.

6. Показано, що потрапляння вологи всередину електродвигуна є однією з основних причин виходу з ладу АД серії ВАСО, при експлуатації проблемним є повторно-короткочасний режим S3.

7. Показано, що експлуатація МРГ дозволяє запобігти потраплянню вологи всередину АД, що дозволяє знизити рівень техногенного ризику ущільнювальної системи при заміні сальникового ущільнення на МРГ в 4 – 7 разів. Впровадження МРГ підвищує працездатність і техногенну безпеку АД, забезпечуючи прийнятний рівень екологічності середовища.

8. Зміна частоти обертання електродвигунів серії ВАСО не впливає на рівень їх техногенної безпеки.

9. Спільне застосування МРГ і частотних перетворювачів дозволяє досягти рівня незначного техногенного ризику на всіх режимах роботи АД.

10. Зниження рівня техногенного ризику АД серії ВАСО з МРГ призводить до перерозподілу відмов електродвигуна з пошкоджень підшипникових вузлів і обмоток статора при зниженні абсолютних величин цих показників.

Основні наукові і практичні результати, представлені в цьому розділі, в повній мірі відображені в публікаціях автора [183, 233, 234, 238, 282, 285, 290, 319–323, 329, 331–333]

## РОЗДІЛ 7

### ЕКОЛОГІЧНІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ДОСВІДУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАГНІТОРІДИННИХ ГЕРМЕТИЗУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ НА НЕБЕЗПЕЧНИХ ВИРОБНИЦТВАХ

#### **7.1 Науково-методичні та технологічні підходи до впровадження магніторідинних герметизуючих комплексів з метою підвищення рівня безпеки виробництв**

Магніторідинні герметизуючі комплекси відносяться до наукомісткої високотехнологічної продукції, тому створення нових конструкцій було пов'язано з глибоким проробленням магнітної системи, розподілу магнітного поля, технологічних питань виготовлення, синтезу МР і т.д.[228, 236, 249, 258, 282].

Задача розробки наукових основ створення і вивчення МРГК пов'язана з можливостями використання особливих властивостей МР, які не зустрічаються в природних матеріалах, для досягнення високого ступеня ущільнення обладнання. Відповідно до цієї задачі проведені дослідження магнітних, експлуатаційних, електричних, реологічних властивостей МР, а також теоретичних і мультифізичних моделей, які описують взаємовплив магнітних, гідродинамічних, електричних і теплових полів в робочій зоні МРГК.

Проведений аналіз перебігу фізичних процесів, які відбуваються і можуть відбуватися в МРГК при нормальній експлуатації і в екстремальних режимах роботи, дозволили обґрунтувати деякі шляхи підвищення працездатності і довговічності цих пристроїв, тим самим і забезпечити напрямок для вирішення пріоритетної екологічної проблеми забруднення природного середовища газоподібними, рідкими та твердими речовинами.

Зниження обсягів забруднення за рахунок падіння виробництва не викликає адекватного зменшення техногенного навантаження на навколишнє природне середовище через зростання кількості аварій.

Гарантія повної герметичності забезпечує системну узгодженість оцінювання і коригування працездатності та безпеки (техногенної та екологічної) в процесі функціонування технологічного обладнання не тільки за відповідними цілями, задачами і очікуваними результатами, а (що особливо важливо) по оперативності і результативності в реальних умовах нештатної аварійної ситуації.

Дослідні роботи за цими напрямками дозволили створити більш досконалі пристрої і істотно розширити сферу застосування МРГК, виявили ряд факторів, які негативно позначилися на ресурсі і надійності герметизаторів [67, 68, 320, 334, 335].

Рішення ряду технічних завдань, пов'язаних з досягненням практично 100 % герметичності, на сьогоднішній день неможливо без використання МРГ. Заміна традиційних штатних ущільнень на МРГК покращує технічні характеристики технологічного обладнання небезпечних виробництв, забезпечує необхідний рівень техногенної безпеки, що створює умови підвищення рівня екологічності підприємств НВ за рахунок забезпечення нормальної експлуатації технологічного обладнання, зменшення викидів шкідливих речовин в повітря, водні об'єкти та ґрунт.

Важливим елементом в загальній системі підтримки технологічного обладнання в працездатному стані є проведення капітальних і поточних ремонтів. При ремонті устаткування можлива його модернізація і проведення заходів щодо підвищення довговічності, наприклад, впровадження МРГК.

Під час розробки конструкцій МРГК враховувалися три основних напрямки їх впровадження на технологічне обладнання:

- заміна штатних ущільнень на МРГК при проведенні планових ремонтів;



– поставка МРГК на заводи - виробники технологічного обладнання (електродвигуни, вугільні комбайни), які після всебічного вивчення досвіду експлуатації МРГК внесли їх в якості ущільнювального вузла в свою продукцію;

– розробка МРГК для нового технологічного обладнання, де технічним завданням передбачені жорсткі вимоги до рівня герметичності та техногенної безпеки.

Більшість результатів теоретичних, експериментальних і проектних досліджень узагальнено й узаконено відповідними технічними умовами (ТУ), що сприяє їх широкому промислового 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 станом екологічної та техногенної безпеки при експлуатації МРГК підтверджує високу ефективність отриманих результатів.

Запропоновані конструкції МРГК експлуатуються в таких промислових галузях:

– хімічній промисловості: ВАТ «Азот» (м. Черкаси), Одеський припортовий завод, ВАТ «Концерн “Стирол”» (м. Горлівка), ПАТ «Об'єднання Азот» (м. Северодонецьк), ВАТ «ЄвроХім-Белоріченські Міндобрива» (м. Белоріченськ, Росія), ВАТ «Могильовхімволокно» (м. Могильов, Білорусь), ПАТ «ДніпроАзот» (м. Кам'янське); акти впроваджень від 09.11.98, 25.12.00, 23.03.02, 05.10.04, 21.04.06, 10.06.12,

22.06.16 відповідно; всього – близько 100 підприємств [68, 215, 233, 236, 237, 244, 245, 270, 282, 284, 285, 297, 335–341 и т.д.];

– нафтопереробній промисловості: ТОВ ВО «Кіришінефтеоргсинтез» (м. Кіриші, Росія), ПрАТ «ЛИНІК» (м. Лисичанськ); акти впровадження від 22.05.00, 14.11.13 відповідно; всього – 23 підприємства [215, 234, 236, 237, 268, 269, 282, 283, 334, 335, 340–346 и т.д.];

– металургійній промисловості: ВАТ «Запорізький феросплавний комбінат», ВАТ «Алмаликський гірничо-металургійний комбінат» (м. Алмалик, Узбекистан); акти впровадження від 15.11.03, 15.03.10; всього – 15 підприємств [68, 232, 238, 269–271, 282, 347–350 и т.д.];

– вугільній промисловості: АП Шахта ім. О. Ф. Засядька (м. Донецьк), ДВАТ «ПНУ» (м. Павлоград) та ін.; цементній промисловості: ВАТ «Донцемент» (м. Амвросіївка); акти впровадження від 11.10.00, 01.07.09, 11.11.06; всього – 20 підприємств [161, 183, 217, 218, 227, 257, 282, 351–359 и т.д.];

– енергетиці: ЮУ АЕС НАЕК «Енергоатом»; акт впровадження від 15.12.14; всього – 5 підприємств [70, 282, 306, 311, 312, 360–362 и т.д.];

– машинобудуванні: РУП «МАЗ» (м. Мінськ, Білорусь); акт впровадження від 05.11.07; всього – 19 підприємств [161, 215, 248, 282, 349, 363 и т.д.];

– водопостачанні: комунальне підприємство «Вода Донбасу» (акт впровадження від 14.07.08) [237, 269, 282, 323, 364 и т.д.].

Відповідно до отриманих позитивних результатів промислової експлуатації заводи-виробники електродвигунів (серії ВАСО, ВАСВ, АСВО, ДАЗО, ВАО, СДН, СДМ, СДС, СДК, СТД тощо) і прохідницьких та вугледобувних комбайнів запровадили можливість комплектації обладнання МРГК, що ними випускається, у свої номенклатурні довідники [67, 68, 282, 284, 285, 290, 350, 365 и т.д.].

Всі акти приведені в Додатку И. 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).

Конструктивні виконання МРГК захищені рядом деклараційних патентів, патентів на корисні моделі, патентів на винахід. Основні з них приведені в [365–371].

Завдяки впровадженню МРГК у зазначені вище виробництва на підприємствах встановлено позитивний ефект з важливого екологічного питання: зниження техногенного навантаження за рахунок зменшення однієї з двох взаємозалежних груп впливів, пов'язаної з порушеннями в експлуатації технологічного обладнання [17, 330, 372].

На рисунку 7.1 приведена карта України із зазначенням місць впровадження МРГК, а на рисунку 7.2 карта розширена за рахунок впровадження в країнах СНД.

Отже, проведені дослідження та вироблені на основі них конструктивні рішення знайшли впровадження у реальне виробництво у вигляді системи "навколишнє середовище – обладнання – МРГК", що забезпечує покращення стану техногенно – екологічної безпеки.

## **7.2 Класифікація магніторідинних герметизуючих комплексів за особливостями рішень питань безпеки**

Кожен вид ущільнення вирішує вузьку технічну задачу. Герметизаторів широкого діапазону немає. У техніці використовують велику різноманітність конструктивних рішень і принципів дії при розробці герметизаторів, що відповідає конкретним вимогам. Кожен вид герметизаторів має свої переваги, недоліки і обмежений діапазон використання. Пошуки нових конструктивних рішень, які розширюють діапазон використання герметизаторів, завжди актуальні.

Особливо ця проблема актуальна для МРГК, так як це практично єдиний тип ущільнювальної системи, що дозволяє забезпечити практично 100 % герметичність, що важливо для підвищення техногенної безпеки НВ.

Якщо від величезного переліку об'єктів застосування МРГК перейти до видів використаних в цих об'єктах комплектуючих виробів, то перелік цей обмежиться герметизацією валів електродвигунів, насосів, компресорів, мішалок, редукторів, вакуумних вводів.

Вибір тієї чи іншої конструкції МРГК залежить, зокрема, від властивостей середовища, для якого призначено дане ущільнення. До властивостей відносяться: агрегатний стан (газ, рідина), тиск, температура, в'язкість, вміст зважених твердих частинок, вміст солей, хімічна агресивність по відношенню до конструкційних матеріалів, токсичність, займистість. Іншими не менш важливими факторами, що визначають конструктивні характеристики ущільнення, є: діаметр і швидкість обертання валу, його биття і можливі зміщення, максимально допустимі габаритні розміри ущільнення, умови його збирання і розбирання, а також кінематичні параметри герметизуючого з'єднання, значення і напрям відносних



Рисунок 7.1 – Впровадження МРГ в Україні



Рисунок 7.2 – Впровадження МРГ в країнах СНД

переміщень, їх швидкості, прискорення; екологічні вимоги, що обмежують витіки внаслідок токсичності, вибухопожежобезпечності тощо; гарантований термін служби і термін експлуатації.

Різні поєднання перерахованих вище характеристик дозволяють згрупувати конструкції МРГК за умовами їх застосування в небезпечних виробництвах наступним чином: 1) герметизатори для неагресивних середовищ (вода, масло і т.д.); 2) герметизатори для середовищ зі значним вмістом твердих домішок і абразиву; 3) спеціальні герметизатори.

Перші дві групи МРГК характеризуються великою різноманітністю конструкцій. Вони випускаються відносно великими партіями і входять в номенклатурні довідники ряду заводів, що випускають серійно технологічне обладнання.

Спеціальні МРГК – це найчастіше індивідуальні герметизатори, виготовлені для специфічних як умов роботи, так і видів технологічного обладнання (мішалки, вакуумні вводи і т.д.).

Вирішення завдань екологічної безпеки для спеціальних МРГК ускладнюється різноманіттям ущільнювальних середовищ (вибухонебезпечних, агресивних тощо).

Класифікація МРГК за конструктивними особливостями для НВ наведена на рисунку 7.3. Дослідження працездатності цього обладнання щодо розв'язання задач безпеки стосувалося моніторингу взаємозв'язку основних параметрів МРГК з елементами його конструкції, параметрами магнітної системи і властивостями МР.

З урахуванням цієї класифікації розглянуто і проаналізовано основні конструкції МРГК, впроваджених на підприємствах небезпечних виробництв.

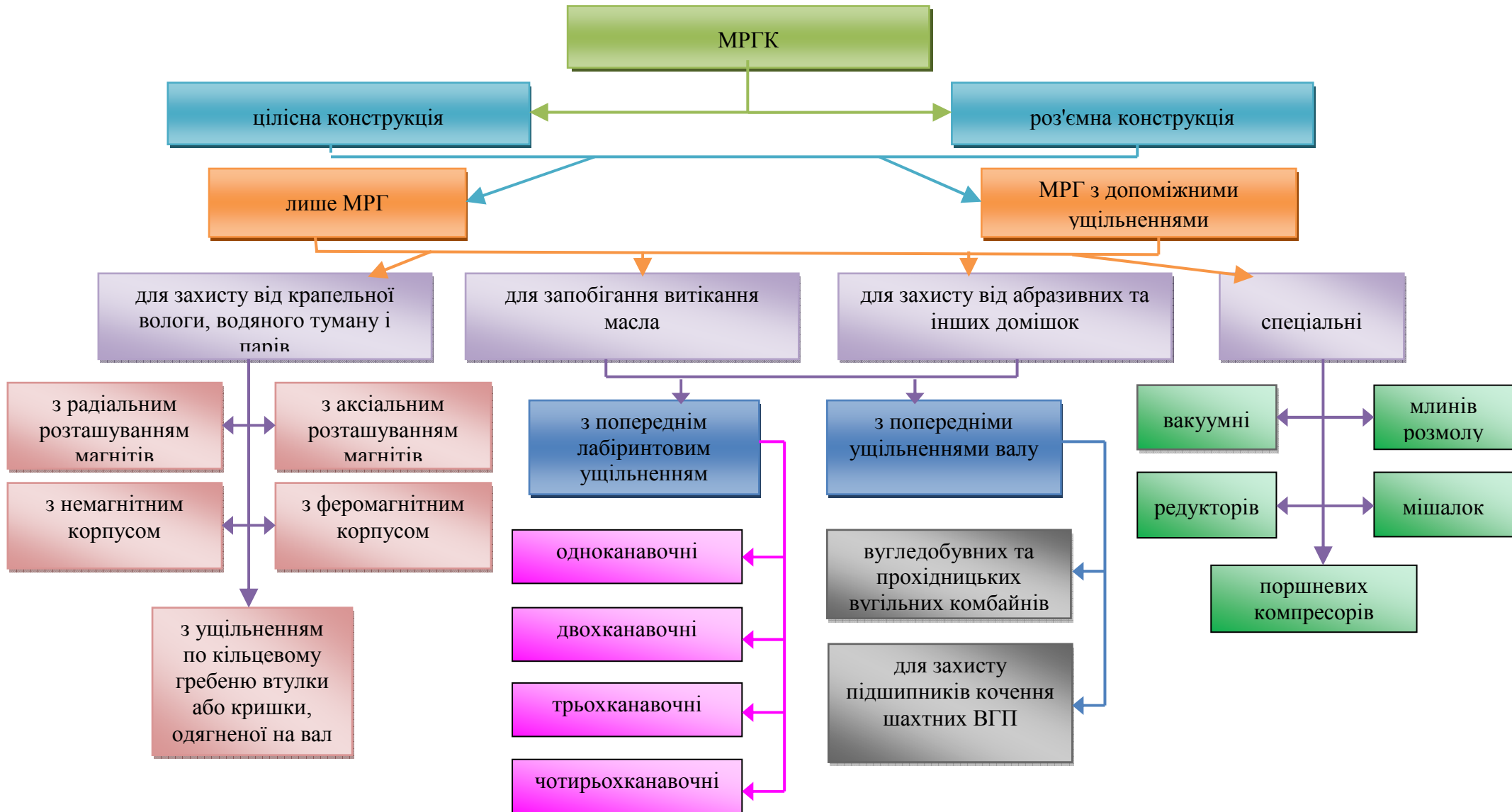


Рисунок 7.3 – Класифікація MRГК для небезпечних виробництв



### **7.3 Конструктивні рішення для магніторідинних герметизуючих комплексів із захисту від крапельної і дрібнодисперсної вологи**

Невід'ємним елементом практично будь-якого НВ є водооборотні системи. З огляду на необхідність великого теплостійому застосовуються градирні вентиляторного типу.

Більшість градирень, що експлуатуються в країнах СНД, є протиструминними градирнями з верхнім розташуванням вентилятора.

Всі заводи, що виготовляють привід для вентиляторів градирен, такі як Сафоново (Смоленська область, Росія), Лисьва (Пермська область, Росія), Н. Каховка (Херсонська область, Україна), Первомайськ (Луганська область, Україна), Тирасполь (Молдова), Єрewan (Вірменія), випускають малооборотні електродвигуни, де лопаті насаджуються на вертикальний вал двигуна. Переваги цієї конструкції становлять таке: низькі енергетичні втрати; відсутність редукторів, муфт тощо; найменший опір потоку повітря і найкращі умови для процесу теплообміну завдяки рівномірності потоку всередині градирні в порівнянні з іншими компоновками [373].

Інші компоновальні схеми, які активно пропонують закордонні виробники, впроваджуються при будівництві нових водооборотних систем, в основному в Росії та Казахстані [236, 284, 285].

В Україні старе обладнання, як правило, або замінюється на аналогічне, або проходить черговий капітальний ремонт [67, 233, 237].

Для обох випадків до нього пропонуються нововведення, що дозволяють значно підвищити надійність і довговічність роботи вентиляційної установки. Одним з таких нововведень є МРГК, що дозволяє значно підвищити ресурс приводу вентилятора.

Актуальність цієї задачі сумнівів не викликає, тому що саме привід має менший ресурс, ніж всі інші елементи вентиляційної градирні.

Низький ресурс роботи електродвигуна в першу чергу пов'язаний з його роботою в області постійного водяного туману і дрібнорозпиленої вологи, запобігти потраплянню якої всередину приводу традиційні типи ущільнень (сальникові, манжетні тощо) не в змозі.

Аналогічні проблеми існують і для приводу АПО, тому що їх умови експлуатації аналогічні. Для інтенсифікації теплообміну заводи-виробники постачають АПО разом зі зволожувачем повітря, що серйозно ускладнює експлуатацію приводу. Необхідно відзначити, що на електродвигунах виробництва Японії, Італії, Франції, Чехії, які експлуатуються на заводах України і країн СНД, ті ж проблеми з потраплянням вологи в випадку, коли робочі колеса вентиляторів встановлюються безпосередньо на вал електродвигуна.

Розробка МРГК для електродвигунів серії ВАСО, ВАСВ, АСВО, які використовуються для приводу вентиляторних градирень і АПО, є однією з масових розробок з МР. Вона впроваджена на п'яти електромашзаводах, що випускають електродвигуни даних серій.

Досвід таких технологічних рішень свідчить, що таким чином досягається на НВ і уникнення екологічних проблем, а саме зменшення ризику зародження аварійних ситуацій за рахунок запобігання попадання вологи всередину електродвигуна.

Проведені в дисертаційній роботі дослідження показали, що їх працездатність і надійність не залежить від кліматичних умов використання [321, 322, 329].

Використання МРГ починає враховуватися при проектуванні електродвигунів і постановці їх на виробництво. Так, УкрНДІВЕ при розробці конструкторської документації нового вибухозахищеного двигуна ВАСО 4-24 для ХК «Привід» заздалегідь передбачив використання магніторідинних герметизаторів. Конструкція МРГ узгоджувалася з

УкрНДІВЕ, а робочі креслення були передані інституту для використання при проектуванні [365].

Електродвигуни ВАСО, які використовують для приводу вентиляторів АПО, є вибухозахищеними. Магніторідинні герметизатори встановлюються замість штатних ущільнень вище елементів вибухозахисту і на неї не впливають. Установка МРГ на електродвигуни типу ВАСО у вибухозахищеному виконанні без зауважень була узгоджена з Українським науково-дослідним, проектно-конструкторським і технологічним інститутом вибухозахищеного і рудникового електрообладнання з дослідно-експериментальним виробництвом УкрНДІВЕ (м.Донецьк) [337, 341, 342, 365] ( Додаток К).

Конструкції цих МРГ детально розглянув і вивчив ВАТ "ВНДІНАФТОМАШ" (м.Москва), і рекомендував російським нафтопереробним заводам для впровадження. Гостехнадзор Росії в 1997р. наказав ВАТ "ВНДІНАФТОМАШ" проводити авторський нагляд при поставці на виробництво обладнання (в тому числі і приводу вентиляторних градирень і АПО) з метою забезпечення продукції, що випускається, діючою нормативно-технічною документацією і вимогам ГОСТу 15001.

У 2010 році ВАТ "ВНДІНАФТОМАШ" погодило ступінь захисту електродвигунів цього типу - не менше IP55 для приводу вентиляторів градирень і не менше IP65 для приводу АПО. Такий ступінь захисту відповідає кращим світовим зразкам електроприводу і є підтвердженням як високої надійності МРГ, так і здатності значно збільшувати ресурс електродвигуна. Матеріали, що підтверджують це, наведені в Додатку Л.

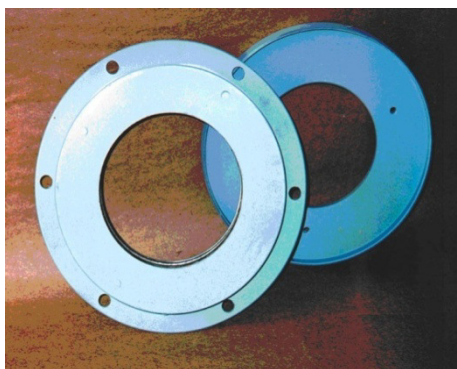
Конструктивно розрізняють такі МРГК для запобігання попадання вологи і водяного туману всередину електродвигуна:

- з аксіальною схемою розташування магнітів і немагнітними корпусами;
- з аксіальним розташуванням магнітів і феромагнітними корпусами;

- з радіальним розташуванням магнітів і феромагнітними корпусами;
- з ущільненням по кільцевому гребеню втулки або кришки, одягненої на вал.

Конструкції МРГК для основних типів електродвигунів, що застосовуються в промисловості, представлені в Додатку М.

На рисунку 7.4 відображені фотографії МРГК для електродвигунів типу а) АСВО 15-23-34; б) 2АСВО710; в) ENGV250 (зліва) і АWM-7110 (праворуч); г) ВАСВ200. На рисунку 7.5 надані фотографії електродвигунів а) ENGV250; б) ВАСО2-37-14; в) ВАСО 15-23-34 з МРГК.



а)



б)



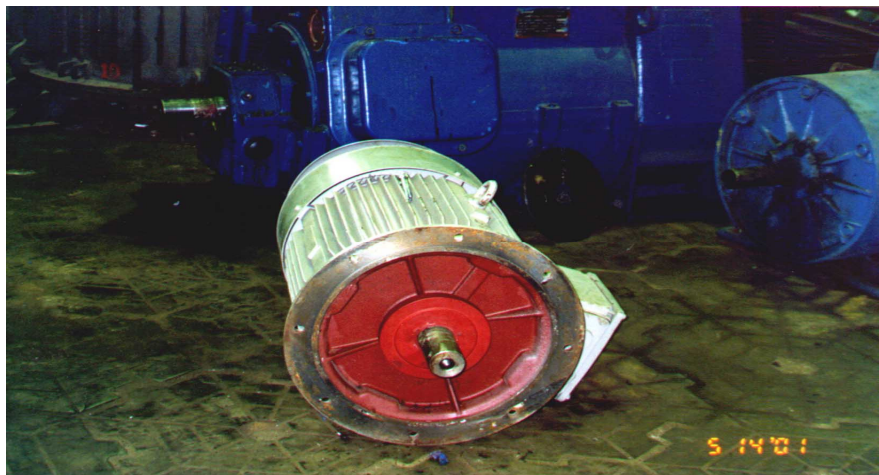
в)



г)

Електродвигуни типу: а) – АСВО 15-23-34, б) – 2АСВО710, в) – ENGV250 (зліва) і АWM-7110 (праворуч), г) – ВАСВ200

Рисунок 7.4 – Фотографії МРГК для електродвигунів



а)



б)



в)

а) – ENGV250, б) – ВАСО2-37-14, в) – ВАСО 15-23-34 вентилятора градирні ВГ-20

Рисунок 7.5 – Фотографії електродвигунів з МРГК

## **7.4 Магніторідинні герметизуючі комплекси з допоміжними попередніми ущільненнями для підвищення рівня екобезпеки**

**7.4.1 Магніторідинні герметизуючі комплекси з попередніми лабіринтовими ущільненнями.** МРГ прекрасно працюють при ущільненні газів, парів, аерозолів, однак при ущільненні рідких середовищ можливо гідродинамічне перемішування ущільненого середовища і МР, що буде вести до порушення працездатності герметизатора. Зазвичай, проблеми виникають при високих лінійних швидкостях в зазорі і/або утримуваних перепадах тисків. У такій ситуації для нормальної і тривалої роботи МРГ потрібно мінімізувати контакт масла з магнітною рідиною. Для цього використовується багатоступінчате безконтактне ущільнення зі стоком масла з кожної ступені, встановлене між МРГ і порожниною підшипника. Ущільнення та МРГ повинні виконуватися роз'ємними, з фіксацією половинок від можливого зсуву.

Найкращим рішенням є об'єднання двох ущільнюючих елементів – безконтактного ущільнення і МРГ – в одній конструкції, в одному корпусі у вигляді герметизуючого комплексу.

Конструкції МРГК виготовляються в габаритах штатного ущільнення і виконуються роз'ємними в осьовій площині для забезпечення можливості монтажу на штатне місце без розбирання підшипникового вузла [347, 355].

МРГК складаються з двох частин – внутрішнього лабіринтового ущільнення і зовнішнього магніторідинного герметизатора, об'єднаних в єдине ціле [339, 343, 344].

Наявність широких розмірних рядів для кожної моделі двигуна веде до того, що практично для кожного двигуна необхідно розробляти нову конструкцію герметизатора, в обов'язковому порядку враховуючи не тільки конструктивні особливості моделі, а й особливості виготовлення конкретного екземпляра електродвигуна.

Для герметизаторів підшипникових вузлів електродвигунів зазвичай

застосовується конструкція зі сталевим корпусом, в якому в якості одного з полюсних наконечників МРГ використовується внутрішня частина сталевого корпусу герметизатора. На ній встановлюються магніти з немагнітним відокремлювальним кільцем і другим полюсним наконечником, які закриваються зовні немагнітною кришкою. З тильного боку від МРГ до сталевому корпусу кріпиться лабіринтове ущільнення, виконане у вигляді окремої деталі, з немагнітного матеріалу. Дане рішення забезпечує високу жорсткість рознімної конструкції, необхідну для збереження точних розмірів під час і після проточки концентраторів магнітного потоку, які "нарізаються" індивідуально в залежності від діаметра вала в місці установки МРГ. Це особливо актуально для МРГ з великими діаметрами валів [238, 282, 306, 339, 353, 374].

В цілому конструкція МРГК конкретного двигуна буде залежати від осьового розміру штатного ущільнення і від взаємного розміщення посадної поверхні під ущільнення на корпусі та крищі підшипника і маслоскидуючої канавки, розташованої на поверхні вала, які і визначають можливі осьові розміри як лабіринтового ущільнення (і кількість канавок в ньому), так і самого МРГК. Маслоуловлювальна порожнина, що розділяє лабіринтове ущільнення і герметизатор, при установці МРГК на електродвигун повинна знаходитися строго проти маслоскидуючої канавки, розташованої на поверхні вала.

Відповідно до даних досвіду розробки комбіновані МРГ постійно вдосконалюються, що стосується магнітних систем, попередніх ступенів комбінованого МРГ, загальної конструкції в цілому в плані її технологічності і зниження вартості при підвищенні надійності та ефективності всього виробу. При розробці МРГ враховується досвід експлуатації і монтажу герметизаторів на різних підприємствах. Враховується необхідність високої жорсткості конструкції для збереження точних розмірів під час і після нарізки концентраторів магнітного потоку. Такий підхід щодо технології

ущільнення дозволяє вирішити деякі проблемні питання екологічної безпеки. Так, наприклад, електродвигуни серій СДН та СДД експлуатуються в умовах підвищеної вибухопожежонебезпечності. Тому потрібно виключити любий витік масла. Це завдання вирішують комбіновані МРГ.

Якщо аксіальні розміри підшипникового вузла дозволяють, в МРГК встановлюється більш розвинене попереднє лабіринтове ущільнення з трьома – чотирма маслоуловлювальними порожнинами зі стоком масла з кожної порожнини.

В даний час вже накопичений великий досвід застосування МРГК замість лабіринтових ущільнень на електродвигунах типу СДН, СДК, СДМ тощо в хімічній, металургійній, цементній промисловості і т.д. Впровадження МРГК дозволило збільшити надійність і ресурс електродвигунів, про що свідчить скорочення як мінімум в два рази кількості капремонтів.

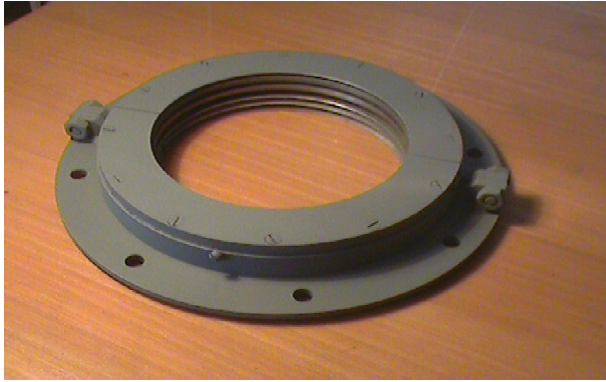
У 2010 році була узгоджена установка магніторідинного герметизатора на електродвигуни СДН нового покоління – СДН4 виробництва ТОВ «Завод крупних електричних машин», яке включило виконання з МРГ в свої номенклатурні довідники і опитувальні листи. Питання про необхідність установки МРГ включене також в опитувальні листи ТОВ «Електроважмаш-Привід» (м. Лисьва, Пермської обл.) і ТОВ «НВО «Ленінградський електромашинобудівний завод» (м. С. -Петербург).

У Додатку Н наведені приклади конструкцій МРГК підшипникових вузлів електродвигунів з підшипниками ковзання.

На рисунку 7.6 наведені фотографії конструкції МРГК для виносних підшипникових стійок електродвигунів, а на рисунку 7.7 електродвигуни з встановленими МРГК.

**7.4.2 Магніторідинні герметизуючі комплекси з попередніми манжетними ущільненнями валу.** В якості ущільнюючих елементів підшипникових вузлів у вугільних комбайнах і конвеєрах зазвичай





а)



б)



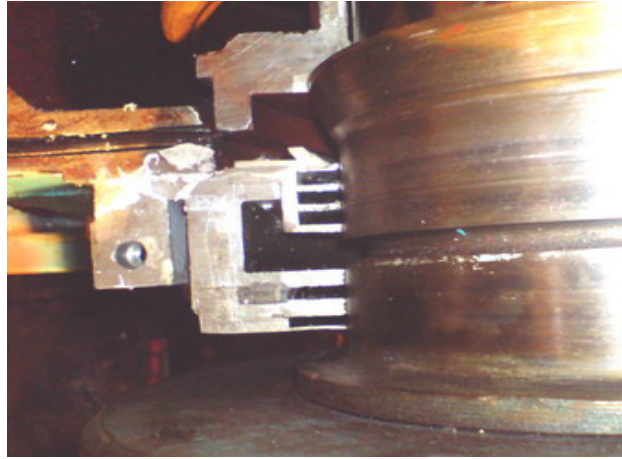
в)



г)

Електродвигуни типу: а) – СДН 2-15-39, б) – 2ФА3800-600, в) – GB2203  
(виробництва General Electric, США), г) – 3D модель СДН-2-16-4-9-6-У

Рисунок 7.6 – Фотографії МРГК для електродвигунів



а)



б)



в)

а) – СДН 2-17-44, б) – 318-265-04НВ (виробництва ЧКД, Чехія) з системою заправки магнітною рідиною, в) – електродвигун СТД 3150 (на центральній фотографії підшипникова стійка з МРГК, праворуч – МРГК крупним планом)

Рисунок 7.7 – Фотографії електродвигунів з МРГК

використовуються пакети гумових армованих манжет, в вентиляторах – поодинокі манжети. Манжети – недорогі і недефіцитні, добре працюють за умови інтенсивного змащування (запобігають витіканню масла з підшипникового вузла), але швидко виходять з ладу при ущільненні абразивних середовищ. В даний час виробники шахтних комбайнів для захисту підшипникових вузлів пропонують більш надійні, але і більш дорогі ущільнення – манжети зі зносостійких матеріалів виробництва фірми «ECONOMOS Austria GmbH» або торцеві ущільнення «Federal-Mogul Friedberg GmbH» (типу Duo-Cone).

Як показав досвід експлуатації і порівняльних випробувань, для захисту таких підшипникових вузлів з успіхом можна використовувати МРГК, складаємий з зовнішнього магніторідинного герметизатора і внутрішнього манжетного ущільнення, які взаємно підсилюють переваги та компенсують недоліки кожного типу ущільнень [352, 357].

Залежно від типу механізму і конструкції вузла штатного ущільнення МРГК може бути виконаний як у вигляді моноблока (МРГ з фланцем і внутрішньою порожниною, в яку вставляється гумова армована манжета), так і у вигляді складеної конструкції, що характерно для великих механізмів (кришки підшипника з фланцем, в центральній частині якої передбачено місце для манжети і установки МРГ), при цьому для зручності монтажу МРГК виконується роз'ємним в осьовій площині.

Дані ущільнення працюють у важких умовах. З одного (зовнішнього) боку ущільнення повинно запобігати попаданню в механізми вугільного пилу, частинок породи, бруду і води, яка застосовується для зрошення забою, з іншого боку (внутрішнього) ущільнення повинно запобігати витіканню мастила з підшипникового вузла. Додатково ущільнення повинне витримувати періодичне ударне навантаження.

Як правило, конструкції МРГК розробляються і виготовляються у вигляді окремого вузла, який встановлюється або замість кришки

підшипника захисного механізму зі збереженням її габаритних і посадочних розмірів, або в доопрацьовану кришку.

Однак для шахтних комбайнів виробництва «Горлівського машинобудівника» в зв'язку з їх вимогою до особливої міцності вузла ущільнення було прийнято рішення в якості деталей герметизатора використовувати доопрацьовані деталі штатного ущільнення, доповнені елементами магнітної системи.

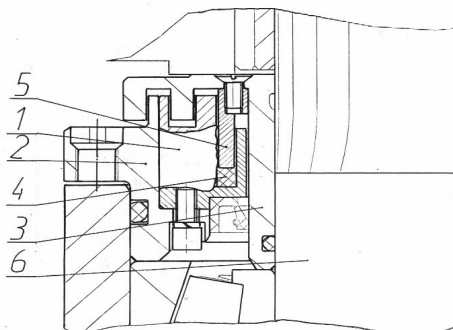
Конструкція, покладена в основу магніторідинних герметизаторів редуктора комбайнів, була застосована в МРГ валів деяких електродвигунів і добре зарекомендувала себе в експлуатації на ряді заводів України і Росії [353, 356–358].

Особливістю конструкції магніторідинних герметизаторів редуктора комбайнів є значна загальна довжина робочого зазору, за яким відбувається ущільнення, при порівняно малих габаритах магнітної системи. У середній частині МРГ посередині робочого зазору знаходиться кільцева порожнина, заповнена пористим матеріалом, яка виконує функцію резервуара магнітної рідини, використовуваної для поповнення робочого зазору [367].

Ущільнення в даному МРГ відбувається не по захищеному валу, а по кільцевому гребеню на фланці втулки вузла, що входить в кільцевий паз на торцевій поверхні кришки підшипникового вузла, при цьому магнітне поле замикається через заповнені магнітною рідиною робочі зазори між магнітопроводами і кільцевим гребенем (рис. 7.8).

Спочатку МРГК були встановлені на двох комбайнах 1ГШ68. Один з них введено в дослідно-промислову експлуатацію на шахті 50-річчя СРСР ДП «Краснодонвугілля», а інший на АП «Шахта ім. А.Ф. Засядька ». За час експлуатації комбайни з МРГ перебували під пильною увагою фахівців шахт і заводу, здійснювався контроль чистоти мастила в поворотних редукторах комбайнів.

Комбайном на шахті ім. Засядька видобуто 750 тис. т вугілля і він був виданий на поверхню у зв'язку з відпрацюванням лави. Протягом всього



1 – МРГ, 2 – кришка підшипника, 3 – втулка з фланцем, 4 – кільцева порожнина, 5 – кільцевий гребінь фланця втулки, 6 – вал  
Рисунок 7.8 – Уніфікований МРГ поворотного редуктора

терміну експлуатації комбайна з МРГ проникнення в мастило поворотного редуктора вугільного та породного пилу або штибу не встановлено, витік масла по вихідному валу не спостерігався. Спираючись на досвід експлуатації комбайнів 1ГШ68 в аналогічних гірничо-технічних умовах, фахівці шахти і заводу відзначають, що стандартні гумові манжети в шахтних ущільненнях повинні були замінитись не менше чотирьох разів.

Комбайном на шахті ім. 50-річчя СРСР видобуто 665 тис. т вугілля. Зауважень щодо функціонування МРГ поворотних редукторів немає. На загальну думку фахівців шахти і заводу ресурс ущільнень не був вироблений і вони забезпечили експлуатацію комбайна до капітального ремонту.

Для комбайнів МРГК випускаються в точних габаритах штатних ущільнень, відповідно до вимог виробників і проектувальників комбайнів щодо міцності вузла ущільнення. В якості деталей герметизатора використовуються доопрацьовані деталі штатного ущільнення, доповнені елементами магнітної системи. При проектуванні МРГ використовуються креслення штатних ущільнень, отримані від виробників і розробників

комбайнів. Конструкція МРГ в загальному випадку досить сильно залежить від конструкції штатного ущільнення. Обов'язково передбачається відокремлювальна манжета, яка встановлюється перед порожниною підшипника для захисту МРГ від трансмісійного масла. Основна складність при конструюванні МРГ з метою підвищення рівня промислової та техногенно – екологічної безпеки полягає в обмеженості в габаритах при досить значних розмірах самого виробу. При цьому деякі деталі МРГ або елементи деталей виходять досить тонкими в перерізі, а точність виготовлення через відносно невеликі розміри робочого зазору і необхідність його забезпечення потрібна висока. Конструкція МРГ узгоджується як з заводом-виробником, так і з розробником комбайна.

Так конструкції герметизаторів виконавчих органів деяких комбайнів, що випускалися на АТ «Горлівський машинобудівник» надані на рисунках 7.9 – 7.14. Проблемні питання з ущільненнями щодо екологічності машин стосувалися умов експлуатації. На шахтах України розробляються крутоспадні пласти. Середня глибина розробки перевищує 720 м, а приблизно 30 шахт працюють на глибині 1000 – 1400м [19]. При збільшенні глибини проведення гірничих робіт підвищується рівень загального газовиділення на виїмковій ділянці [217]. Тому для запобігання можливості вибуху потрібно повністю виключити витік масла при експлуатації вугільних комбайнів. Саме встановлення МРГК дозволило це зробити.

Комбайни 1ГШ68, РКУ10, РКУ13, УКД200-250 очисні, з горизонтально розташованими шнековими виконавчими органами. На фланцях втулок МРГ даних комбайнів виконані розвинені лабіринтові ущільнення. Відокремлювальна манжета знаходиться нижче магнітної системи. Для комбайна УКД200-250 при використанні МРГ виконана додаткова порожнина для заправки магнітної рідини [217].

Комбайн КПД – прохідницький, вибірного типу, з аксіальним виконавчим органом. На відміну від попередніх комбайнів, втулка

ущільнення комбайна КПД розташована всередині підшипникового вузла і зовні практично повністю закрита кришкою (корпусом МРГ). Проте, вдалося розмістити розвинене попереднє лабіринтове ущільнення. Відокремлювальні манжети (можлива установка двох манжет) розміщені зовні по відношенню до магнітної системи. Герметизатор досить габаритний – діаметр вала 195 мм, корпусу – 470 мм.

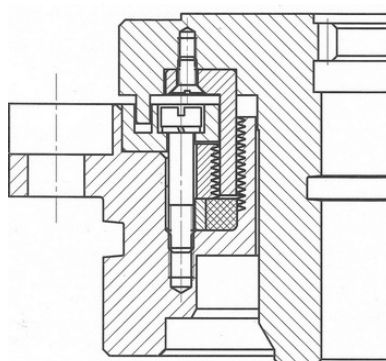
Комбайн КА200 – очисний, з двома рознесеними барабанними з вертикальною віссю виконавчими органами. Штатне ущільнення торцеве. Незважаючи на невеликий осьовий розмір (46 мм), герметизатор містить попередні лабіринтове і манжетне ущільнення.



а)



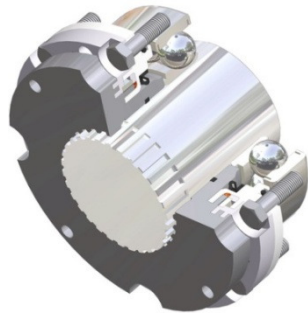
б)



в)

а) – герметизатор, б) – модель, в) – поперечний розріз

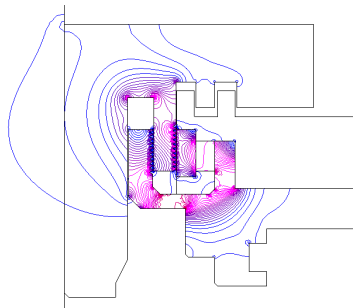
Рисунок 7.9 – МРГК комбайна 1ГШ68



а)



б)



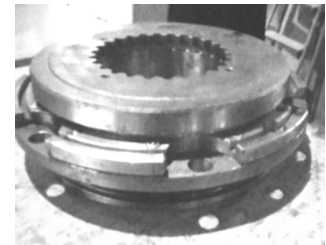
в)

а) – модель, б) – поворотный редуктор, в) – розподіл індукції магнітного поля

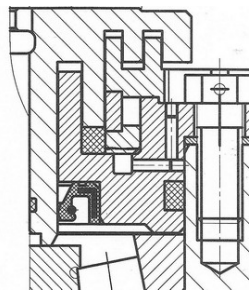
Рисунок 7.10 – МРГК комбайна РКУ10, РКУ13



а)



б)

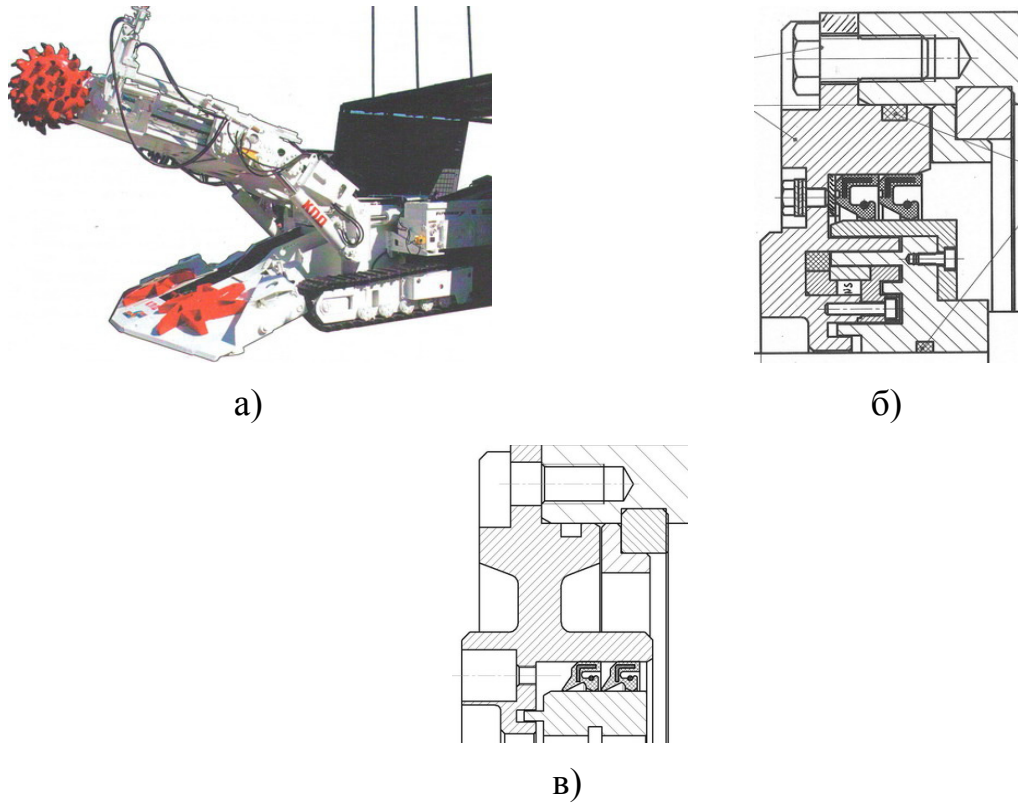


в)

а) – комбайн УКД200-250, б) – герметизатор, в) – поперечний розріз

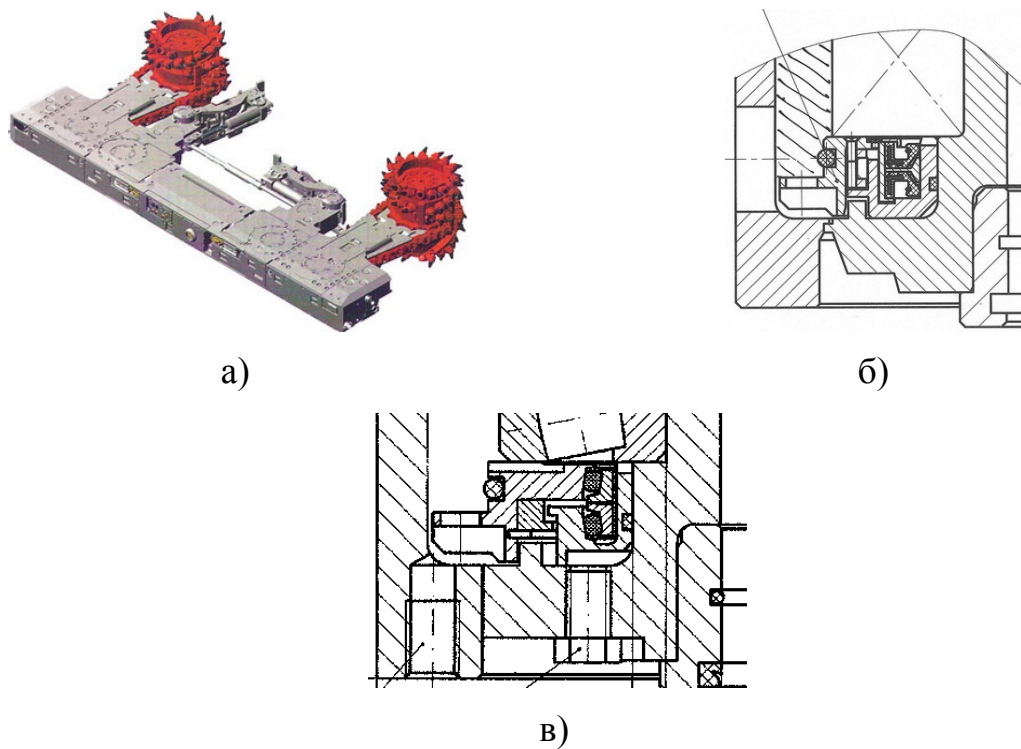
Рисунок 7.11 – МРГК комбайна УКД200-250





а) – комбайн КПД, б) – МРГ комбайна, в) – штатне ущільнення

Рисунок 7.12 – МРГК комбайна КПД



а) – комбайн КА200, б) – МРГ барабана, в) – штатне ущільнення

Рисунок 7.13 – МРГК виконавчого органу комбайна КА200

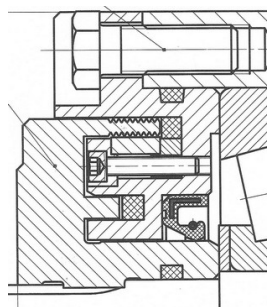


Рисунок 7.14 – МРГК виконавчого органу комбайна УКД200-400

Для комбайна КА200 також був розроблений герметизатор редуктора. Крім МРГ редукторів комбайнів, були розроблені МРГ редукторів скребкових конвеєрів, які працюють спільно з очисними комбайнами. На рисунку 7.15 показан МРГ редуктора скребкового конвеєра КСД-27. Габаритні розміри – зовнішній діаметр вузла 500 мм, осьовий розмір 230 мм. У фланці втулки, що одягається на вал редуктора, розташовані дві магнітні системи з радіальним і осьовим розташуванням магнітів. Відокремлювані манжети збережені.

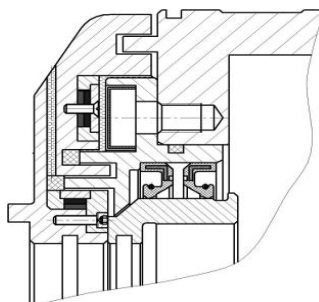


Рисунок 7.15 – МРГК редуктора скребкового конвеєра КСД-27

У МРГ шахтних вентиляторів зазвичай використовується аксіальна схема розташування магнітів з ущільненням по поверхні захищеного вала, яка відрізняється малими осьовими розмірами.

Вони складаються з різних кришок підшипникових вузлів з різними манжетами (використовуються стандартні манжети, стик

розташований зверху), на яких монтуються роз'ємні МРГ.

Аналіз конструкцій МРГК для шахтних ВГП наведено в Додатку Н.

### **7.5 Спеціальні магніторідинні герметизуючі комплекси для специфічного технологічного обладнання та умов роботи**

У підрозділі 7.2 зазначалося, що спеціальні МРГК – це як правило індивідуальні герметизатори. Їх особливістю є те, що вони виготовляються для дорогого і відповідального технологічного обладнання. Від надійної експлуатації такого обладнання залежить весь технологічний процес виробництва. Наприклад, функціонування виробництва карбаміду визначається в першу чергу надійною експлуатацією поршневих і відцентрових компресорів. На рисунку 7.16 показаний компресор двоокису вуглецю 4ДВК-210-10 поз. К-102 і електродвигун приводу компресора, на який встановлювався МРГК.

Широке застосування на НВ знайшли апарати зі змішувальними пристроями (особливо в хімічній і гірничозбагачувальній галузях). Загальною для будь-якого типу апарату є проблема забезпечення надійної герметизації валів мішалок. Повна відсутність витоків з об'єму апарату сприяє вирішенню кількох завдань: по-перше, підвищення рівня екологічної безпеки; по-друге, захист середовища від потрапляння різних включень, домішок і т.д., що часто призводить до порушення технологічного процесу і браку продукції [375].

Умовно до спеціальних МРГК були також віднесені і вакуумні герметизатори, незважаючи на те, що в світі це найбільш застосовуваний тип МРГ, що підтверджується численними публікаціями [61, 64, 66 і т.д.].

Це пов'язано з тим, що вакуумні МРГ набули найбільшого поширення при виробництві електронних мікросхем, комп'ютерів, установок по вирощуванню кристалів і т.д. Відзначимо, що ці галузі промисловості, по-

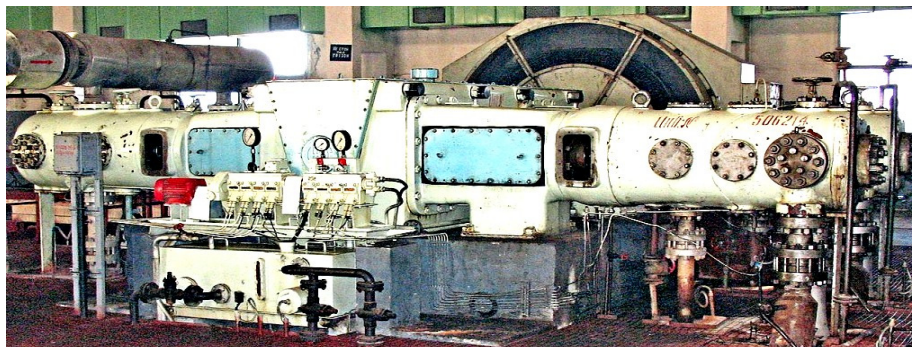


Рисунок 7.16 – Компресор двоокису вуглецю 4ДВК-210-10 поз. К-102 і електродвигун приводу компресора

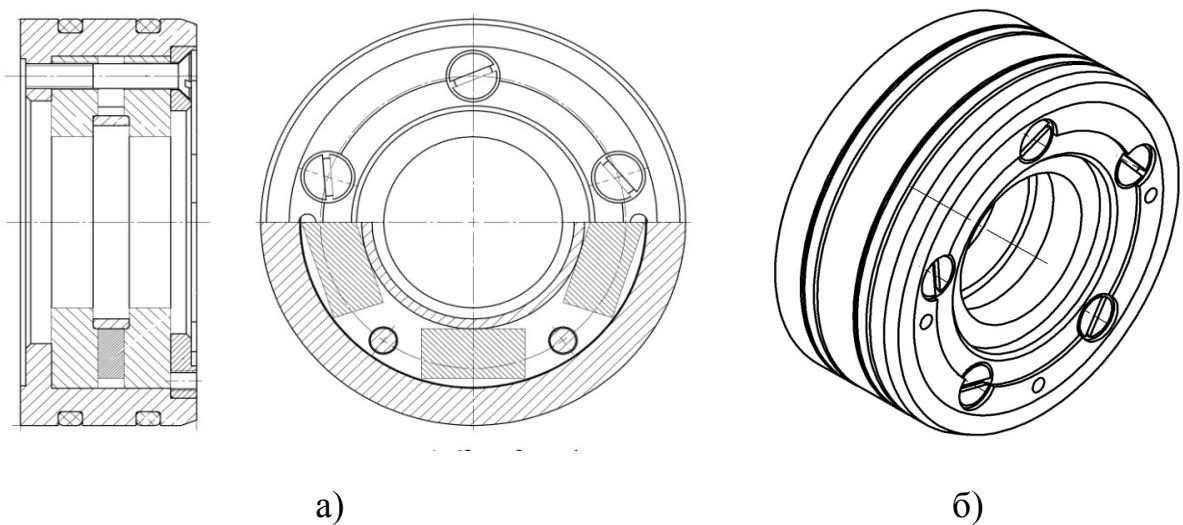
перше, не належать до підприємств НВ, по-друге, вони дуже слабо розвинені в країнах СНД. На небезпечних виробництвах вакуумні МРГК актуальні для забезпечення герметичності на вакуумних насосах, мішалках і т.д.

Детально вивчені конструкції вакуумного МРГК для змішувального пристроя-живильника ТД–200. Пророблення конструкції МРГК проводилось спільно з проробленням конструкції живильника. Це дозволило вирішити дві найскладніші проблеми, пов'язані із застосуванням герметизаторів для мішалок, ще на етапі проектування. Перша проблема стосувалася обмеженого простору, в якому потрібно було розмістити МРГ, особливо це було характерно при заміні манжетних ущільнень. Друга проблема була пов'язана з тим, що для мішалок характерні високі значення биття вала, а величина робочого зазору МРГ не повинна перевищувати 0,25 мм.

Биття вала небезпечно з двох причин. По-перше, якщо воно більше ширини зазору, то ущільнення може бути зруйновано. По-друге, при ексцентричному розташуванні валу і концентраторів магнітного потоку ширина робочого зазору змінюється в азимутальному напрямку, тобто змінюється і напруженість магнітного поля в зазорі. Там, де зазор збільшився, відповідно зменшилася напруженість магнітного поля, а значить і утримуюча здатність ущільнення. Це зменшення може бути значним і знехтувати їм, особливо для напірних МРГ, не можна. Для ліквідації негативних наслідків, пов'язаних з биттям вала, на валу в безпосередній близькості від МРГ були встановлені два підшипника. Проектантом було спеціально для цього виділено місце.

Для надійного утримання МР при перепадах тиску не менше  $3 \text{ атм}$  магнітну індукцію на поверхні концентратора магнітного потоку довелося збільшувати до  $2 \text{ Тл}$ .

Для підвищення надійності і ремонтпридатності магніторідинна частина була виконана у вигляді окремого блоку (рис. 7.17 а і 7.17 б), який входить безпосередньо в магніторідинний герметизатор (рис. 7.18).



а) – загальний вигляд, б) – 3D-модель

Рисунок 7.17 – Магнітний блок магніторідинного герметизатора

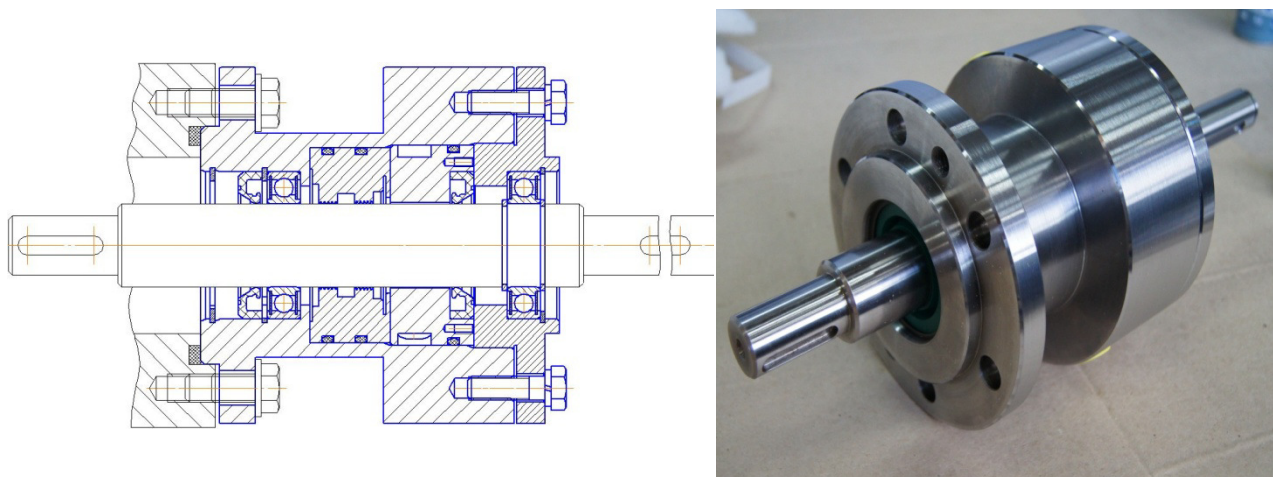


Рисунок 7.18 – Магніторідинний герметизатор для мішалки живильника TD-200

Випробування МРГ проводилися на виробничій базі ТОВ НВЦ «Анод» за допомогою стислого азоту. В камеру МРГ подавався тиск зі швидкістю, що не перевищує 5 атм в хвилину. Спочатку перевірявся піковий робочий тиск 3 атм. Кілька етапів підвищення надлишкового тиску від 0 до 3 атм показали, що МРГ надійно витримує пікове робоче навантаження (було проведено 50 етапів). При подальших випробуваннях тиск піднімався до межі, поки не стався прорив азоту через МРГ в атмосферу. Граничний тиск досяг 6,5 атм.

Решта конструкцій спеціальних МРГК наведені в Додатку П.

## **7.6 Економічні аспекти застосування магніторідинних герметизуючих комплексів**

Більш ніж двадцятирічний досвід впровадження МРГК майже на 200 підприємствах країн СНД підтвердив доцільність використання МРГ замість не завжди задовільно працюючих штатних ущільнень традиційних конструкцій.

Загалом МРГК починають встановлювати на свою продукцію заводи-виробники великих електродвигунів, підвищуючи надійність готової техніки, а споживачі, знайомі з роботою МРГ, вважають за краще купувати електродвигуни саме з такими ущільнювальними пристроями вихідних валів, що гарантує відсутність проблем з роботою підшипників і втратою опору ізоляції обмотки при експлуатації.

Регулярно проводжуваний авторський нагляд за роботою МРГК показав, що в більшості випадків вони встановлювалися тоді, коли незадовільний технічний стан агрегату або наявність проблем експлуатації порушувало регламент роботи технологічної установки в цілому.

Тут мова йде, перш за все, не про зменшення планових витрат, а про відсутність збитків, пов'язаних з відмовами обладнання та виведенням технологічної установки з експлуатації для усунення несправностей.

Впровадження МРГК не пов'язане безпосередньо з такими показниками, як к.к.д., продуктивність тощо. У разі установки МРГК замість ущільнень традиційних конструкцій зростає ресурс роботи обладнання і надійність його роботи.

Застосування МРГК дозволяє, по-перше, виключити 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 по демонтажу устаткування, транспортування його до цеху, так і витрати на заміну комплектуючих (наприклад підшипників) [339, 343].

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

Розглянуто рішення цієї проблеми для МРГК, призначених для захисту приводу вентиляторних градирень і АПО, тому що тут статистична вибірка найбільша [233, 236, 282].

Багаторічний контроль роботи МРГК для електродвигунів серії ВАСО, ВАСВ, АСВО показав збільшення терміну служби верхнього підшипникового вузла в 4 – 5 разів і як мінімум в 2 рази скорочення кількості капітальних ремонтів.

Це добре ілюструється на великій статистичній вибірці з АТ «Северодонецьке об'єднання Азот», де в кращі роки тільки для приводу вентиляторних градирень використовувалося 164 електродвигуна.

Северодонецький «Азот» досить обережно поставився до впровадження МРГК. Тільки після всебічного вивчення та дворічної дослідно-промислової апробації погодив широкомасштабне впровадження МРГК [233, 335].

З огляду на велику кількість електродвигунів градирень, Северодонецький «Азот» закуповував МРГ для них партіями порядку 30 штук в рік. Контроль роботи МРГ, організований ще в 1997 року, не припинявся аж до вимушеної зупинки заводу в 2014 р.

На рисунку 7.19 подана залежність закупівель підшипників для електродвигунів ВАСО за 1988–2002 рр. Коефіцієнт  $k$  являє собою відношення кількості закуплених в даному році підшипників до числа електродвигунів, які працювали в тому ж році. Після 2002р. значення коефіцієнта  $k$  знаходиться в межах статистичної похибки, тому на рисунку 7.19 воно не наводиться.

На рисунку 7.20 надана величина оцінки техногенного ризику, розрахована за допомогою вдосконаленого методу Файн-Кінні, для тих же років, які досліджуються на рисунку 7.19.

У вологому середовищі верхній підшипниковий вузол працював тільки на 20-25 % свого ресурсу. Збільшення ресурсу роботи підшипників пов'язано зі збільшенням ресурсу роботи електродвигунів. Діаграма числа ремонтів електродвигунів в залежності від часу має той же характер, що і на рисунку



7.19 Збільшення міжремонтного періоду як мінімум в 2 рази призводить до суттєвої економії.

Розгляд рисунку 7.20 дозволяє зробити висновок про зниження ризику техногенної небезпеки приблизно в 4–7 разів при оснащенні електродвигунів ВАСО магніторідинними герметизуючими комплексами.

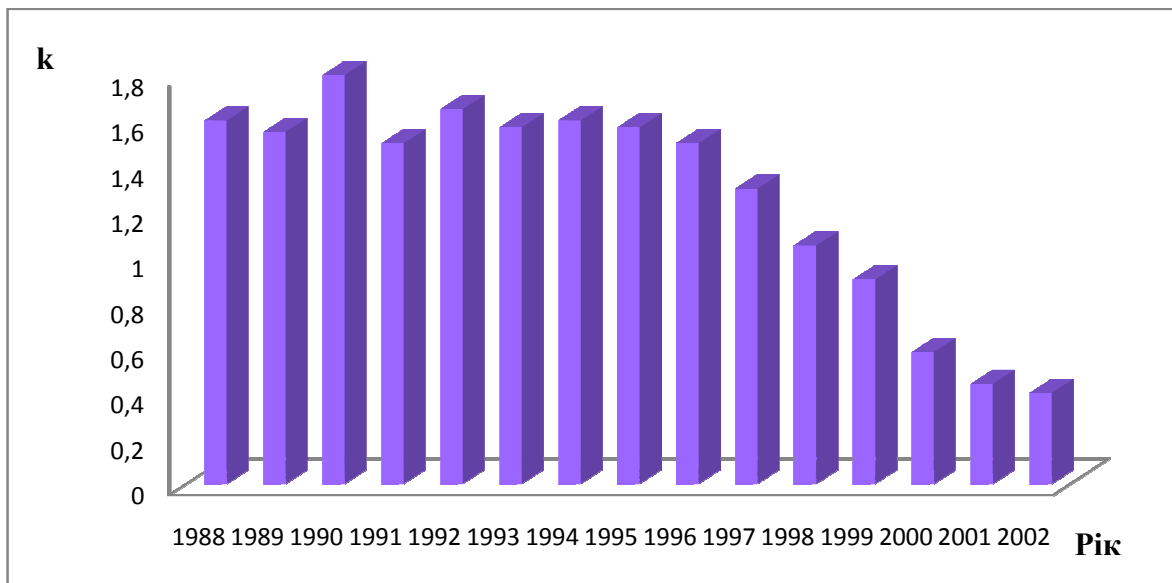


Рисунок 7.19 – Діаграма закупівлі підшипників для електродвигунів ВАСО

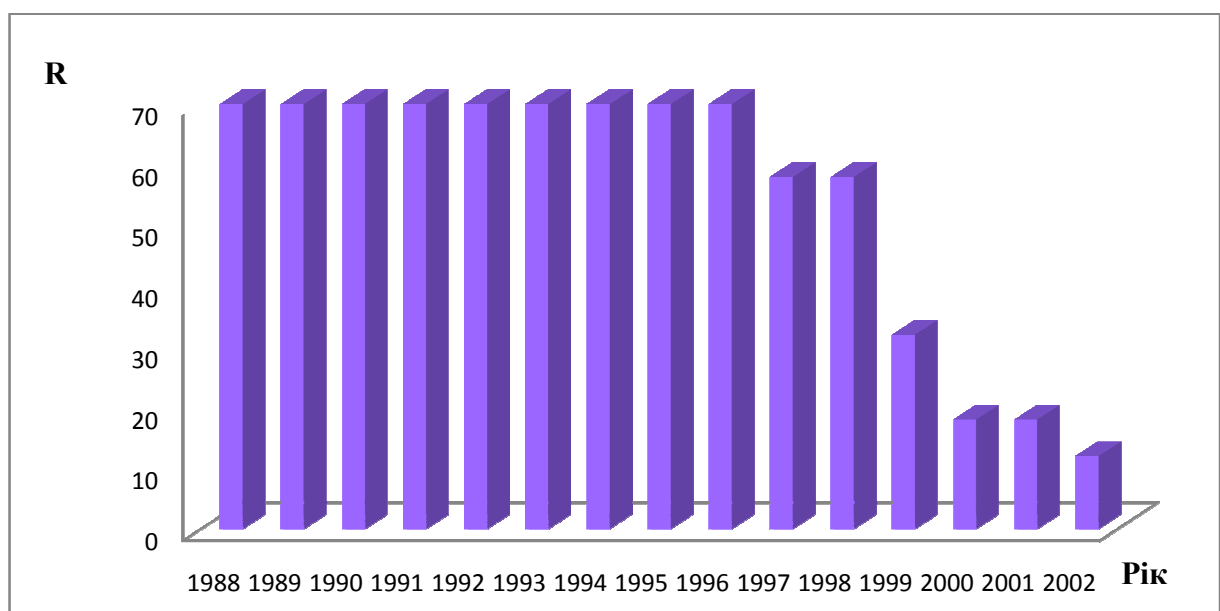


Рисунок 7.20 – Оцінка техногенного ризику за 15 років

Застосування МРГК збільшує вартість електродвигуна не більше ніж на 10 %, але при цьому мінімум на 200 % скорочує дорогі і великі експлуатаційні витрати, безношеність вала при роботі МРГ дозволяє мати мінімальні втрати на тертя. Прості тріботехнічні розрахунки показують, що за рік експлуатації електродвигуна з сальниковим або манжетним ущільненням через тертя втрачається близько 500 кВт·год. Втрати на тертя в разі впровадження МРГ на два порядки нижче.

Такі ж результати були отримані і на інших підприємствах, де було впроваджено понад 100 МРГК – ТОВ «ЛИННИК» (м Лисичанськ), ПАТ «Укртатнафта» (м. Кременчук), ТОВ «Кінеф» (м. Кіриші) і т.д . [334].

Таким чином МРГК економічно доцільно використовувати для захисту дорогого або відповідального обладнання, яке не просто експлуатується в тяжких умовах, а де необхідною умовою нормальної роботи є досягнення повної стовідсоткової герметичності. В даному випадку використовується основна перевага МРГ перед традиційними ущільненнями – повна відсутність витоків або протікання.

На жаль, МРГК мають не найбільшу нішу застосування, але в розглянутих в даній роботі областях застосування МРГК за рахунок збільшення ресурсу і надійності обладнання досить швидко окупається і є економічно більш ефективними порівняно з дешевшими за ціною традиційними ущільненнями.

Отже, застосування МРГК істотно збільшує рівень техногенної та екологічної безпеки, що було детально досліджено в розділі 6.

## **7.7 Висновки до розділу 7**

1. З метою підвищення рівня безпеки небезпечних виробництв створені науково-методичні та технологічні підходи до розробки МРГК. На їх основі спроектовані і впроваджені більше 4000 конструкцій МРГК на майже 200

промислових підприємствах НВ в Україні, Росії, Білорусі, Молдові, Узбекистані, Казахстані, Естонії.

2. Розроблено класифікацію впроваджених на небезпечних виробництвах МРГК, що дозволило систематизувати їх вплив на підвищення рівня техногенно – екологічної безпеки.

3. З урахуванням класифікації проаналізовано основні типи МРГК, які забезпечують практично 100 % герметичність, що необхідно для підвищення рівня техногенної безпеки. Доказано, що забезпечення повної герметичності гарантує системну узгодженість оцінювання і коригування працездатності та техногенно – екологічної безпеки.

4. Наявність МРГК збільшує ступінь захисту електродвигунів до IP65, що відповідає кращим світовим зразкам і значно підвищує їх надійність і працездатність.

5. 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. У підсумку це призводить до зниження ризику зародження аварійних ситуацій та поліпшенню стану екологічної безпеки.

6. На всі основні типи конструкцій і способи магніторідинної герметизації отримані патенти України і Росії.

7. П'ять електромашинобудівних заводів України і Росії серійно випускають електродвигуни, до складу яких входить МРГК. Також МРГК серійно встановлюються на поворотних редукторах шахтних комбайнів.

Основні наукові і практичні результати, представлені в цьому розділі, в повній мірі відображені в публікаціях автора [67, 68, 215, 217, 218, 232, 236–238, 268–270, 282, 284, 311, 320, 334–371, 374, 375].

## 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 сприйнятливність 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Демешок О.О. Стратегічний потенціал промисловості України: проблеми та перспективи формування. Київ: ДУ «ІЕПСР НАНУ», Вид-во «В.С. Вишемирський», 2016. 469 с.
2. Обиход Г.О. Передумови визначення стратегічних векторів гарантування природно-техногенної та екологічної безпеки в контексті сталого розвитку регіонів України. *Reporter of the Priazovkiy state technical university*. 2015. №29. С. 280 – 288.
3. Романов В.И. Прикладные аспекты аварийных выбросов в атмосферу: справочное пособие. М: ФИЗМАТКНИГА, 2006. 368с.
4. Азаров С.І., Сидоренко В.І., Задунай О.С. Аналіз факторів техногенного впливу АЕС на довкілля. *Екологічні науки*. 2018. №1 (20). Том 1. С. 57–66.
5. Кустов М.В. Химически опасные выбросы в атмосферу при техногенных авариях на предприятиях Украины. *Безопасность в техносфере*. 2017. №3 (май–июнь). С. 16–22.
6. Биченок М.М., Трофімчук О.М. Проблеми природно-техногенної безпеки в Україні. К.: УІНСіР, 2002. 268 с.
7. Гончаренко Ю.Ю., Дивизинюк М.М., Рыжкин А.С. Особенности чрезвычайных ситуаций, приводящих к загрязнению атмосферы радиоактивными и отравляющими веществами. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2016. №3 (56). С. 132–136.
8. Сафранов Т.А., Адаменко Я.О., Приходько В.Ю. Системний аналіз якості навколишнього середовища. Одеса: ТЕС, 2014. 244 с.
9. Меньшиков В.В., Швыряев А.А. Опасные химические объекты и техногенный риск. М.: Изд-во химич. фак. Моск. ун-та, 2003. 254с.
10. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. М.: Издательский центр „Академия“, 2003. 512с.

11. Соколов Ю.И. Катастрофы начала XXI века. *Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования*. 2011. Том 1. №1(1). С. 90–96.
12. Чугай А.В. Джерела екологічної небезпеки. Одеса: ОДЕКУ, 2014. 59с.
13. Викторов А.А., Ксенофонов А.И., Морозова Е.Е. Экологические риски здоровью населения: монография. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. 152 с.
14. Лазарева Н.В. Влияние экологических аварий и катастроф на здоровье населения. *Региональное развитие: электронный научно-практический журнал*. 2017. №4(22). Режим доступа: <https://regrazvitie.ru/vliyanie-ekologicheskikh-avarij-i-katastrof-na-zdorove-naseleniya>
15. Сугак Е.В., Кучкин А.Г., Окладникова Е.Н. Надежность технических систем и техногенный риск: в 3ч. Ч.1. Техногенная безопасность. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2011. 260с.
16. Зеркалов Д.В., Кацман М.Д., Адаменко М.Д. та інші. Наукові основи техногенно-екологічної безпеки: монографія, за ред. Д.В. Зеркалова. К.: «Основа», 2014. 372 с.
17. Кучеров К.І., Овчинникова Н.Б. Сучасні проблеми екологічної безпеки функціонування гірничо-збагачувальних комбінатів та їх впливу на оточуюче природне середовище. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. 2009. №849. С. 90–97.
18. Грядущий Б.А., Коваль А.М., Зданевич В.Е. Забезпечення безпеки машин і устаткування стаціонарних установок шахт, що довгостроково експлуатуються. *Вісті Академії інженерних наук України*. 2004. №2(22). С. 21–27.
19. Бондаренко В.І., Малашкевич Д.С. Сучасний стан розвитку вугільної галузі України. *Вісті Академії інженерних наук України*. 2016. №1(43). С. 19–21.

20. Коваль А.Н., Мелковский В.И., Чехлатый Н.А. Основные направления повышения техногенной безопасности и энергетической эффективности стационарных установок на предприятиях угольной отрасли. *Вестник МАНЭБ*. 2013. №2. С. 23–28.

21. Логвиненко В.И., Мялковский В.И., Стешенко В.А., Трибухин В.А. Повышение безопасности эксплуатации и снижении энергопотребления шахтных вентиляторных установок главного проветривания. *Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: збірник наукових праць*. Вип. 96. Донецьк: ВАТ «НДІГМ ім. М.М. Федорова», 2003. С. 43–49.

22. Трибухин В.А., Стешенко В.А., Демченко А.В., Мельничук А.С. Определение вибрации вентилятора методом комплексного обследования. *Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: збірник наукових праць*. Вип. 104. Донецьк: ВАТ «НДІГМ ім. М.М. Федорова», 2010. С. 48–52.

23. Руденко С.В., Гогунский В.Д. Оценка экологической безопасности в проектах: монография. Одесса: Феникс, 2008. 153 с.

24. Адаменко Я.О. Оцінка впливів техногенно небезпечних об'єктів на навколишнє середовище: науково-теоретичні основи, практична реалізація: автореф. дис. на здобуття ступ. докт. техн. наук 21.06.01: Івано-Франківськ, 2006. 25 с.

25. Бетин А.В., Бондарева Н.В., Клименко Т.С. Теория и конструкция систем экологической безопасности. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2006. 144 с.

26. Баришнолец В.А. Системный анализ катастроф, происходящих в мире. *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2010. Том 2. №1–2. С. 162–176.

27. Побережний Л.Я., Яворський А.В., Цих В.С. та інші. Підвищення рівня екологічної безпеки трубопровідних мереж нафтогазового комплексу

України. *Техногенно-екологічна безпека*. 2017. № 1. С. 24–31.

28. Либерман А.Н. Техногенная безопасность: человеческий фактор. СПб: Центр информатики "Гамма-7". 2006. 131 с.

29. Garrison W.G. Large property damage losses in the hydrocarbonchemical industries. A Thirty-year review. New York. 1998. 56 p.

30. Дорогунцов С.И., Ральчук А.Н. Управление техногенно-экологической безопасностью в контексте парадигмы устойчивого развития. К.: Наукова думка, 2002. 200 с.

31. Хомутов С.О. Система поддержания надежности электрических двигателей на основе комплексной диагностики и эффективной технологии восстановления изоляции: монография. Электронные данные. Барнаул: ООО «МЦЭОР», 2015. 1 эл. опт. диск (CD-R); 12 см.

32. Никиян Н.Г., Ямансарин И.И. О влиянии климатических факторов и режимов работы на эксплуатационную надежность асинхронных двигателей. *Вестник ГИУА. Серия "Электротехника, энергетика"*. 2013. Вып. 16, №1. С. 27–36.

33. Конюхов Н.Н., Сивокобыленко В.Ф. Научно–техническая программа «Энерго- и ресурсосберегающие разработки и технологии для электрических машин топливно-энергетического комплекса Донбасса». *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. №9 (158). 2009. С.140–147.

34. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Безопасность высокорисковых объектов химической техники. *Химическая техника*. 2010. № 3. С. 4–10.

35. Панкратова И.Д. Системный анализ в динамике диагностирования сложных технических систем. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2008. №1. С. 33–49.

36. Кузьмин А.А., Чириков А.Г. Подход к оценке уровня безопасности опасных производственных объектов с использованием элементов теории

квалиметрии. *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. 2010. № 4. С. 1–10.

37. Коваль А.Н., Пристром В.А., Демченко А.В. Проблемы установления остаточного ресурса длительно действующих шахтных подъемных машин. *Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: збірник наукових праць*. Вип. 103. Донецьк: ВАТ «НДІГМ ім. М.М. Федорова», 2009. С. 97–101.

38. Шец С.П. Повышение износостойкости подшипниковых узлов трения машин и механизмов: Автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук.: 05.02.04.: Брянск, 2011. 36 с.

39. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения: справочник-каталог. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.

40. Хасселфелд Р. Правильный выбор защитных уплотнений подшипников. *Химическая техника*. № 9. 2017. С. 16–17.

41. Бузовкин А.Е. Защитные лабиринтные уплотнения подшипниковых узлов *Flowsolve Bearing Gard*. *Химическая техника*. № 4. 2017. С. 14–15.

42. Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д. и др. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника); под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576с.

43. Тарельник В.Б., Марцинковский В.С. Модернизация и ремонт роторных машин. *Сумы: Изд-во «Козацький вал»*, 2005. 364с.

44. Марцинковский В.А., Шевченко С.С. Насосы атомных элетростанций: расчет, конструирование, эксплуатация: монография. Под общ. ред. С.С. Шевченко. Сумы: ЧФ «Издательство «Университетская книга», 2018. 472 с.

45. Кондаков Л.А., Голубев А.И., Овандер В.Б. и др. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник. Под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. М.: Машиностроение, 1986. 486 с.

46. Марцинковский В.А. Щелевые уплотнения. Теория и практика. Сумы: Изд-во СумГУ, 2005. 416 с.
47. Скаскевич А.А., Струк В.А. Основы герметологии. Гродно: ГрГУ, 2010. 140 с.
48. Мельник В.А. Торцевые уплотнения валов. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
49. Мельник В.А. О классификации и применимости типов уплотнений валов. *Химическое и нефтегазовое машиностроение. № 3. 2014. С. 27–32.*
50. Марцинковский В.А. Гермомеханика и ее место в ряду технических наук. *Герметичность, виброненадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования: труды 10-й Международной науч.-техн. конференции.* Сумы. 2005. Том 1. С.7–10.
51. Pappel S.S. Low viscosity magnetic fluid of tained by the colloidal suspension of magnetic particles. US Patent 3215572/1965.17p.
52. The ferrofluids story. NASA Technical Reports Server (NTRS). URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020080967>
53. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. М.: Мир, 1989. 357 с.
54. Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Страдомский Ю.И., Перминов С.М. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование. Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2010. 184 с.
55. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 240 с.
56. Такетоми С., Тикадзуми С. Магнитные жидкости. М.: Мир, 1989. 357 с.
57. Berkovsky V., Bashtoboi V. (Eds). Magnetic fluids and applications. New York: Begell House, 1996. 831 p.
58. Баштовой В.Г., Берковский Б.М., Вислович А.Н. Введение в термомеханику магнитных жидкостей. М.: ИВТАН, 1985.188 с.

59. Raj K., Chorney A.F. Ferrofluid technology – An overview. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. 1998. Vol. 5, December. P. 372–389

60. Ravaud R., Lemarquand G. Mechanical properties of a ferrofluid seal: three-dimensional analytical study based on the coulombian model. *Progress in Electromagnetics Research B*. 2009. Vol. 13. P. 385–407.

61. Ravaud R., Lemarquand G., Lemarquand V. Mechanical properties of a ferrofluid applications: centering effect and capacity of a seal. *Tribology International, Elsevier*. 2009. Vol. 43, No.1–2. P. 76–82.

62. Pislary-Danescu L., Morega A.M., Telipan G. and others. Magnetic Nanofluid Applications in Electrical Engineering. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2013. Vol. 49, No.11. P. 5489–5498.

63. Xin Yin, Jien Ma, Youtong Fang, Shuai Jiu. Analysis of Fluid-thermal Coupling in Ferrofluid Bearing Used in High speed Machines. *Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2013. Vol. 2, No. 4. P. 421–428. URL: <http://doi.org/10.11142/jicems.2013.2.4.421>

64. Vekas L. Magnetic nanofluids properties and some applications. *Rom. Journ. Phys.* 2004. Vol. 49. No. 9-10. Bucharest. P. 707–721.

65. Баусов А.М. Комбинированные магнитожидкостные уплотнения подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники: дисс. на соискание ученой степени докт. техн. наук: 05.20.03. Москва, 2004. 265 с.

66. Odenbach S. Editor. Colloidal Magnetic Fluids: Basics, Development and Applications of Ferrofluids. *Series: Lecture Notes in Physics*; Vol. 763. Berlin: Springer, 2009. 442 p.

67. Радионов А.В., Виноградов А.Н, Веревкин В.Н. Магнитожидкостные герметизаторы на химических заводах: опыт внедрения и перспективы. *Химическая техника*. 2003. №1. С. 28–32.

68. Радионов А.В. Опыт эксплуатации магнитожидкостных



герметизаторов в промышленной энергетике. *Науково-технічний збірник "Гірнична електромеханіка та автоматика"*. Дніпропетровськ. 2011. Вип. 87. С.134–139

69. Морозов Н. А., Казаков Ю. Б. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях. Иваново: Ивановский гос. энерг. ун-т им. В. И. Ленина, 2011. 264 с.

70. Орлов Д.В., Михалев Ю.О., Мышкин Н.К. и др.: под общ. ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. Магнитные жидкости в машиностроении. М.: Машиностроение, 1993. 271 с.

71. Сайкин М.С. Магнитожидкостные герметизаторы технологического оборудования. СПб.: Изд-во «Лань», 2017. 136 с.

72. Радионов В.А., Кирей П.С., Радионов А.В., Андрощук Г.А. Конструкции магнитожидкостных устройств и их применение в народном хозяйстве. К.: УкрНИИНТИ Госплана УССР, 1991. 100 с. (Новое в науке, технике и пр-ве: Обзор. Информ. Сер. Пр-во и применение новых материалов и продуктов в пром-сти; Вып. 1).

73. LI De-cai, HONG Jian-ping, YANG Qing-xin, WANG Xiu-ting. Motion State Analysis and Seal Ability Study on the Magnetic Fluid Seal of Reciprocating Shaft. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2002, May. Vol. 15, No. 2. P. 116–121.

74. Сучилин В.А., Тюменев Ю.Я. К вопросу использования магнитной жидкости для смазки и герметизации узлов технических средств сферы быта. *Интернет-журнал «Отходы и ресурсы»*. Том 2, №1(2015). URL: <http://resources.today/PDF/04RR0115.pdf> (доступ свободный).

75. Михалев Ю.О. Магнитожидкостные уплотнения. *Вестник машиностроения*. 2002. № 5. С. 37–44.

76. Nagaya K., Ohnuma H., Sato A. Analysis of a radial magnetic fluid seal and a radial bearing lubricated with a magnetic fluid. *Tribology International*. 1992. Vol. 25, No. 2. P. 107–114.

77. Крикун В.А., Радионов В.А., Борозенец В.Г. и др. Магнитомер: А.с.

СССР No840773. заявл. 27.09.1978; опубл. 23.06.1981, Бюл. No23, 11с.

78. Chari M.V.K., Laskasis E.T., Angelo J.D. Finite element analysis of a magnetic fluid seal for large-diameter high-speed rotating shafts. *Je Transactions On Magnetics*. 1981. Vol. Maf.17, No6, November, P. 3000–3002.

79. Sarma M.S. Magnetic-field analysis of ferrofluidic seals for optimum design. *Journal of Applied Physics*. 1984. № 55(6). March. P. 2595–2598.

80. Odenbach S. Recent progress in magnetic fluid research. *Journal of Physics Condensed Matter*. 2004. № 16. P. 1135–1150.

81. Gwan-Soo Park Lee. Numerical Algorithm for Analyzing the Magnetic Fluid Seals. *IEEE Transaction on magnetics*. 1994. Vol. 30, No. 5, September. P. 3351–3355.

82. Перминов С.М. Исследование торцевого магнитожидкостного герметизатора методом математического моделирования. *Вестник ИГЭУ*. 2012. Вып. 5. С. 1–4.

83. Zoul J., Li X., Lu Y., Hu J. Numerical analysis of centrifuge force in magnetic fluid rotating seals. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002. No252. P. 321–323.

84. Полетаев В.А., Перминов С.М., Пахолкова Т.А., Перминова А.С. Исследование магнитного поля рабочего зазора магнитожидкостного герметизатора классической конструкции. *Вестник ИГЭУ*. 2011. Вып. 6. С. 38–42.

85. Salwinski J., Horak W., Szczech M. Numerical analysis of magnetic circuits in the ferrofluid seals. *Технології та дизайн*. 2012. Вип. 3(4). С. 108–112.

86. Казаков Ю.Б. Определение конфигурации поверхности магнитной жидкости в магнитожидкостном герметизаторе при заданном перепаде давления. *Вестник машиностроения*. 2002. № 2. С. 26–30.

87. Tiwari R.A., ManiKandan S., Dwivedy S.K. Review of the Rotor Dynamic Parameters of Seals. *The Shock and Vibration Digest*. 2005. Vol. 37,

No. 4, July. P. 261–284.

88. Matuszewski L., Szydto Z. The application of magnetic fluids in sealing nodes designed conditions and in machines used in sea environment. *Polish Maritime research*. 2008. Vol. 15, No. 3(7). P. 49–58.

89. Zubarev A., Iskakova L. On the theory of rheological properties of magnetic suspensions. *Physica A*. 2007. Vol. 382. P. 378–388.

90. Куникин С.А., Диканский Ю.И. Магнитные коллоиды. Особенности функциональных зависимостей магнитной восприимчивости. *Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing*, 2011. 151 с.

91. Куникин С.А., Гладких Д.В., Диканский Ю.И. О резонансном эффекте во вращающейся магнитной жидкости. *Журнал технической физики*. 2010. Т. 80, вып. 2. С. 41–45.

92. Диканский Ю.И., Балабанов К.А., Борисенко О.В., Киселев В.В. Магнитное упорядочение в магнитной жидкости с квазитвердыми агрегатами. *Магнитная гидродинамика*. 1997. Т. 33. № 2. С. 243–245.

93. Зубко В.И., Лесникович А.И., Зубко Д.В. и др. Влияние структуры магнитной жидкости на ее электрические свойства. *Сб. науч. тр. 13-ой Международной Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям*. Иваново: ИГЭУ, 2008. С.107–112.

94. Иванов А.О., Менделев В.С. Магнитные свойства феррожидкостей с цепочечными агрегатами: теория и эксперимент. *Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем: сб. науч. тр. I Всероссийской научной конференции*. Ставрополь: ГОУ ВПО «Ставропольский государственный университет», 2009. С. 93–99.

95. Иванов А.С., Пшеничников А.Ф. Расслоение сильно концентрированных магнитных жидкостей под воздействием неоднородного магнитного поля. *Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем: сб. науч. тр. II Всероссийской научной конференции*. Ставрополь: ИИЦ «Фабула», 2011. С. 102–108.

96. Диканский Ю.И., Вегера Ж.Г., Смерек Ю.Л. Особенности электропроводности и теплопроводности магнитной жидкости с мелко дисперсным немагнитным наполнителем. *Известия вузов. Северо-Кавказский. Регион: Естественные науки*, 2005. №9. С. 64–72.

97. Симоновский А.Я., Гришанина О.А. Проблемы тепло- и массопереноса в нанодисперсных магнитных жидкостях. Ставрополь: СевКазГТУ, 2010. 296с.

98. Брук Э.Т., Фертман В.Е. «Еж» в стакане. Минск: Выш. школа, 1983. 253с.

99. Коровин В.М., Кубасов А.А. О неустойчивости плоской поверхности магнитной жидкости в цилиндрической полости при наличии вертикального магнитного поля. *Журнал технической физики*. 1998. Том. 68, №1. С. 23–30.

100. Лебедев А.В. Вязкость концентрированных коллоидных растворов магнетита. *Коллоидный журнал*. 2009. Том 71, №1. С. 78–83.

101. Зубарев А.Ю. Реологические свойства полидисперсных магнитных жидкостей. Влияние цепочечных агрегатов. *ЖЭТФ*. 2001. Том 120, вып.1(7). С.94–103.

102. Библик Е.Е. Реология дисперсных систем. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. 172 с.

103. Волков П.К., Мартынов С.И., Ткач Л.Ю. Взаимодействие частиц как механизм увеличения вязкости суспензии. *Вестник Югорского государственного университета*. 2012. Вып.2(25). С. 21–24.

104. Pshenichnicov A.F., Mekhonoshin V.V., Lebedev A.V. Magnetogranulometric analysis of concentrated ferrocolloids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1996. Volume 161. P. 94–102.

105. Odenbach S. Magnetoviscous Effects in Ferrofluids. *Series: "Lecture Notes in Physics"*, Vol. 71. Berlin: Springer, 2002. 154 p.

106. Канторович С. Структура цепочечных агрегатов в бидисперсных магнитных жидкостях. От теории к приложениям. Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 164 с.

107. Иванов А., Пшеничников А. Магнитофорез и диффузия коллоидных частиц в магнитной жидкости. Экспериментальное и теоретическое исследование. Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 148 с.

108. Михалев Ю.О. , Евсин С.И. Методы диагностики магнитных жидкостей для уплотнительных устройств. *Магнитная гидродинамика*. 1991. № 1. С. 29–35.

109. Massart R., Dubois E., Cabuil V., Hasmonay E. Preparation and properties of monodisperse magnetic fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1995. V. 149, № 1-2, P. 1–5.

110. Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О. Магнитные жидкости. Рига. Зинатне, 1989. 386 с.

111. Елфимова Е.А. Статистическая термодинамика и физические свойства магнитных жидкостей: роль многочастичных корреляций: дисс. на соискание ученой степени докт. физ.-мат. наук: 01.04.02. *Теоретическая физика*. Екатеринбург, 2016. 293 с.

112. Полуниин В.М. Акустические свойства нанодисперсных магнитных жидкостей. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 384 с.

113. Быков А.А. О проблемах техногенного риска и безопасности техносферы. *Проблемы анализа риска*. 2012. Т. 9, № 3. С. 4–8.

114. Макдональд Д. Промышленная безопасность, оценка риска и системы аварийного останова. М.: Группа ИДТ, 2007. 409 с.

115. Макроносков А.Г. Придвижкин В.А., Питецкая К.Ю. Управление ресурсом безопасной эксплуатации техники: монография. Екатеринбург: ГОУВПО «Рос. гос. проф.» - ред. ун-т, 2007. 185 с.

116. Махутов Н.А., Резников Д.О. Сопоставительная оценка

нормативного и основанного на управлении риском подходов к оценке защищенности сложных технических систем. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2011. № 6. С. 92–103.

117. Муравьева Е.В., Романовский В.Л. Прикладная техносферная рискология. Экологические аспекты. Казань, 2007. 355 с.

118. Аканова К.М. Природные и техногенные факторы уязвимости экономики Республики Казахстан. *Известия УрГЭУ*. 2009. №4 (26). С. 138–144.

119. Пляцук Л.Д., Бурла О.А. Вплив техногенних об'єктів на гідросферу як фактор екологічного ризику. *Екологічна безпека*. 2008. №2. С. 40–44.

120. Чугай А.В., Котельникова Ю.О. Оцінка впливу промислових підприємств міста Одеса на стан повітряного басейну. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2013. №1-2. С. 97–104.

121. Ващаєв С.С, Екологізація промисловості України: статистичний аспект. *Моделювання та інформаційні системи в економіці*. 2016. № 92. С. 88–97.

122. Хрутьба В.О., Вайганг Г.О., Стегній О.М. Аналіз екологічних небезпек під час експлуатації та ремонту магістральних трубопроводів. *Екологічна безпека*. 2017. № 2. С. 75–83.

123. Рибалов О.О., Пляцук Л.Д. Локальні моделі прогнозування стану екологічного простору. Суми: Сумський державний університет. 2011. 252 с.

124. Акимов В.А, Лапин В.Л., Попов В.М. и др. Надежность технических систем и техногенный риск. М.: ЗАО ФИД «Деловой Экспресс», 2002. 368с.

125. Белов П.Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование. М.: Издательство Юрайт, 2014. 728с.

126. Калькис В., Кристиньш И., Роя Ж. Основные направления оценки рисков рабочей среды. Рига: SIA «Jelgavas tipografija», 2005. 74 с.

127. Шмаль А.Г. Факторы экологической опасности & экологические риски. Бронницы: МП «ИКЦ БНТВ», 2010. 191с.

128. Жук П.М. Система оценки экологической безопасности по жизненному циклу неорганических волокнистых теплоизоляционных материалов. *Вестник МГСУ*. 2013. № 12. С. 118–123.

129. Шубин Р.А. Надежность технических систем и техногенный риск: учебное пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 80 с.

130. Marhavidas P.K., Koulouriotis D., Gemeni V. Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000 – 2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2011. №24. P. 477–523.

131. Suter U., Glenn W., Wayne R., Sekizawa M. Types of integration in Riks Assessment and Management, And why They Are Needed. *Human and Ecological Risk Assessment*. 2003. № 9. P. 273–279.

132. Аверин Г.В., Москалец В.М. Анализ опасностей аммиачных компрессорных установок. *Вестник Донецкого университета. Серия А. Естественные науки*. 2008. № 3. С. 32–40.

133. Шмандій В.М., КлименкоМ.О., Голік Ю.С. та ін. Екологічна безпека: Підручник. Херсон.: Олді-плюс, 2013. 366 с.

134. Кравцова М.В. Оценка техногенного риска технически сложных производственных объектов машиностроения. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14, № 1(3). С. 877–885.

135. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165с.

136. Сычев Я.В. Опасности техногенных катастроф современности. *Интернет-журнал «Технология техносферной безопасности»*. 2012. Вып. № 1(41). URL: <http://ipb.mos.ru/tb>.

137. Порфирьев Б.Н. Экологическая экспертиза и риск технологий. *Итоги науки и техники*. М.: ВИНТИ, 1990. Т. 27. 204 с.

138. Добротворский А.М., Шевякова Е.П., Масликова Е.И., Михайловский В.Ю. Современные методы выявления причин отказов нефтеперерабатывающего и нефтехимического оборудования. *Химическая техника*. 2013. № 12. С. 10–16.

139. Орел С.М., Мальований М.С., Орел Д.С. Оцінка екологічного ризику. Вплив на здоров'я людини: навчальний посібник. Херсон: Олді-плюс, 2014. 232 с.

140. Иванюта С.П., Качинський А.Б. Екологічна та природно-техногенна безпека України: регіональний вимір загроз і ризиків: монографія. К.: НІСД, 2012. 308 с.

141. Биченок М.М. Основи інформатизації управління регіональною безпекою. К., 2005. 196 с.

142. Толмачев В.В., Федорова И.Н. Модель для определения значимости риска эксплуатации бесшовных баллонов. URL: <http://asms.ru/kompet/2012/novbec/tolmachev42.pdf>.

143. Топоров А.А. Новый подход к анализу техногенно опасных ситуаций на технологических производствах. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія*. Донецьк, ДонНТУ. 2005. Вип.95. С.126–130.

144. Багимов И.А., Тараненко В.А. Применение аппарата нечеткой логики для оценки приоритетного числа риска в методологии FMEA. URL: [donntu.edu.ua/russian/Konf/mashinebuild/arhiv/vipusk32-2006/pdf](http://donntu.edu.ua/russian/Konf/mashinebuild/arhiv/vipusk32-2006/pdf).

145. Азизов Х.Ф., Гребенюк Г.Н., Ходжаева Г.К. Практические рекомендации по оценке геоэкологических рисков возникновения аварийных ситуаций при транспортировке нефтепродуктов: монография. Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гуманит. ун-та, 2012. 80 с.

146. Красных Б.А., Мартынюк В.Ф., Сергиенко Т.С. и др. Анализ аварий и несчастных случаев на объектах газового надзора. М.: Анализ опасностей, 2003. 320 с.



147. Мальований М.С., Боголюбов В.М., Шаніна Т.П. та ін. Техноекологія. За ред. М.С. Мальованного. Херсон: Олді-плюс, 2014. 616 с.

148. Тищенко В.О., Гудович О.Д. Нормативні засади щодо порядку планування реагування на надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру в Україні. *Науковий вісник Академії муніципального управління: Серія «Управління»*. 2016. Вип. 1. С. 33–47.

149. Пригожин И. Философия нестабильности. *Вопросы философии*. 1991. № 6. С. 11–15.

150. Дробязко О.Н., Сошников А.А. Системный анализ техногенной опасности электроустановок зданий. *Ползуновский вестник*. 2014. № 4, Т. 1. С. 79–86.

151. Огар П.М., Тарасов В.А., Корсак И.И. Системный подход к проблеме оптимального проектирования герметизирующих устройств. *Системы. Методы. Технологии*. 2012. № 4(16). С. 86–92.

152. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ: Учебное пособие. К.: МАУП, 2003. 386 с.

153. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Основи системного аналізу. К.: Вид. група ВНУ, 2007. 544 с.

154. Гусев В.В., Муравлев О.П., Шевчук В.П. Системный анализ эффективности функционирования электрических машин в горнодобывающем комплексе. *Известия Томского политехнического университета*. 2009. Т. 34, № 4. С. 74–79.

155. Гаїрова Т.М. Методологічні засади моніторингу виробничого травматизму: монографія. К.: Основа, 2014. 201с.

156. Векслер А.Б., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. СПб: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2002. 591с.

157. Стефанишин Д.В. Прогнозування аварій на греблях в задачах оцінки й забезпечення їх надійності та безпеки. *Гідроенергетика України*. 2011. №3–4. С.52–60.

158. Гражданкин А.И., Лисаков М.В., Печеркин А.С. Мнение специалистов ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность» об опубликованных в журнале «Безопасность жизнедеятельности» № 8 за 2003г. замечаниях по РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. *Безопасность жизнедеятельности*. 2003. № 12. С. 48.

159. Гражданкин А.И., Печеркин А.С., Сидоров В.И. Заменит ли качественная оценка риска выполнение требований промышленной безопасности. *Безопасность труда в промышленности*. № 10. 2012. С. 43–48.

160. Гражданкин А.И. Методическое обеспечение анализа опасностей и оценка риска промышленных аварий. *Безопасность труда в промышленности*. 2013. № 6. С. 90–92.

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

162. Шалыбков Д.А. Гидродинамическая и гидромагнитная устойчивость течения Куэтта. *Успехи физических наук*. 2009. Том 179. №9. С. 971–994.

163. Абдибеков У.С., Маканалина Г.С. Влияние магнитного поля и кривизны канала на турбулентную структуру течения. *Вычислительные технологии*. 2004. Том. 9, №3. С. 13–21.

164. Вислович А.Н., Полевиков В.К. Влияние центробежных и капиллярных сил на форму свободной поверхности магнитоэлектрического уплотнения. *Магнитная гидродинамика*. 1994. №1. С. 77–86.

165. Вислович А.Н., Полевиков В.К. О численном моделировании

разрушения магнитожидкостного уплотнения с вращающимся внешним профилированным цилиндром. *Инженерно-физический журнал*. 1997. Том 70, №1. С. 105–110.

166. Полевиков В.К. О методах численного моделирования равновесных капиллярных поверхностей. *Дифференциальные уравнения*. 1999. Т. 35, №7. С. 975–981.

167. Полевиков В.К., Тобиска Л. Моделирование динамического магнитожидкостного уплотнения при наличии перепада давления. *Механика жидкости и газа*. 2001. №6. С. 42–51.

168. Rosensweig R.E. Heating magnetic fluid with alternating magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002. Vol. 252 P. 570–574.

169. Koskov V.A., Pshenichnikov A.F. Amplitude Dependence of Dynamic Susceptibility of a Magnetic Fluid at Acoustic Frequencies. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 581 (2019) 01 2024 doi: 10.1088/1457-899X/581/1/012024.

170. Баштовой В.Г., Полевиков В.К., Альгадал А.М. Влияние процессов диффузии на статику магнитных жидкостей. *Вести Национальной Академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2006. № 3. С. 42–48.

171. Зибольд А. Ф. Гидродинамические структуры, порождаемые вращающимся магнитным полем в цилиндре конечной длины. *Прикладная гидромеханика*. 2011. Том 13, №2. С. 17–27.

172. Краков М.С., Никифоров И.В. Влияние меридионального течения и термомагнитной конвекции на характеристики магнитожидкостного уплотнения. *Журнал технической физики*. 2011. Том 81, вып. 12. С. 47–55.

173. Краков М.С., Никифоров И.В. Скорость термоконвективного течения в высокоскоростном магнитожидкостном уплотнении после его остановки. *Журнал технической физики*. 2012. Том 82, вып. 9. С. 126–129.

174. Селезов И.Т., Кривонос Ю.Г. Волновые задачи биогидродинамики и биофизики. Киев: Наукова думка, 2013. 308 с.

175. Neuringer J.L. Rosensweig R.E. Ferrohydrodynamics. *The Physics of Fluids*. 1964. Vol. 7, N 12. P. 1927–1937.

176. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.

177. 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.

178. Lopez-Lopez M.T., Bossis G., Duran J.D.G., and others. Inversion of Magnetic forces Between Microparticles and Its Effect on the Magnetorheology of Extremely Bidisperse Magnetic Fluids. *Nanofluids*. 2003. Vol. 2. P. 85–93.

179. Magnet C., Kuzhir P., Bossis G. and others. Haloing in bimodal magnetic colloids: The role of field-induced phase separation. *Physical Review E*. 2012. Vol. 86. P. 173–181.

180. Lopez-Lopez M.T., Zubarev A.Yu., Bossis G. Repulsive force between two attractive dipoles mediated by nanoparticles inside a ferrofluid. *Soft Matter*. 2010. Vol. 6. P. 4346–4349.

181. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2003. 736 с.

182. Покровский В.Н. Статистическая гидромеханика разбавленных суспензий. М.: Наука, 1977. 135 с.

183. 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>

184. Куникин С.А., Радионов А.В. О стабильности физических свойств технических магнитных жидкостей. *Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем: сб. науч. тр. IV Всероссийской научной конференции*. Ставрополь: ИИЦ «Фабула», 2013.

С. 156–160.

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

186. Лахтина Е.В., Пшеничников А.Ф. О влиянии коагулянта и свободного стабилизатора на образование агрегатов в магнитных жидкостях. *Коллоидный журнал*. 2010. Том 72, № 2. С. 231–238.

187. Кузнецов В.И. Химические реактивы и препараты. М.-Л.: ГНТИХЛ, 1953. 670 с.

188. Диканский Ю.И. Эффекты взаимодействия частиц и структурно-кинетические процессы в магнитных коллоидах: дисс. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук: 01.04.02. Ставрополь, 1999. 305 с.

189. 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.

190. Блум Э.Я., Михайлов Ю.А., Озолс Р.Я. Тепло- и массообмен в магнитном поле. Рига: Зинатне, 1980. 354 с.

191. Чечерников В.И. Магнитные измерения. М.: Изд-во МГУ, 1969. 388 с.

192. Куникин С.А., Диканский Ю.И. О температурной зависимости магнитной восприимчивости магнитных дисперсных наносистем. *Журнал технической физики*. 2010. Том 80, вып. 6. С. 112–117.

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

194. Зубарев А.Ю., Чириков Д.Н. К теории магнитовязкого эффекта в

феррожидкостях. ЖЭТФ. 2010. Том 137, вып. 6. С. 1139–1150.

195. Мартынов С.И., Ткач Л.Ю. Влияние взаимодействия частиц на вязкость магнитной жидкости. *Сб. науч. тр. 14-ой Международной Плесской научной конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям*. Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2012. С. 110–113.

196. Матвеев В.Н., Кирсанов Е.А. Вязкость и структура дисперсных систем. *Вестн. Моск. ун-та. Сер.2. Химия*. 2011. Т. 52, №4. С. 243–276.

197. Бибик Е.Е., Бузунов О.В. Достижения в области получения и применения ферромагнитных жидкостей. *Обзоры по электронной технике*. Сер. 6. Вып. 7(660). М.: ЦНИИ «Электроника», 1979. 60 с.

198. Железный В.П., Хлиева О.Я. Перспективы новых рабочих тел на основе нанофлюидов для повышения энергоэффективности холодильного оборудования. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали V Міжнар. наук.-техн. конф.* Миколаїв: НУК, 2014. С.307–310.

199. Козырев А.В., Сытников А.Г. Испарение сферической капли в газе среднего давления. *Успехи физических наук*. 2001, июль. Том 171, №7. С. 765–775.

200. Радионов А.В. Влияние испаряемости магнитной жидкости на работоспособность и техногенную безопасность магнитожидкостных герметизирующих комплексов. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2016. Вып. №1(43). С. 19–22.

201. Павленко А.М., Басюк Б.И. Кинетика испарения воды из эмульсии. *Промышленная теплотехника*. 2003. Т.25, №4. С.3–6.

202. Chen R.-H., Phuoc T.X., Martello D. Effect of nanoparticles on nanofluid droplet exaporation. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2010. V. 53. P. 3677–3682.

203. Gan Y., Qiao L. Exaporation characteristics of fuel droplets with the addition of nanoparticles under natural and forced convection. *Int. J. Heat and*

*Mass Transfer*. 2011. Vol. 54. P. 2459–2466.

204. Терехов В.И., Шишкин Н.Е. Экспериментальные исследования испарения капель наножидкости в потоке сухого воздуха. *Сборник научных статей «Современная наука»*. 2011. №2(7). С. 197–201.

205. Тарасевич Ю.Ю., Православнова Д.М. Качественный анализ закономерностей высыхания капли многокомпонентного раствора на твердой подложке. *Журнал технической физики*. 2007. Т. 77(2). С 17–21.

206. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли-пыли, дымы и туманы. М.: Химия, 1972. 270с.

207. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде (Итоги науки: физико-математические науки). М.: Изд-во АН СССР, 1958. 92с.

208. Лебедев-Степанов П.В. Введения в самосборку ансамблей наночастиц. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 184с.

209. Зимон А.Д. Коллоидная химия наночастиц. Часть 1. Особенности и свойства наночастиц. М.: МГУТУ, 2010. 152с.

210. Dikansky Yu., Ispiryanyan 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.

211. Пшеничников А.Ф., Буркова Е.Н. О силах, действующих на постоянный магнит, помещенный в прямоугольную полость с магнитной жидкостью. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2014. Т.7, №1. С.5–14.

212. Кириленко О.В., Подольцев О.Д., Кондратенко І.П. та інші. Спосіб вимірювання магнітної сприйнятливості магнітних рідин та пристрій для його реалізації: патент на винахід № 102749 Україна: (51) МПК G01N27/76(2006/01), A61N21/06(2006/01), H01F7/02(2006/01), G01R33/16(2006/01), а 2011 13739, заявл. 22.11.2011; опубл. 12.08.2013, Бюл. №15. 8с.

213. Баштовой В.Г., Рекс А.Г., Климович С.В. Экспериментальное исследование влияния магнитофореза и броуновской диффузии на

«магнитный вес» магнитной жидкости. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2014. № 1. С. 65–69.

214. Баштовой В.Г., Рекс А.Г., Климович С.В., Волкова Ю.В. К оценке качества магнитных жидкостей для магнитожидкостных устройств. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2016. №6. С. 582–590.

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

216. Радионов В.А. Исследование герметичности вращающихся валов холодильных установок с магнитожидкостными уплотняющими устройствами: дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.04.03. Одесса, 1980. 152 с.

217. Радіонов О.В., Косарев І.В., Хабазня О.С. та ін. Магніторідинний герметизатор для вихідних валів поворотних редукторів очисного комбайна УКД 200-250. *Вісник АІНУ*. 2008. №1(35). С. 26–32

218. Радионов А.В. Использование магнитожидкостных герметизаторов на углеобогадательных предприятиях. *Збагачення корисних копалин*. 2010. Вип. 41(82) – 42(83). С. 295–308.

219. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомаштабное моделирование в электронике. Киев: Институт электродинамики НАНУ, 2011. 256 с.

220. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. Киев: Институт электродинамики НАНУ, 2015. 305 с.

221. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств. *Технічна електродинаміка*. 2015. №2. С. 3–15.

222. Любимов А.К. (отв. редактор), Берендеев Н.Н., Викулов М.Ю. и др. Применение системы ANSYS к решению задач механики сплошной среды. Практическое руководство. Нижний Новгород: Изд-во



Нижегородского госуниверситета. 2006. 227 с.

223. Загорулько А.В. Программный комплекс ANSYS в инженерных задачах: навчальный посібник. Суми: Вид-во СумДУ, 2008. 201 с.

224. Yibiao Chen, Desai Li, Zhen Kun Li, Yanjuan Zhang. Numerical Analysis on Bondary and Flow Regime of Magnetic Fluid in the Sealing Clearance With a Rotation Shaft. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2019. Vol.55, №2. P. 201–207.

225. Kumbhar G.B., Kulkarni S.V. et al. Application of coupled field formulations to electrical machinery. *COMPEL*. 2007. Vol. 26. №. 2. P. 489–523.

226. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>

227. Radionov A., Podoltsev A, Vinogradov A. Study of numerical modeling of the magnetic fluid seals protecting sliding bearings of the mine main fans. “*Seals and Sealing Technology of Machine and Devices*”: collection of scientific papers of XIII<sup>th</sup> International Scientific – Technical Conference. Wroclaw-Kudowa Zdroj. Wroclaw: Osrodek Doskonalenia Kadr SIMP, 2013. P. 188–197.

228. 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.

229. 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*. 2012. №1. С. 15–23.

230. Пановский В., Филипс М. Классическая электродинамика. М.: Физматгиз, 1963. 432 с.

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

232. Радионов А.В., Белый В.Ф., Виноградов А.Н. НІВП

«Феррогидродинамика» – десять лет работы с предприятиями металлургической промышленности. *Теория и практика металлургии*. 2001. №1(21). С. 60–63.

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

234. Радионов А.В., Виноградов А.Н., Киричков А.В., Билоцеркивец Г.И. Опыт применения магнитожидкостных герметизаторов на ЗАО «Укртатнафта». *Энергосбережение*. 2004. №2(53). С. 9–12.

235. Radionov A.V., Vinogradov A.N. Economical Aspects of Magnetic Fluid Seal Application. *Seals and sealing Technology in Machines and Devices: collection of scientific paper of X<sup>th</sup> International Conference*. Wroclaw-Polanica Zdroj. Wroclaw: SIMP Osrodek Doskonalenia Kadr, 2004. P. 311–318.

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

237. Радіонов О.В., Виноградов О.М. Систематизація найбільш доцільних галузей використання магніторідинних ущільнень. *Вісті Академії інженерних наук України*. 2003. №1 (18). С. 3–9.

238. Радионов А.В. Применение магнитожидкостных герметизаторов для повышения техногенной безопасности опасных производств. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2015. №4. С. 27–31.

239. Галюченко А.М., Львов О.С. Обзор приводов вентиляторов градирен *Химическая техника*. 2003. №10. С. 32–34.

240. Курбатов О.В., Павлюченко В.М. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования: учеб. пособие. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. 286 с.

241. Конюхов Н.Н. Проблематика повышения надежности и энергоэффективности электродвигателей на промышленных предприятиях

Донбасса. *Вісник СевНТУ. Вип. 106: Механіка, енергетика, екологія: збірник наукових праць*. Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. С. 89–93.

242. Ходаков В.Е., Соколова Н.А., Черный С.Г. Влияние природно-климатических факторов на социально-экономические и производственные системы: монография. Херсон: Гринь Д.С., 2013. 354 с.

243. Кацман М.М. Электрические машины. М.: Высш. шк., 2001. 426 с.

244. Кода Н.А., Радионов А.В. Повышение надежности работы электродвигателей градиентной оборотной технической воды. *Сталь*. 1998. №4. С. 76–77.

245. Radionov A.V., Vinogradov A.N. The application of magnetic fluid sealings for electrical engines protection. *Магнитная гидродинамика*. 1998. Т. 34, № 4. Р. 393–396.

246. Чернышев И.А., Чернышева Т.А. Исследование асинхронного частотно-регулируемого электропривода аппарата воздушного охлаждения газа. *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2014. № III-1 (19). С. 115–121.

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

248. Радионов А.В., Селезов И.Т. Анализ возможности применения магнитожидкостных устройств в космической технике. *Космічна наука і технологія*. 2002. Том 8, додаток № 2. С. 375–379.

249. Селезов И.Т., Радионов А.В. Моделирование температурного поля феррожидкости в зазоре. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2011. Вип. 14. С. 143–151.

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

251. Селезов И., Радионов А. О моделировании поведения магнитной жидкости в кольцевом зазоре герметизатора. *Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery: collection of scientific papers of 12<sup>th</sup> International Scientific and Engineering Conference*. Kielce-Przemysl. Vol. II. Kielce: Wydawnictwo Politechniki Swietokrzyskiej, 2008. P. 27–33.

252. Radionov A.V., Vinogradov A.N., Tikhonov A.S. The study of Temperature Dependence of Breakdown Voltage of Magnetic Fluids: *Abstracts of 10<sup>th</sup> International Conference on Magnetic Fluids. ICMF10*. Guarujá-Sao Paulo, Brazil. 2004. P. 271–272.

253. Дейч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. М.: Наука, 1965. 288 с.

254. Селезов И.Т., Кривонос Ю.Г. Волновые гиперболические модели распространения возмущений. Киев: Наукова думка, 2015. 172 с.

255. Селезов И.Т., Радионов А.В., Савченко С.А. Нестационарное температурное поле при разогреве феррожидкостного уплотнения. *Прикладна гідромеханіка*. 2015. Том 17, №4. С. 43–51.

256. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т.7. Физика сплошных сред. М.: Мир, 1966. 292 с.

257. 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>.

258. 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.

259. 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.

260. Зубарев А.Ю., Чириков Д.Н. Вязкоупругие свойства магнитных жидкостей со стрежнеобразными частицами. *Сб. науч. тр. 16-ой Международной Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям*. Иваново: ИГЭУ, 2014. С. 88–94.

261. Lopez-Lopez M.T., Vertelov G., Bossis G. and other New magnetorheological fluids based on magnetic fibers. *Journal of Material Chemistry* 2007. V. 17(36). P. 3839–3844.

262. Kuzhir P., Lopez-Lopez M.T., Bossis G. Magnetorheology of fiber suspensions. II. Theory. *Journal of rheology* . 2009. V. 53(1). P. 127–151.

263. Елфимова Е.А., Зубарев А.Ю., Иванов А.О. Эволюция ансамбля фрактальных агрегатов в коллоидных системах. *ЖЭТФ*. 2006. Том 130, вып. 6(12). С. 1061–1071.

264. Зубарев А.Ю. Эффект отрицательной дифференциальной вязкости в магнитных суспензиях. *ЖЭТФ*. 2014. Т. 145, вып. 5. С. 923–932.

265. Lopez-Lopez M.T., Gomez-Ramirez A., Rodriguez-Arco L. and other Colloids on the Frontier of Ferrofluids. Rheological Properties. *Langmuir*. 2012. V. 28. P. 6232–6245.

266. Rodriguez-Arco L., Lopez-Lopez M.T., Zubarev A.Y. and other Inverse magnetorheological fluids. *Soft Matter*. V. 10(33). P. 6256–6265.

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

268. 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.

269. Radionov O., Gurskyi A., Vinogradov O., Kazakutsa O. The increase of the working gap in magnetic fluid seals of bearing units for large-size electrical

engines: *Book of Abstracts 12<sup>th</sup> International Conference on Magnetic Fluids. ICMF12*. Sendai, Japan. 2010. P. PS1–1039.

270. 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)

271. 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.

272. Куникин С.А., Гладких Д.В., Диканский Ю.И., Радионов А.В. Особенности намагничивания магнитных жидкостей на основах повышенной вязкости. *Сб. науч. тр. 13-ой Международной Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям, сентябрь 2008*. Иваново: ИГЭУ, 2008. С. 75–81.

273. Барьяхтар Ф.Г., Горобец Ю.И., Косачевский Л.Я. и др. Гексагональная решетка цилиндрических магнитных доменов в тонких пленках феррожидкости. *Магнитная гидродинамика*. 1981. №2. С. 120–123.

274. Аверьянов П.В., Кожевников В.М., Морозова Т.Ф. Структурообразование в слое магнитной жидкости под действием постоянного электрического поля. *Сборник научных трудов СевКавГТУ. Серия: Естественнонаучная*. Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 2002. С. 130–137.

275. Диканский Ю.И., Нечаева О.А. Структурные превращения в магнитной жидкости в электрическом и магнитном полях. *Коллоидный журнал*. 2003. Т. 65, №3. С. 1–5.

276. 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 ЖТФ*. 2015. Том 41, вып. 4. С. 96–102

277. 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.

278. Радионов А.В., Полежаева С.А. Влияние физических свойств феррожидкости на ресурс магнитожидкостного герметизатора. *Технологии XXI века: сборник тезисов по материалам 20<sup>й</sup> Международной научной конференции (15-19 сентября 2014 г.)*. Сумы: СНАУ, 2014. С. 26–27.

279. Радионов А.В., Куникин С.А., Полежаева С.А. Влияние структуры магнитной жидкости на долговечность герметизатора. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції*. Миколаїв: НУК, 2014. С. 222–223.

280. Гладких Д.В., Новосельцев В.А., Радионов А.В. Особенности релаксации магнитного момента дисперсных частиц в магнитных жидкостях повышенной вязкости. *Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем: сб. науч. тр. I Всероссийской научной конференции* Ставрополь: ГОУ ВПО «Ставропольский государственный университет», 2007. С. 91–95.

281. 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.

282. Марцинковський В.А., Тарельник В.Б., Антошевський Б. та ін.; за ред. О.В. Радіонова. Екологічна безпека експлуатації компресорного і насосного обладнання: монографія. Суми: Сумський державний університет, 2014. 282 с.

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

284. Радионов А.В. Магнитожидкостные устройства, разрабатываемые НПВП «Феррогидродинамика». *Материалы совещания главных механиков ОАО «АК «СИБУР»* г. Тольятти. М.: Изд-во «Компрессорная и химическая техника», 2004. С. 163–173.

285. 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, 2016. С. 144–158.

286. Пшеничников А.Ф. О влиянии межчастичных взаимодействий на диффузионные процессы в магнитных жидкостях. *Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем: сб. науч. тр. II Всероссийской научной конференции*. Ставрополь, 2009. .145–153.

287. Ivanov A.S., Pshenichnikov A.F. Magnetophoresis and diffusion of colloidal particles in a thin layer of magnetic fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010. Volume 322, issue 17. P. 2575–2580.

288. Иванов А.С., Пшеничников А.Ф. Измерение поперечной восприимчивости и намагниченности магнитных жидкостей. *Приборы и техника эксперимента*. 2008. №3. С. 147–152.

289. Pshenichnikov A.F., Kuznetsov A.A. Sedimentation of particles in concentrated magnetic fluids: numerical simulation. *Magneto hydrodynamics*. 2015. Vol. 51, № 3. P. 551–560.

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

291. Пшеничников А.Ф., Лебедев А.В., Радионов А.В., Ефремов Д.В. Магнитная жидкость для работы в сильных градиентных полях. *Коллоидный журнал*. 2015. Том 77, №2. С. 207–213.



292. Арефьев И.М., Арефьева Т.А., Радионов А.В., Лебедев А.В. Физические свойства технических магнитных жидкостей из Иваново и Николаева. *Сб. науч. тр. 16-ой Международной Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям*. Иваново: ИГЭУ, 2014. С. 39–45.

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

294. Шлиомис М.И. Магнитные жидкости. *Успехи физических наук*. 1974. Т. 112, № 3. С. 427–458.

295. Фертман В.Е. Магнитные жидкости – естественная конвекция и теплообмен. Минск: Наука и техника, 1978. 208 с.

296. Коровин В.М. О влиянии горизонтального магнитного поля на неустойчивость Розенцвейга нелинейно намагничивающейся феррожидкости. *Журнал технической физики*. 2014. Том 84, № 11. С. 1–8.

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

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

299. 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.

300. Аббуд А.Ю. Испаряемость нефтяных масел и ее влияние на экологические аспекты их рационального использования: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.17.07 «Химическая технология топлива». Москва, 1998. 21с.

301. 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.

302. Elmore W.C. The magnetization of ferromagnetic colloid. *Physics Revue* 1938. Vol.54. №12. P. 1092–1095.

303. Радионов А.В., Радионова А.А., Подольцев А.Д. Экспериментальное исследование влияния размеров наночастиц магнетита на седиментационную устойчивость магнитной жидкости. *Герметичність, вибронадійність і екологічна безпека насосного і компресорного обладнання – Гервікон + Насоси – 2017: збірник доповідей учасників XV Міжнародної науково-технічної конференції*. Суми: Триторія, 2017. С. 240–251.

304. Dikansky Yu.I., Ispiryanyan A.G., Kunikin S.A., Radionov A.V. Temperature dependence of ferrofluid susceptibility. Influence of particle size distribution. *Magnetohydrodynamics*. 2018. Vol. 54, No. 1-2. P. 65–71.

305. 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.

306. Радионов А.В., Виноградов А.Н. Модернизация электродвигателей СДМ на ТЭС. *Сборник научных статей «Современная наука»*. 2010. №1(3). С. 22–26.

307. Борисенко А.И., Тарапов И.Е. Векторный анализ и начало тензорного исчисления. М.: Высшая школа, 1966. 252 с.

308. Радионов А.В., Подольцев А.Д., Зубко В.И. Электрические процессы в объеме вала, вращающегося в постоянном магнитном поле магнитожидкостного герметизатора. *Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем: сб. науч. тр. IV Всероссийской научной конференции*. Ставрополь: ИИЦ «Фабула», 2013. С. 192–204.

309. 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.

310. Радионов А.В., Борцов А.С. Компьютерное моделирование магнитных и гидродинамических процессов в зависимости от величины зазора магнитожидкостного герметизатора. *Збагачення корисних копалин: наук. техн. зб.* 2013. Вип. 52 (93). С. 24–33.

311. 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.

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

313. Белый В.Ф., Гавриш В.И., Казакуца А.В. Испытательный стенд конструкций МЖГ для уплотнения мелкодисперсных сыпучих сред. *Сборник научных трудов 9-ой Международной Плесской конференции по магнитным жидкостям, т. II*. Иваново, 2000. С. 401–404.

314. 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.

315. Radionov A., Podoltsev A., Peczkis G. The specific features of high-velocity magnetic fluid sealing complexes. *Open Engineering*. 2018. Vol. 8, Iss.1. P. 539–544.

316. Radionov A., Podoltsev A. The specific features of high-velocity magnetic fluid sealing complexes. *Abstracts of Russian Conference on Magnetohydrodynamics*. 2018. P. 422.

317. Кононюк А.Е. Обобщенная теория моделирования. Книга 1. Часть 1. К.: Освіта України, 2012. 602 с.

318. Вельдер С.Э., Лукин М.А., Шалыго А.А., Яминов Б.Р. Верификация автоматных программ. СПб: Наука, 2011. 244 с.

319. Радионов А.В. Оценка техногенного риска оборудования опасных производств системным многоуровневым анализом. *Збірник наукових праць НУК*. №4. 2015. С. 82–91.

320. Радионов А.В. Оценка техногенного риска при эксплуатации синхронных электродвигателей типа СДН. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції*. Миколаїв: НУК. 2015. С. 113–117.

321. Радионов А.В. Оценка техногенного риска при замене традиционных уплотнений магнитожидкостными герметизирующими комплексами с учетом климатических факторов. *Збірник наукових праць НУК*. №3. 2016. С. 120–128.

322. Ивановский Р.И. Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad. СПб.: БХВ. Петербург, 2008. 528 с.

323. Радионов А.В. Влияние климатических факторов на техногенную безопасность асинхронных электродвигателей серии ВАСО. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції*. Миколаїв, НУК. 2016. С. 79–82.

324. Сафин Н.Р., Прахт В.А., Дмитриевский В.А. и др. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора. *Енергобезпе́ність и енергосбере́жение*. 2-14. №3 (57). С. 34–40.

325. Filippetti F., Belini A., Capolino G.A. Condition Monitoring and Diagnosis of Rotor Faults in Induction Machines State of Art and Future

Perspectives. *Published in conference WEMDCD'2013*. March, 11-12, IEEE. P. 196–209.

326. Радионов А.В. Влияние сезонных изменений природно-климатических условий на работоспособность асинхронных электродвигателей. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції*. Миколаїв, НУК. 2016. С. 218–222.

327. Мнухина Н.А. Шахтные воды и модельный раствор шахтных вод. *Екологічні науки*. 2015. Вип. 8. С. 201–207.

328. Савон Д.Ю. Современные подходы к системе промышленной безопасности на угольных предприятиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. №11. С. 227–235.

329. 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.

330. Чижиков Ю.В. Экологическое сопровождение проектов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 308с.

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

332. 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.

333. Радионов А.В., Харламова Е.В. Повышение уровня экологической безопасности при использовании магнитожидкостных герметизаторов и

частотных преобразователей в процессах эксплуатации электродвигателей серии ВАСО. *Екологічна безпека*. №2 (22). 2016. С. 9–15.

334. Радионов А.В., Виноградов А.Н., Титков Н.А., Волков В.В. Внедрение магнитожидкостных герметизаторов в ООО «Киришинефтеоргсинтез». *Химическая техника*. 2003. №4. С. 32–35.

335. Радионов А.В., Вошкин Г.А., Киричков А.В. Магнитожидкостные герметизаторы для привода вентиляторных градирен. *Химическая техника*. 2007. №4. С. 18–22.

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

337. Радионов А.В., Виноградов А.Н. Магнитожидкостные герметизаторы для подшипниковых узлов электрических машин. *Новое энергосберегающее оборудование производства ХК ОАО «Привод» – техника нового тысячелетия: материалы III Всероссийской научно-практической конференции*. Лысьва, 2002. С. 115–117.

338. Радионов А.В., Виноградов А.Н. Повышение ресурса привода аппаратов воздушного охлаждения. «*Энергоэффективность – 2007*»: тезисы докладов Международной научно-практической конференции. К.: Институт газа НАНУ, 2007. С. 20–23.

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

340. 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.

341. 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.

342. Радионов А.В., Чащин В.В., Красников Г.В., и др. Асинхронные двигатели серии ВАСО4 с магнитожидкостными герметизаторами. *Взрывозащищенное электрооборудование. сб. науч. тр. УкрНИИВЭ*. Донецк: Юго-Восток. 2004. С. 73–81.

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

344. 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.

345. Radionov A.V., Leitar S.V., Kirichkov A.V. and others 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. 134–137.

346. 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.

347. 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.

348. 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.

349. Радионов А.В., Виноградов А.Н. Опыт внедрения и эксплуатации магнитожидкостных герметизаторов, работающих в условиях запыленности и сыпучих сред. *Сб. науч. тр.: 8-ой Международной Плесской конференции по магнитным жидкостям. Сентябрь 1998*. Иваново: ИГЭУ, 1998. С. 204–205.

350. Радионов А.В., Виноградов А.Н. Применение магнитожидкостных герметизаторов для повышения надежности насосного и компрессорного оборудования. *Безопасность эксплуатации компрессорного, насосного оборудования и трубопроводной арматуры, Одесса: труды пятого научно-технического семинара*. Сумы: Изд-во «Джерело», 2004. С. 92–94.

351. Radionov A. Magnetic fluid sealing complexes for bearing assemblies of mine main ventilation fans. *Magnetohydrodynamics*. 2018. Vol. 54, No. 1-2. P. 109–114.

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

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

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

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



356. Радионов А.В., Виноградов А.Н. О применении магнитожидкостных герметизаторов в угольной энергетике. *Угольная теплоэнергетика: проблемы реабилитации и развития, г. Алушта: сборник тезисов докладов 4-ой Международной научно-практической конференции.* Киев: Институт угольных электротехнологий НАНУ, 2008. С. 50–54.

357. Радионов А.В., Казакуца А.В. Магнитожидкостные герметизаторы для угольной промышленности. *Физико-химические и прикладные проблемы дисперсных наносистем: сб. науч. тр. II Всероссийской научной конференции* Ставрополь: Издательско-информационный центр «Фабула», 2009. С. 238–246.

358. Радионов А.В., Хабазня А.С., Виноградов А.Н., Казакуца А.В. Особенности проектирования магнитожидкостных герметизаторов шахтного оборудования. *Сб. науч. тр.: 14-ой Международной Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям.* Иваново: ИГЭУ, 2010. С. 360–367.

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

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

361. Радионов А.В., Павловский В.Н., Нор В.Н., Виноградов А.Н. Магнитожидкостные герметизаторы электродвигателей АТД. *Муниципальная энергетика: проблемы, решения: материалы IV Международной научно-технічної конференції.* Миколаїв: НУК, 2011. С. 43–47.

362. Радионов А.В., Рыжков С.С. Анализ экологической безопасности предприятий ТЭК. *Проблеми екології та енергозбереження: матеріали VIII*

*Міжнародної науково-технічної конференції*. Миколаїв: НУК, 2013. С. 59–63.

363. Радионов А.В., Виноградов А.Н. Роль магнитожидкостных устройств в решении экологических проблем. *Окружающая среда – человек, ресурсосбережение*. Вып. 2, Том 1. Алчевск: ДГМИ, 1999. С. 215–223.

364. Радионов А.В., Радионова А.А., Подольцев А.Д. Экспериментальное исследование влияния размеров наночастиц магнетита на седиментационную устойчивость магнитной жидкости. *Герметичність, вибронадійність і екологічна безпека насосного і компресорного обладнання – Гервікон + Насоси – 2017: збірник доповідей учасників XV Міжнародної науково-технічної конференції*. Суми: Триторія, 2017. С. 240–251.

365. Радионов А.В., Виноградов А.Н., Горнов В.А. и др. Асинхронные двигатели серии ВАСО4 с магнитожидкостными герметизаторами. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2004. №3. С 29–32.

366. Виноградов А.Н., Радионов А.В., Чашин 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.

367. Радіонов О.В., Виноградов О.М., Білий В.Ф., Казакуца О.В., Махов Г.Г., Луговської 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.

368. 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.

369. 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.

370. Радіонов О.В., Виноградов О.М., Казакуца О.В., Тихонов А.С. Магніторідинний 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.

371. Радіонов О.В., Виноградов О.М., Казакуца О.В., Тихонов А.С., Гурський А.М. Спосіб виготовлення магніторідинного ущільнення: патент на корисну модель № 19289 Україна: (51) МПК (2006) F15J16/40, а 200605991; заявл. 30.05.2006; опубл. 15.12.2006, Бюл. №12. 6с.

372. Большина Е.П. Экология металлургического производства. Новотроицк: НФ НИТУ "МИСиС", 2012. 155с.

373. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий: справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1998. 376 с.

374. Радионов А.В., Виноградов А.Н., Казакуца А.В. Магнитожидкостные герметизаторы: работа без утечек. *Насосы & оборудование*. 2009. №3(56). С. 22–24.

375. 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.