

МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

УДК 622

DOI: 10.31471/1993-9965-2023-2(55)-7-15

ВПЛИВ ЯКОСТІ МАГНІТНОЇ РІДИНИ НА РОБОТУ МАГНІТОРІДИННИХ ГЕРМЕТИЗАТОРІВ

О. В. Радіонов, Н. В. Тарельник, О. О. Василенко, О. Є. Білий

Сумський національний аграрний університет; 40000, м. Суми, вул. Герасима Кондратьєва, 160;
e-mail: admin@sna.u.edu.ua

У нафтопереробній, хімічній галузях, теплових та атомних електростанціях широко застосовуються магніторідинні герметизатори (МРГ). Це пов'язано з поєднанням в одному матеріалі всього різноманіття властивостей рідини і магнітних речовин. Проаналізовано основні переваги МРГ та магнітних рідин. Зважаючи на важкі умови експлуатації МРГ, у деяких випадках величина робочого зазору герметизатора може значно збільшуватися через зношення технологічного обладнання. У зв'язку з цим важливим фактором забезпечення високої надійності та працездатності МРГ є колоїдальна стабільність та седиментаційна стійкість магнітної рідини. Існуючі методи визначення цих параметрів вимагають дорогого вузькопрофільного обладнання для приладів. Такі прилади, як правило, відсутні на підприємствах. Метою даної роботи є розроблення відносно простого і легко реалізованого безпосередньо на підприємстві методу дослідження динамічних процесів і, зокрема, седиментаційної стійкості магнітної рідини у неоднорідному магнітному полі в умовах, близьких до тих, які реалізуються в активній зоні МРГ. В основу цього методу покладено запатентований спосіб вимірювання магнітної сили, що діє на зразок, заповнений магнітною рідиною і поміщений у неоднорідне магнітне поле, а також вимірювання динаміки зміни цієї сили у часі з використанням високоточних електронних ваг. У роботі запропоновано та реалізовано на експериментальній установці відносно простий метод експрес-аналізу динамічних характеристик магнітної рідини, що знаходиться в неоднорідному магнітному полі та в умовах, близьких до тих, що реалізуються в активній зоні герметизатора валу, що обертається. В основі цього методу лежить силова дія неоднорідного магнітного поля на магнітні наночастинки в рідині. Виходячи з отриманих експериментальних даних та досвіду експлуатації МРГ, можна стверджувати, що седиментаційну стійкість матиме та магнітна рідина, зміна магнітної сили для якої протягом 10-15 хв не перевищить 3%. Достовірність результатів була експериментально перевірена для магнітних рідин на різних дисперсійних основах, при різному розмірі наночастинок та застосованих поверхнево-активних речовин. Запропонований метод є відносно простим і може бути реалізований на підприємстві, що експлуатує магніторідинні герметизатори, для аналізу характеристик магнітної рідини перед заправкою в герметизатор.

Ключові слова: насосний агрегат, підшипник, вал, магніторідинний герметизатор, магнітна рідина, надійність, працездатність, колоїдальна стабільність, седиментаційна зносостійкість, постійний магніт, поверхнево-активна речовина.

Magneto-fluid seals (MFS) are widely used in thermal and nuclear power plants. This is due to the combination of a fluid properties variety and magnetic substances in one material. The main advantages of MFS and magnetic fluids were analyzed. Due to severe conditions of operation of MFS in equipment, the value of the working gap of the sealer can significantly increase due to wear and tear of technological equipment. In this regard, an important factor in ensuring high reliability and operability of MFS is the colloidal stability and sedimentation stability of the magnetic fluid. The existing methods of determining these parameters require expensive highly specialized instrumentation. Typically, such instruments are not available at enterprises. The goal of this work is to create a reasonably simple and simply implementable approach for researching dynamic processes, namely the sedimentation stability of a magnetic fluid in a nonuniform magnetic field under conditions similar to those seen in

the core of an MRG. This method is based on a patented method of detecting the magnetic force acting on a sample filled with magnetic fluid and placed in a nonuniform magnetic field, as well as evaluating the dynamics of this force changing over time using high-precision electronic scales. In this work, a relatively simple method of express analysis of the dynamic characteristics of magnetic fluid located in an inhomogeneous magnetic field and conditions close to those realized in the active zone of a rotating shaft seal is proposed and implemented in an experimental setup. This method is based on the force effect of an inhomogeneous magnetic field on magnetic nanoparticles in the liquid. Based on the obtained experimental data and experience of operation of the MFS, it can be stated that magnetic fluid will possess sedimentation stability, the change in magnetic force for which within 10-15 min will not exceed 3%. The validity of the results was experimentally verified for magnetic fluids on different dispersion bases, at different nanoparticle sizes and applied surfactants. The proposed method is relatively simple and can be implemented at a company operating magnetofluid seals to analyze the characteristics of magnetic fluid before filling into the seal.

Keywords: pump unit, bearing, shaft, magnetofluid seal, magnetic fluid, reliability, operability, wear resistance, sedimentation stability, permanent magnet, surfactant.

Постановка проблеми

У зв'язку з невідкладними завданнями захисту навколишнього середовища особливої актуальності набувають проблеми герметизації. Згідно з [1] близько 60 % викидів в атмосферу становлять неконтрольовані протікання через ущільнення. Важко уявити, що навіть для агресивних рідин нормальними вважаються протікання через сальникові ущільнення на рівні до 2,0 літрів на годину. На рік це становитиме 16 тонн середовища, що перекачується тільки через одне ущільнення. Ця кількість небезпечної речовини вимагає знешкодження та утилізації, що пов'язано з більшими додатковими витратами. За даними американських дослідників лише у США вартість рідин, що втрачаються через ущільнення, становить близько 300 млн. доларів на рік.

Професор В. А. Марцинковський в [2] підкреслив, що однією з найбільш важливих і складних проблем сучасного машинобудування є проблема герметизації роторів відцентрових насосів і компресорів, в яких рідке або газоподібне середовище, що перекачується, знаходиться під великим (до 50-100 МПа) тиском, при цьому необхідно запобігти її витіканню через неминучі зазори між валом, що обертається, і нерухомим корпусом. Також він акцентував увагу на тому, що безпосередньо така задача, в принципі, не має рішення, тому ущільнення роторів розростаються в складні, багатоланкові гідромеханічні системи, що складаються з декількох ступенів ущільнень, системи підготовки (охолодження, очищення) та подачі замикаючого середовища, приладів контролю основних параметрів та системи автоматичного аварійного відключення машини. Проте протікання залишаються, підпорядковуючись одному з універсальних законів Мерфі: «Усі герметичні сполуки хоч щось, але пропускають».

В Україні діють чотири атомні електростанції: Запорізька АЕС (6 енергоблоків), Рівнен-

ська АЕС (4 енергоблоки), Південноукраїнська АЕС (3 енергоблоки) та Хмельницька АЕС (2 енергоблоки) [3].

Кожен енергоблок з реактором РБМК-1000 (реактор великої каналної потужності у 1000 МВт) комплектується 480 одиницями насосних агрегатів, що споживають 12 % потужності блоку. Витрата води, що циркулює у першому контурі ВВЕР-1000 (водо-водяний енергетичний реактор), становить 80 000 м³/год, а витрата в системі технічного водопостачання блоку – 200 000 м³/год.

На видобуток однієї тони нафти витрачається до десяти тон води. Такі масштаби витрат води характерні для нафтогазодобувної, нафтохімічної, переробної та інших галузей промисловості. Кількість насосів, що експлуатуються, тільки в Україні вимірюється багатьма сотнями тисяч агрегатів. Їхня робота супроводжується протіканнями, що забруднюють навколишнє середовище. Вони несуть не тільки мільйони тонн рідин, що перекачуються, а й величезну кількість електроенергії.

Таким чином, якість ущільнень істотно впливає на чистоту навколишнього середовища, а в атомній енергетиці, в нафтогазовидобувній, нафтохімічній в авіації, космонавтиці – на безпеку життєдіяльності людей. Великих засобів вимагають знешкодження та утилізація протікань середовищ, що перекачуються. Вимушені прості технологічних ліній та систем через відмови ущільнень завдають величезних економічних збитків, а ремонт ущільнень потребує великих витрат ручної праці та дорогих матеріалів.

У зв'язку з тенденцією до безперервного збільшення параметрів машин (швидкості, навантаження, температури), їхньої енергоємності при одночасному посиленні вимог до надійності та герметичності, актуальність та складність проблем герметизації ще більше зростає.

У [4], завдяки проведеним дослідженням обґрунтовано, що надійність насосних агрегатів (НА) трубопровідних систем залежить від виходу з ладу їх електродвигунів, що обумовлено ушкодженнями підшипникових вузлів (ПВ), що, в свою чергу, пов'язано з незадовільною роботою штатних ущільнень, неспроможних забезпечити повної, майже 100 % герметичності.

Вирішення проблеми герметичності ПВ приводів НА запропоновано виконати за рахунок впровадження магніторідинних герметизаторів (МРГ). Основною перевагою МРГ є можливість забезпечення практично повної герметизації. При цьому, запропонована їх конструкція не потребує значних капіталовкладень у модернізацію насосного обладнання та забезпечує суттєве підвищення його надійності та довговічності. Необхідно зазначити, що хороші результати використання МРГ були отримані у нафтопереробній та хімічній галузях [5].

Аналіз останніх результатів досліджень свідчить, що магніторідинні герметизатори (МРГ) знайшли досить широке застосування в промисловості. Цьому сприяє поєднання в одному матеріалі всього різноманіття властивостей рідини та магнітних речовин [6–8].

У МРГ використовуються, насамперед, дві властивості магнітної рідини (МР): вона втягується в область неоднорідного магнітного поля – на немагнітне тіло, яке занурене в магнітну рідину, діє виштовхувальна сила магнітного походження (магнітолевітаційний ефект) [8]. Тому в МРГ немагнітні частинки, що потрапляють в робочий зазор заповненого магнітною рідиною герметизатора, виштовхуються з нього. При цьому виштовхувальна сила залежатиме від напруженості магнітного поля в зазорі та намагніченості насичення МР і може в багато разів перевищувати силу тяжіння.

Основними перевагами МРГ перед традиційними ущільненнями є нульові витоки герметизованого середовища, мінімальне зношування внаслідок чисто рідинного тертя, низькі енергетичні втрати, висока ремонтпридатність, простота техобслуговування, працездатність у статичній та динамічній, самовідновлення у разі аварійного прориву ущільнюваного середовища.

Умови роботи електродвигунів як приводів НА теплових і атомних електростанцій характеризуються як важкі. Двигуни піддаються шкідливому впливу вологи, агресивних компонентів навколишнього середовища, підвищеної частоти виникнення технологічних перевантажень, неповнофазних режимів живлення, широкого діапазону коливань напруги та різких

перепадів температур. Тому їх оснащують захисними пристроями. Такі двигуни потребують частого проведення технічного обслуговування.

Величина зазору в активній зоні МРГ на початку експлуатації електричної машини становить 0,2–0,25 мм, але при подальшій експлуатації значно збільшується через зношеність обладнання. Крім того, аналіз наслідків тривалої експлуатації зношеного обладнання показує, що навіть для модернізованих технологічних установок після капітального ремонту величина цього проміжку повинна бути збільшена як мінімум до 0,5–0,8 мм [9,10].

Для надійного магнітного утримання МР за наявності таких великих зазорів магнітну індукцію на поверхні концентратора магнітного потоку доводиться збільшувати до 2–2,5 Тл. У таких сильних полях МР стає просторово неоднорідною внаслідок магнітофорезу магнітних частинок та виникнення агрегатів, що може суттєво вплинути на стабільність експлуатаційних параметрів МРГ. Ступінь неоднорідності МР у рівноважному стані визначається балансом між магнітофорезом, седиментацією та градієнтною дифузією частинок і залежать від концентрації цих частинок, їх розмірів, форми та конкуруючих міжчасткових взаємодій [5].

Відомо [8], що структура та стійкість МР як колоїдної системи суттєво залежать від технології її виготовлення. Виходячи з цього, численні теоретичні дослідження пояснюють загальний характер стійкості, але застосувати їх для вибору на практиці типу МР важко [12]. Тому питання про застосування МР у кожному конкретному пристрої вирішується на основі непрямих даних, отриманих з реологічних, дифузійних та магнітних вимірювань, або шляхом випробувань на стендах, що моделюють реальні умови експлуатації МР.

Існуючі нині методи визначення колоїдної стабільності та седиментаційної стійкості МР забезпечують досить достовірні результати, але вимагають використання високовартісного дослідного та вузькопрофільного приладового обладнання, а у випадку проведення ресурсних випробувань – значного часу. Тому ці методи практично неможливо застосувати на підприємствах, які експлуатують обладнання із встановленими МРГ.

Метою даної роботи є розроблення відносно простого та легкого у реалізації безпосередньо на підприємстві методу дослідження динамічних процесів і, зокрема, седиментаційної стійкості магнітної рідини в неоднорідному магнітному полі в наближених до тих, що реалізуються в активній зоні МРГ, умовах. В осно-

ву цього методу покладено запатентований спосіб вимірювання магнітної сили, яка діє на зразок, заповнений магнітною рідиною та розташований у неоднорідному магнітному полі, а також вимірювання динаміки зміни у часі цієї сили з використанням високоточних електронних ваг [13].

Виклад основного матеріалу

При дослідженні властивостей магнітних рідин, що забезпечують її довговічність і стійкість, необхідно враховувати наступні взаємозалежні фактори [6,8,14,19]:

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

- намагніченість, в'язкість і теплопровідність МР є загалом нелінійними функціями напруженості магнітного поля і температури;

- зміна параметрів зовнішнього магнітного поля і температури впливає на структурування магнітних частинок у МР. Існує можливість утворення агрегатів і ланцюжків, що змінює всі фізичні властивості МР, а 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 електрорушійні сили і електричні струми, які змінюють умови роботи;

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

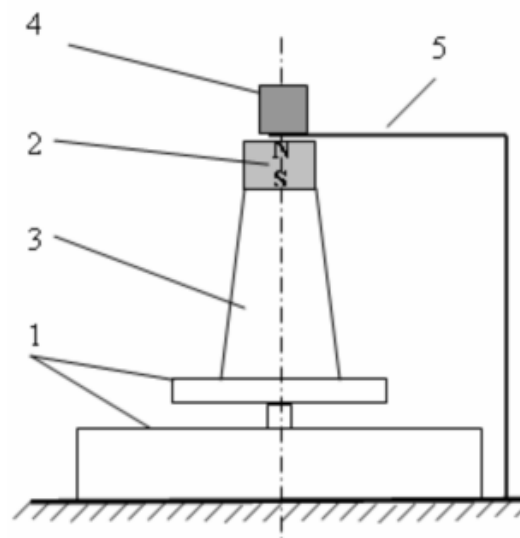
- форма поверхні, яку приймає МР, визначається розподілом магнітного поля, температури і прикладеним тиском;

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

В основі методу вимірювання динамічних процесів у 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. За характером зміни цієї сили можна судити про інтенсивність перебігу динамічних процесів [13]. 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 у МР змінюється в діапазоні від декількох секунд до

десятиків годин 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 у МР схематично показана на рисунку 1. 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.



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

Рисунок 1 – Принципова схема експериментальної установки

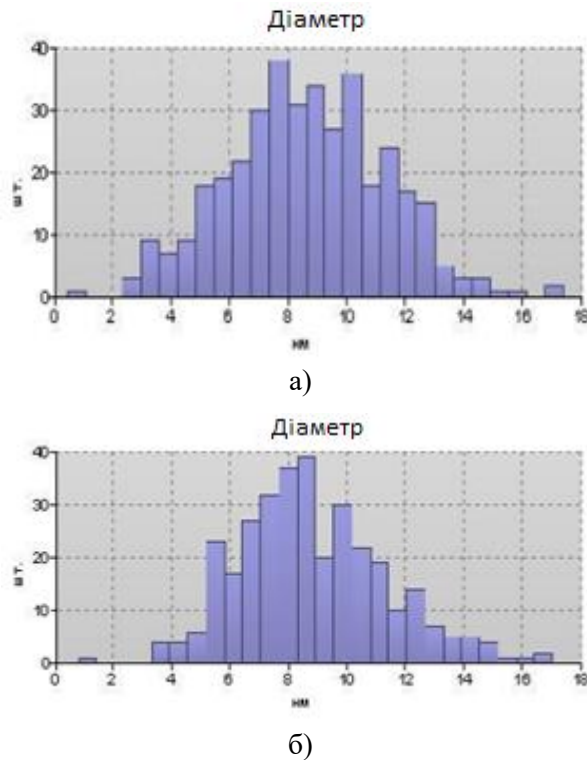
Як зразки для дослідження було обрано різні типи МР, розроблених і виготовлених у ТОВ «НВВП «Феррогідродинаміка». Ці рідини знайшли широке застосування в різноманітних конструкціях МРГ. Для більш широкого узагальнення отриманих результатів у роботі досліджувалися також рідини на основі гасу і скипидару, які через специфічні фізико-хімічні властивості рідких основ поки не знайшли широкого застосування в МРГ.

Для дослідження впливу середнього розміру наночастинок було обрано магнітну рідину з однієї партії, але з різним часом центрифугування. Стандартна МП готувалася з тривалістю центрифугування 1 годину, що відповідає технологічному регламенту, прийнятому в НВВП „Феррогідродинаміка”. Також друга частина партії МР центрифугувалась протягом 10 хв., а третя партія піддавалася центрифугуванню протягом 4 хвилин. В якості дисперсійних середовищ були обрані вакуумне масло ВМ-3 (найширше застосовується в промисловості),

аріезон (перспективний новий матеріал для магнітної рідини) і гас (властивості МР на основі гасу досить докладно досліджені іншими авторами і є можливість порівняння з даними інших дослідників).

Для всіх типів магнітних рідин використовувалися наночастинки на основі магнетиту; як поверхнево-активна речовина застосовувалася олеїнова кислота.

На рисунку 2 показані гістограми розподілу за розмірами магнітних частинок в рідині на основі гліцерину (рис. 2.а) і вакуумного масла (рис. 2.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 [7,10].

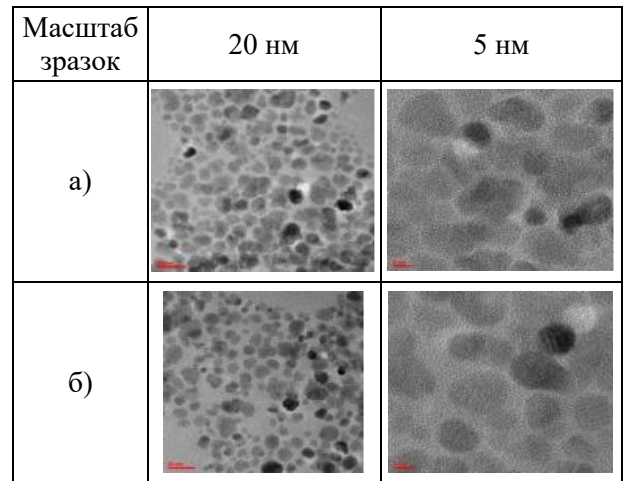


а) – МР на основі гліцерину;
б) – МР на основі вакуумного масла ВМ-3

Рисунок 2 – Гістограма розподілу наночастинок магнітної рідини за розмірами

На рисунку 3 представлені електронні фотографії наночастинок магнетиту на основі: гліцерину (рис. 3, а) і вакуумного масла (рис. 3, б).

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



а) – МР на основі гліцерину;
б) – МР на основі вакуумного масла ВМ-3

Рисунок 3 – Електронні фотографії наночастинок МР
(масштаб вказано на фотографіях червоною лінією)

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. Густина олеїнової кислоти 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-носій.

Для визначення рівня магнітного поля і величини градієнта цього поля в області МР для експериментальної установки виконувався чисельний розрахунок досліджуваної магнітної системи методом скінченних елементів за допомогою пакета програм Comsol [16]. Результати розрахунку наведені на рисунку 4, 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.

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 5, а. Розраховані за цими даними значення швидкості зміни магнітної сили, що обчислюються як наведено на рис. 5.

$$V_F = \frac{F_m(t) - F_m(0)}{F_m(0)t}$$

де $F(t)$ – поточне значення магнітної ваги; $F(0)$ – початкове значення магнітної ваги; t – час.

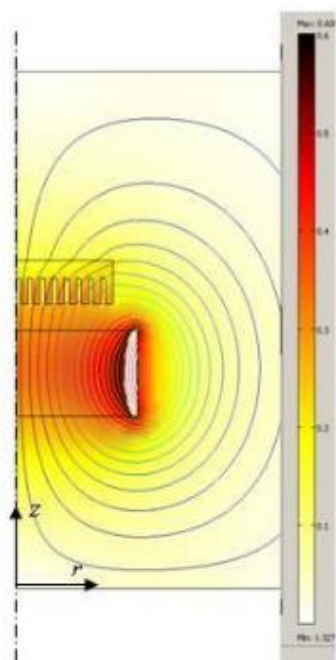


Рисунок 4 – Чисельний розрахунок досліджуваної магнітної системи

З аналізу отриманих графічних залежностей (рис. 5), та значень діагностичних параметрів зроблено такий висновок: для всіх досліджуваних рідин криві зміни магнітної сили мають практично однаковий характер – спостерігається швидке зростання магнітної сили на початковому етапі тривалістю $\tau = 60\text{--}200$ с, і потім відносно повільне зростання або приблизно незмінне значення сили, що можна пояснити властивостями рідини-носія і самої МР.

Всі ці рідини (крім гасу і скипидару) відпрацювали в складі МРГ не менше 1,5 роки і претензій під час експлуатації до них не було, крім МРГ на основі гліцерину, яка інтенсивно вбирала вологу, після чого відбувалося її розшарування.

Результати вимірювання змінного в часі відносного значення магнітної сили, що діє на зразки магнітної рідини з різними рідкими основами та часом центрифугування, представлені на рис. 6.

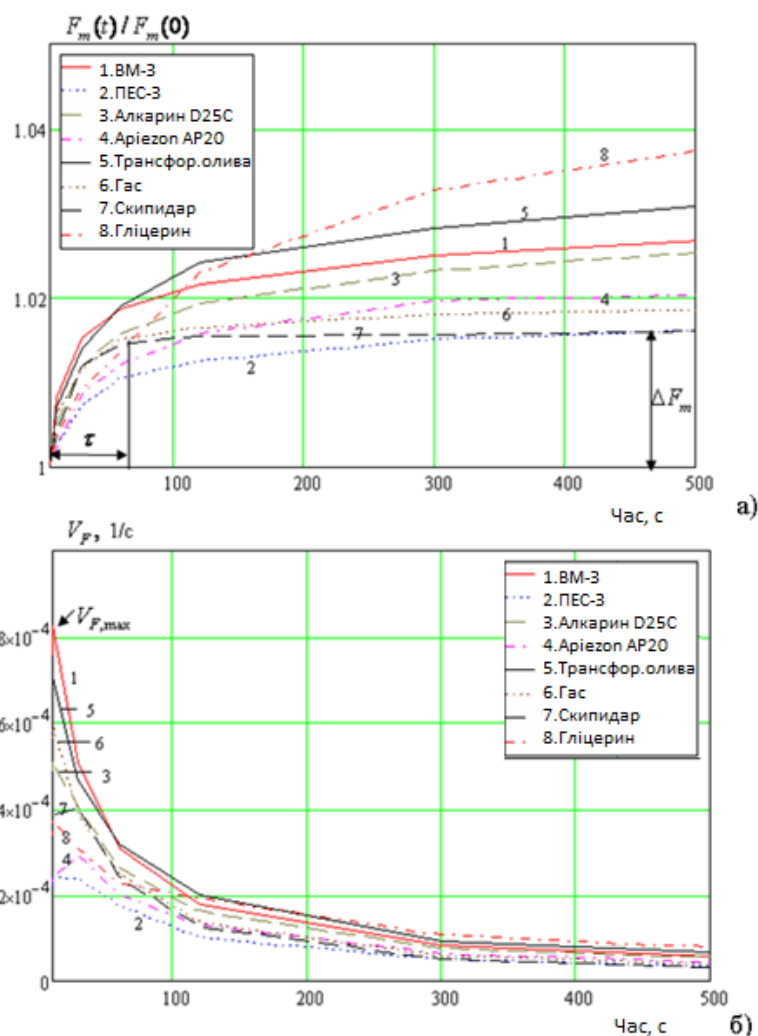


Рисунок 5 – Залежність відносного значення магнітної сили (а) і швидкості зміни магнітної сили (б) від часу

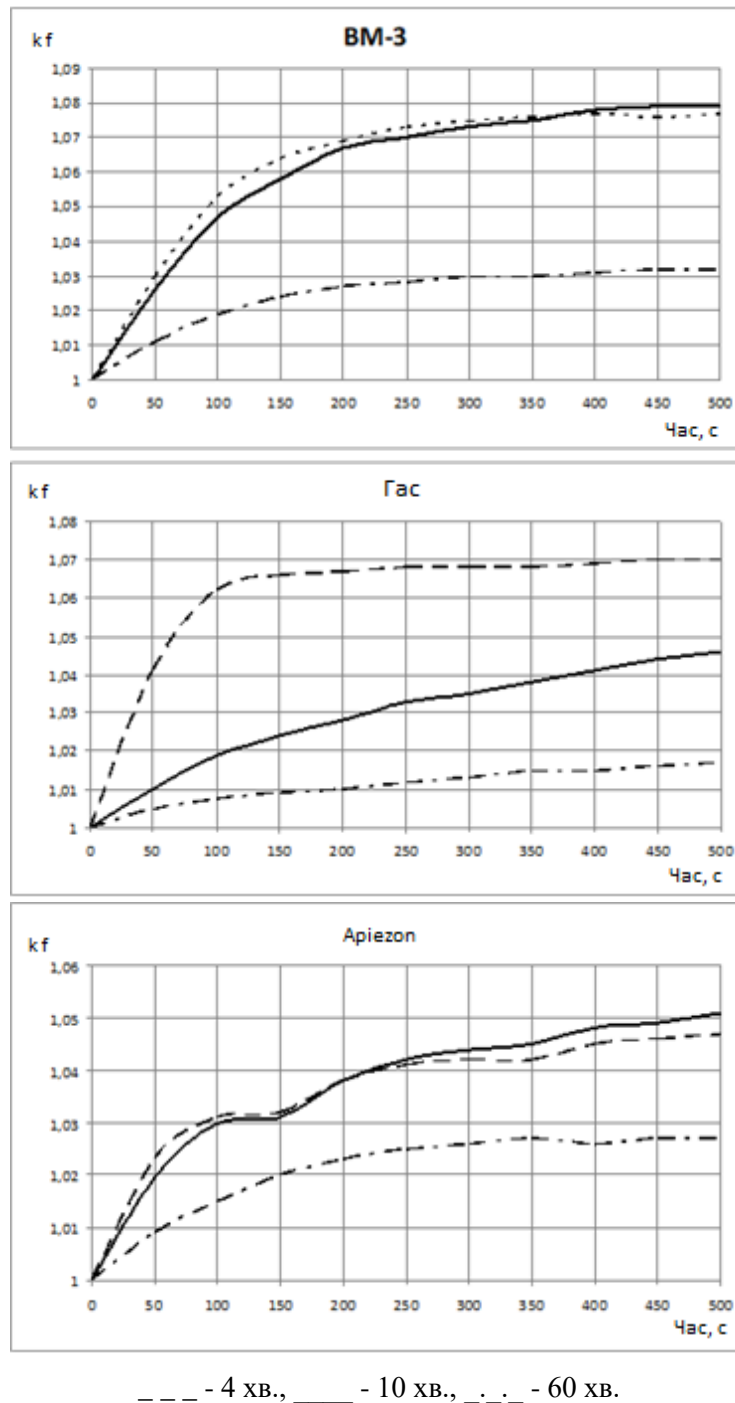


Рисунок 6 - Залежність відносної магнітної сили від часу для магнітних рідин на різних основах та тривалості центрифугування

Із графіків випливає, що характер зміни відносної величини магнітної сили у часі – однаковий. Для магнітних рідин, що пройшли повне центрифугування, зміна магнітної сили протягом 10-15 хвилин не перевищувало 3%, що згідно з проведеним в [17, 18] аналізом свідчить про високу седиментаційну стійкість МР.

Загалом МР, яка не пройшла стандартного центрифугування протягом однієї години, неможливо рекомендувати для тривалої експлуатації у складі МРГ. Великі частинки, що зали-

шилися в них, значно знижують стійкість МР, а, отже, і надійність МРГ.

Розроблений метод було застосовано для дослідження магнітних рідин виробництва Китайської Народної Республіки. Це були магнітні рідини на основі діізооктилсебацінату та діоктилсебацінату із середнім розміром частинок 8 нм та 10 нм відповідно. Ці основи є досить стійкими до агресивних середовищ, не розчиняються у воді та маслі, мало випаровуються, стійкі при температурі до 200 °С. Тому є дуже

перспективними для застосування в магнітних рідинах. Вони є складними ефірами себацінової кислоти. Як поверхнево-активні речовини (ПАР) використовувалися біс (трихлорметилові) ефіри карбонової кислоти.

Проведені випробування цих рідин показали, що зміна магнітної сили не перевищила 2% і вони також можуть бути рекомендовані для застосування в магніторідинних герметизаторах.

Висновки

1. У роботі запропоновано та реалізовано на експериментальній установці відносно простий метод експрес-аналізу динамічних характеристик магнітної рідини, яка знаходиться в неоднорідному магнітному полі в умовах, близьких до тих, які реалізуються в активній зоні герметизатора валу, що обертається. В основі цього методу лежить силова дія неоднорідного магнітного поля на магнітні наночастинки в рідині.

2. Виходячи з отриманих експериментальних даних та досвіду експлуатації МРГ, можна стверджувати, що седиментаційну стійкість буде мати та магнітна рідина, для якої зміна магнітної сили протягом 10-15 хв не перевищить 3%.

3. Достовірність виведення 2 була експериментально перевірена для магнітних рідин на різних дисперсійних основах, при різному розмірі наночастинок та застосованих ПАР.

4. Запропонований метод є відносно простим і може бути реалізований на підприємстві, що експлуатує магніторідинні герметизатори, для аналізу характеристик МР перед заправкою в герметизатор.

5. В наведеній роботі досліджено лише МР виробництва «Феррогідродинаміки». Всі вони були синтезовані за однією технологією, як ПАР була застосована олеїнова кислота. Надалі необхідно дослідити вплив технології виготовлення магнітних рідин, розмірів наночастинок та виду стабілізатора на величину магнітної сили.

Література

1. Forsyth J., Hanzon M., Gawliński M., Świtalski P. *Pompy-Pompownie*. 1998, Vol. 11 (73), P. 44-46.

2. Тарельник В. Б., Антошевський Б. Енергоєфективні, альтернативні і енергозберіжні технології: монографія. Суми: МакДен. 2016. 317 с.

3. Верховцев В.Г., Лисиченко Г.В., Забулонов Ю.Л. Перспективи розвитку уранової сировинної бази ядерної енергетики України: монографія. Київ: Наук. думка, 2014. 356 с.

4. Пирогов В.О. Модернізація привода насосних станцій трубопроводів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2022, № 1. С. 50-56.

5. Радіонов О.В. Досвід експлуатації магніторідинних герметизаторів на нафтопереробних заводах країн СНД. *Хімічна техніка*. 2015, № 10. С. 11-17.

6. Марцинковський В., Тарельник В., Антошевський Б. Екологічна безпека експлуатації компресорного і насосного обладнання: монографія / за ред. О.В. Радіонова. Суми: Сумський державний університет, 2014. 282 с.

7. Радіонов О.В., Виноградов О.М. Систематизація найбільш доцільних галузей використання магніторідинних ущільнень. *Вісник Академії інженерних наук України*. 2003. №1 (18). С. 3-9.

8. Ravaud R., Lemarquand G. Mechanical properties of a ferrofluid seal: three-dimensional analytical study based on the coulombian model. *Progress in Electromagnetics Research*. 2009, Vol. 13. P. 385-407.

9. Radionov A.V. Eksploatacja uszczelnien z cieczy magnetyczna w ukraińskich i rosyjskich zakładach przemysłu chemicznego. *Hydraulika i Pneumatyka*. 2004. No 5. P. 21-26.

10. Radionov A. Magnetic fluid sealing complexes for bearing assemblies of mine main ventilation fans. *Magneto hydrodynamics*. 2018. Vol. 54, No. 1-2. P. 109-114.

11. Odenbach S. Editor. Colloidal Magnetic Fluids: Basics, Development and Applications of Ferrofluids. *Series: Lecture Notes in Physics*. Vol. 763. Berlin: Springer, 2009. 442 p.

12. Куникин С.А., Диканский Ю.И. Магнітні колоїди. Особливості функціональних залежностей магнітної сприйнятливості. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 151 с.

13. Кириленко О.В., Подольцев О.Д., Кондратенко І.П. 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. 8 с.

14. Іванов А., Пшеничников А. Магнітофорез та дифузія колоїдних частинок у магнітній рідині. Експериментальне та теоретичне

дослідження. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 148 с.

15. Пшеничников А.Ф., Лебедев А.В., Радіонов А.В., Єфремов Д.В. Магнітна рідина для роботи у сильних градієнтних полях. *Колоїдний журнал*. 2015. Том 77, № 2. С. 207-213.

16. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com>

17. Радіонов А.В., Радіонова А.А., Подільцев А.Д. Експериментальне дослідження динамічних процесів в магнітній рідині в неоднорідному магнітному полі герметизатора валу, що обертається. *Технічна електродинаміка*. 2017, №2. С. 77-82.

18. 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*. 2017, 233. 012038. doi: [10.1088/1757-899X/233/1/012038](https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012038).

References

1. Forsyth J., Hanzon M., Gawliński M., Świtalski P. *Pompy-Pompownie*. 1998, Vol. 11 (73), p. 44-46. [in Poland]

2. Tarelnyk V. B., Antoshevskiy B. Enerhoefektyvni, alternatyvni i enerhozberezhni tekhnologii: monohrafiia. Sumy: MakDen, 2016. 317 p. [in Ukrainian]

3. Verkhovtsev V.H., Lysychenko H.V., Zabulonov Yu.L. *Perspektyvy rozvytku uranovoi syrovynnoi bazy yadernoi enerhetyky Ukrainy: monohrafiia*. Kyiv: Nauk. dumka, 2014. 356 p. [in Ukrainian]

4. Pyrohov V.O. *Modernizatsiia pryvoda nasosnykh stantsii truboprovodiv*. Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu. 2022, Vol. 1. P. 50-56. [in Ukrainian]

5. Radionov O.V. *Dosvid ekspluatatsii mahnitnorydnykh hermetyzatoriv na naftopere-robnnykh zavodakh krain SND. Khimichna tekhnika*. 2015. Vol. 10. P. 11-17. [in Ukrainian]

6. Martsynkovskiy V.A., Tarelnyk V.B., Antoshevskiy B. *Ekolohichna bezpeka ekspluatatsii kompresornoho i nasosnoho obladnannia: monohrafiia / za red. O.V. Radionova*. Sumy: Sums'kyi derzhavnyi universytet, 2014. 282 p. [in Ukrainian]

7. Radionov O.V., Vynogradov O.M. *Systematyzatsiia naibilsh dotsilnykh haluzei vykorystannia mahnitnorydnykh ushchilnen. Visti Akademii inzhenernykh nauk Ukrainy*. 2003, Vol. 1 (18). P. 3-9. [in Ukrainian]

8. Ravaud R., Lemarquand G. Mechanical properties of a ferrofluid seal: three-dimensional analytical study based on the coulombian model. *Progress in Electromagnetics Research*. 2009. Vol. 13. P. 385-407.

9. Radionov A.V. *Eksploatacja uszczelnien z cieczy magnetyczna w ukraińskich i rosyjskich zakładach przemysłu chemicznego. Hydraulika i Pneumatyka*. 2004, Vol. 5. P. 21-26. [in Poland]

10. Radionov A. Magnetic fluid sealing complexes for bearing assemblies of mine main ventilation fans. *Magnetohydrodynamics*. 2018, Vol. 54(1-2). P. 109-114.

11. Odenbach S. Editor. *Colloidal Magnetic Fluids: Basics, Development and Applications of Ferrofluids. Series: Lecture Notes in Physics*. 2009, Vol. 763. Berlin: Springer, 442 p.

12. Kunykin S.A., Dykanskyi Yu.Y. *Mahnitni koloidy. Osoblyvosti funktsionalnykh zalezhnosti mahnitnoi spryiniatlyvosti*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 151 p. [in Ukrainian]

13. Kyrylenko O.V., Podoltsev O.D., Kondratenko I.P. *Sposib vymiriuvannia mahnitnoi spryiniatlyvosti mahnitnykh ridyn ta prystrii dlia yoho realizatsii: patent na vynakhid No 102749 Ukraina: (51) MPK G01N27/76(2006/01), A61N21/06(2006/01), H01F7/02(2006/01), G01R33/16(2006/01), a 2011 13739, zaiavl. 22.11.2011; opubl. 12.08.2013, Biul. No 15. 8 p. [in Ukrainian]*

14. Ivanov A., Pshenychnykov A. *Mahnitoforz ta dyfuziia koloidnykh chastynok u mahnitnii ridyni. Eksperymentalne ta teoretychne doslidzhennia*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 148 p. [in Ukrainian]

15. Pshenychnykov A.F., Lebediev A.V., Radionov A.V., Yefremov D.V. *Mahnitna ridyna dlia roboty u sylnykh hradiientnykh poliakh. Koloidnyi zhurnal*. 2015, Vol. 77, No.2. P. 207-213. [in Ukrainian]

16. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com>

17. Radionov A.V., Radionova A.A., Podiltsev A.D. *Eksperymentalne doslidzhennia dynamichnykh protsesiv v mahnitnii ridyni v neodnorydnomu mahnitnomu poli hermetyzatora vala, shcho obertaietsia. Tekhnichna elektrodynamika*. 2017, No 2. P. 77-82. [in Ukrainian]

18. 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*. 2017, 233. 012038. doi: [10.1088/1757-899X/233/1/012038](https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012038).