

УДК 62.229.315 (0 45)

**К.К. Бадір***Національний авіаційний університет***ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СКЛАДОВА УТРИМАННЯ ФЕРОМАГНІТНИХ  
ЗАБРУДНЕНЬ НА ПОВЕРХНЯХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*В статті проведено аналіз існуючих теорій та гіпотез, а також експериментальні дослідження, які показали, що крім гравітаційної та адгезійної складових сил, що утримують забруднення на поверхнях деталей машин, велику роль відіграє електромагнітна складова, яка притаманна феромагнітним конструкційним матеріалам, зокрема для підшипникових сталей.*

*Ключові слова:* феромагнітні забруднення, трибосистема, фізико-хімічні процеси, потік рідини, очищення деталей, гідросистема.

**К.К. Бадір****ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ УДЕРЖАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ  
ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*В статье проведен анализ существующих теорий и гипотез, а также экспериментальные исследования, которые показали, что кроме гравитационной и адгезионной составляющих сил, удерживающих загрязнения на поверхностях деталей машин, большую роль играет электромагнитная составляющая, которая присуща ферромагнитным конструкционным материалам, в частности для подшипниковых сталей.*

*Ключевые слова:* ферромагнитные загрязнения, трибосистемы, физико-химические процессы, поток жидкости, очистка деталей, гидросистема.

**К.К. Badir****ELECTROMAGNETIC COMPOSITION OF THE RETENTION OF FERROMAGNETIC  
POLLUTIONS ON THE SURFACES OF MACHINE PARTS**

*In the article is conducted of analysis of existing theories and hypotheses, as well as experimental researches, that showed that except gravitational and adhesive components of the forces, that keep dirt on the surfaces of machine parts, the electromagnetic component, which is inherent in ferromagnetic structural materials in particular bearing steel, plays an important role.*

*Key words:* ferromagnetic pollution, tribosystem, physical and chemical processes, fluid flow, purification of parts, hydrosystem.

**Вступ.** Ресурс і експлуатаційна надійність повітряних, наземних і водних транспортних засобів, верстатів, сільськогосподарських та інших машин значною мірою залежать від чистоти робочих поверхонь їхніх деталей, вузлів і агрегатів, гідравлічних, паливних, масляних та інших систем.

Очищення робочих порожнин деталей машин від виробничих і експлуатаційних забруднень сприяє зменшенню інтенсивності зношування відповідальних деталей, вузлів і агрегатів, різко збільшує термін їх безвідмовної роботи, поліпшує технічні характеристики й експлуатаційні властивості машин, заощадує дорогі конструкційні матеріали й робочі рідини, скорочує витрати на обслуговування й ремонт машин, підвищує ресурс і надійність машин, що дає великий техніко-економічний ефект. Тому в технології очищення й контролю чистоти машин відбувається сьогодні період інтенсивного розвитку.

**Актуальність проблеми.** У результаті підвищення чистоти робочих рухомих поверхонь деталей і рідин багатьох машин, їхній ресурс може бути збільшений в 2-3 рази, а в деяких випадках – до 10 разів [1; 2; 3; 4; 5].

Однак проблема вискоєфективного очищення робочих порожнин агрегатів і систем машин внаслідок своєї складності поки не одержала остаточного вирішення й залишається досить актуальною.

Вплив забруднень на експлуатаційні властивості й працездатність машин відзначали давно, однак предметом спеціального вивчення він став лише відносно недавно. Вперше проблема запобігання забрудненням виникла й виявилася найбільш гостро в авіаційній і ракетній техніці, де широко застосовують прецизійні гідравлічні системи керування, що мають високу точність позиціонування й велику швидкодію. Подібні пристрої, що працюють до того ж за підвищених тисків робочої рідини досить чутливі до різного роду забруднень.

Взагалі, забруднення робочих порожнин машин приводять до таких небажаних наслідків: підвищеного зношування найбільш відповідальних деталей; повного або часткового закупорювання (зарощення) робочих отворів (щілин) у дроселях та інших каналах малої

пропускної здатності; заклинювання рухомих деталей трибосистем; перегрівання й руйнування гідравлічних механізмів; збільшення сил тертя в плунжерних парах і зростання зусиль, необхідних для зрушення й переміщення плунжера; виникнення кавітаційних явищ у робочих рідинах; окиснення рідин і погіршення їхніх робочих властивостей; зниження продуктивності насосів та інших небажаних явищ.

**Виклад основного матеріалу.** Проблему промислової чистоти машин тепер вирішують застосуванням у процесі їх виробництва й експлуатації спеціальних методів і засобів очищення деталей, вузлів, агрегатів і систем і відповідним чином організованої системи контролю чистоти.

Очищення поверхні металевих деталей, внутрішніх порожнин вузлів, агрегатів і систем являє собою сукупність складних фізико-хімічних і механічних процесів, ефективність яких залежить від властивостей мийного середовища, розміру й властивостей частинок забруднень, технологічних режимів очищення, конструктивних особливостей очищувальних деталей, агрегатів і систем. Вид і ступінь забруднень, що залишились після очищення поверхні, залежать здебільшого від способу очищення й типу мийного середовища.

Тривалість процесу очищення деталей, агрегатів і систем сучасних машин досягає 10-15% від загальних витрат часу на їх виготовлення і складання [6, 7]. Тому вибір мийного середовища, способу й параметрів очищення є важливим етапом технологічного процесу виготовлення машини. Забруднення металевих поверхонь у вигляді плівок, твердих частинок, що прилипли, олів та мастил можуть бути вилучені в результаті механічного впливу, розчинення, хімічної реакції або змивання. У деяких випадках використовують комбіновані види очищення.

Створено технологію й обладнання для високоефективного очищення агрегатів і систем пульсуючим потоком рідини, методи й засоби газорідинної, ультразвукового й струминного очищення, розроблені нові високоефективні мийні засоби. Дедалі більшого застосування в промисловості, у ремонтних і експлуатаційних організаціях набуває тонке відцентрове очищення робочих і технологічних рідин. Розробляються й досліджуються електричні очисники палив і мастил, удосконалюються методи магнітного очищення, створюються ще досконаліші фільтрувальні матеріали й конструкції фільтрів. Розроблено автоматизовані конструкції промивного й мийно-очисного обладнання [8].

Сьогодні для очистки деталей, агрегатів і систем машин широко застосовують мийні рідини, що мають високу фізико-хімічну активність. При цьому поряд зі здатністю мийної рідини розпушувати, руйнувати або розчиняти шар забруднень використовують також здатність рідини справляти за певних умов на тверді частинки забруднень механічний вплив.

Режим очищення металевих поверхні деталі потоком мийної рідини (оптимальна технологія) визначають виходячи з аналізу гідродинамічної взаємодії мийної рідини з частинками забруднень, а також на підставі результатів експериментальних досліджень.

Тверді частинки забруднень можна відокремити від рідини механічно або за допомогою силових полів. Механічний спосіб передбачає застосування щільних або пористих фільтрувальних матеріалів, за допомогою яких фільтрують рідини. Частинки забруднень видаляють з рідини також впливом сил відцентрового, магнітного, електричного або іншого полів. Як пристрої, що очищають рідину, використовують різні фільтри або відцентрові, магнітні й електростатичні очисники.

Рідина може очищатися від дрібних твердих частинок під дією сил їхньої ваги, тобто через осадження. Однак осадження дрібних частинок, розмір яких менший за 10 мкм, у гравітаційному полі навіть за невеликої висоти стовпа рідини (висоти осадження) – малоефективний процес, оскільки може тривати кілька діб. Швидкість осадження частинок, а отже, і ефективність очищення можуть бути збільшені в десятки й сотні тисяч разів, якщо скористатися відцентровим полем. Силове відцентрове поле створюється за допомогою спеціальних апаратів – центрифуг [9; 10].

Спосіб газорідинного промивання з подачею газу в імпульсному режимі використовують на деяких агрегатних заводах під час очищення корпусних деталей агрегатів, трубопроводів і інших виробів з невеликими габаритами. Спосіб дозволяє в 2-3 й більше разів зменшити тривалість очищення виробів порівняно із прокачуванням однорідним сталим потоком мийної рідини. Цей спосіб найбільш ефективний для очищення коротких каналів і порожнин. Його недоліки – труднощі керування в необхідних межах змінними гідродинамічними параметрами потоку, велика витрата азоту (близько 10 кг/год.) та потреба в його відокремленні для забезпечення безкавітаційного режиму роботи насосів, а також негативний вплив газу на фізико-хімічні властивості й стабільність мийної рідини.

Для відповідальних деталей плунжерних пар розподільників, клапанів, дроселів і інших регулювальних пристроїв широко застосовують ультразвукове очищення.

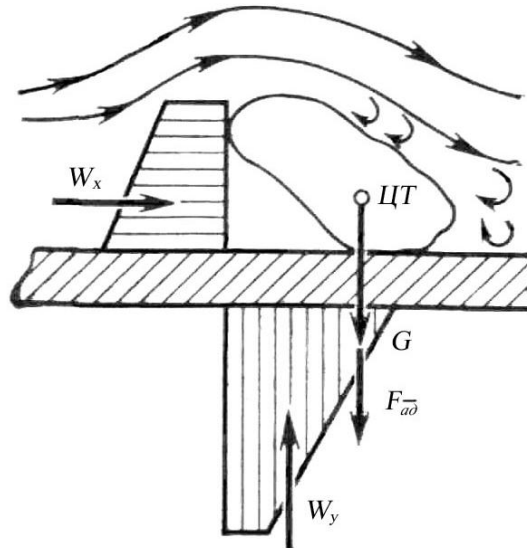
До недоліків ультразвукового очищення можна віднести обмеження розмірів очищувальних деталей, труднощі забезпечення ефективного відведення забруднень із зони очищення, а також можливість за певних умов кавітаційного пошкодження деталей. Разом з тим, ефективно очистити деякі деталі можна лише за допомогою ультразвуку. Це дрібнокапілярні фільтроелементи, які використовують у сучасних гідравлічних і паливних системах; очистити їх іншими способами, крім очищення в ультразвукових ваннах, неможливо.

Процес очищення поверхні металу потоком рідини можна поділити на такі зв'язані між собою елементарні процеси: відрив частинок забруднень від поверхні, що очищується; зважування забруднень потоком рідини; транспортування забруднень до фільтрувальних пристроїв.

Процес відриву частинок забруднень є основною складовою всього процесу очищення. Разом з тим частинки, що відірвались від поверхні, мають бути швидко вилучені, для чого потік рідини повинен мати необхідну зважувальну й транспортувальну здатності.

Під зважувальною здатністю рідкого середовища розуміють її здатність утримувати у зваженому стані тверді частинки певних розмірів. Зважувальна здатність визначається природою й концентрацією зваженої речовини. Зважувальна здатність дисперсного середовища зазвичай характеризується найбільшим (критичним) розміром частинок і їх кількістю, які можуть стійко утримуватись цим середовищем у зваженому стані. На сьогодні визнано, що стійке перенесення рідиною важких частинок у зваженому стані можливе тільки в турбулентних потоках рідини.

Розглянемо процеси відривання і зважування частинок забруднень потоком рідини, які стали класичними. На частинку, що лежить на поверхні деталі, відповідно до загальноприйнятих норм, діють такі сили (рис.1): сила ваги частинки в рідині  $G$ ; сила адгезії частинки до поверхні  $F_{ад}$ ; підймальна сила  $W_y$ , що являє собою вертикальну складову головного вектора гідродинамічного впливу рідини на частинку; сила лобового опору  $W_x$  – складова головного вектора гідродинамічного впливу рідини на частинку, що збігається з напрямком вектора швидкості потоку. Оскільки реальні розміри частинок забруднень, що підлягають видаленню – 0,5-100 мкм, то значна їх кількість опиняється під час очищення у товщині межового шару рідини, що являє собою шар рідини, загальмований біля поверхні під дією сил в'язкості. Примежовий шар перешкоджає контакту частинок забруднень із сусідніми шарами рідини, що інтенсивно рухаються й утрудняє видалення прилиплих частинок з поверхні.



**Рис. 1. Схема впливу сил на частинку забруднення, що перебуває на очищуваній поверхні у потоці рідини: ЦТ – центр тяжіння;  $G$  – сила ваги частинки в рідині;  $F_{ад}$  – сила адгезії частинки до поверхні;  $W_x$  – складова головного вектора гідродинамічного впливу рідини на частинку;  $W_y$  – підймальна сила**

Одиночна частинка, що лежить на поверхні, яку очищають, або виступає над навколишніми частинками, зазнає з боку потоку мийної рідини силовий вплив, причиною якого є сила лобового опору частинки  $W_x$ . Під дією сили  $W_x$  частинка зміщується (зрушується) відносно поверхні контакту, при цьому сила  $W_x$  залежно від форми частинки змушує її котитися або скочити по

поверхні. Чим більше форма частинки наближається до форми кулі, тим ймовірніше її переміщення коченням. Плоскі й довгі частинки по поверхні або в поверхні переміщуються ковзанням.

Очевидно, відривання частинки від поверхні можливе, якщо сума сил гідродинамічного впливу рідини на частинку в напрямі потоку перевищують силу тертя частинки об поверхню. Величина сили тертя частинки об поверхню залежить від сили її зчеплення з поверхнею, зумовленої здебільшого силою ваги частинки  $G$  і силою адгезії  $F_{ад}$ . Сила адгезії частинок зростає зі зменшенням їх розміру, а також унаслідок замазлювання й зволоження контактувальної поверхні. На цей час ще немає теоретичних й експериментальних досліджень, у яких визначалася б сила адгезії частинок забруднень у паливах, маслах і рідинах гідросистем. Для дрібних частинок забруднень сила адгезії може на кілька порядків перевищувати силу ваги і є, таким чином, основною силою, що утримує частинку на очищуваній поверхні.

За деякої швидкості потоку рідини спостерігається страгування й початок руху перших частинок, стійкість якого може порушуватися, при цьому частинки коливаються і, відриваючись від очищеної поверхні, переміщуються стрибкоподібно поблизу поверхні. За певних умов частинки, що відірвалися, можуть знову осісти на поверхню або перейти в потік у зважений стан.

Величині місцевої швидкості потоку рідини у зоні розміщення частинки, за якої відбувається її відрив від поверхні, відповідає деяка середня швидкість руху рідини, яку називають швидкістю відривання. Розрахунок процесу відривання частинок зводиться до визначення цієї швидкості залежно від розміру частинок.

У працях М.А. Великанова, В.Н. Гончарова, І. І. Леви, Б. А. Шуляка, В.С. Кнороза й інших учених досліджено умови руху частинок наносів у руслових потоках. При цьому розглянуто частинку ґрунту у воді розміром 0,005-2,5 мм і більше. Дослідження показали, що значення швидкості екстрагування для цих частинок при глибині потоку 0,5 м становлять 0,1-3,2 м/хв.

Деякі дослідники стверджують, що через розходження в обтіканні частинок, що істотно відрізняються за розмірами, не представляється можливим знайти загальну формулу для визначення швидкості відриву часток. Середня швидкість потоку, яка потрібна для відривання частинок, зростає зі зменшенням їх розміру. Це пояснюється тим, що силовий вплив на малі частинки, що перебувають у товщі примежового шару, де швидкості руху рідини малі, також досить незначний. Необхідне для відриву частинок збільшення місцевих швидкостей рідини зумовлює збільшення і середньої швидкості.

Розрахунки показують [11], що для видалення полідисперсного порошку забруднювальних частинок розміром від 2-5 до 100-200 мкм і більше з трубопроводів, внутрішній діаметр яких 4-25 мм потрібна об'ємна подача насосної установки 90 м<sup>3</sup>/год (1500 л/хв), що практично нездійсненно, оскільки об'ємна подача сучасних насосів для гідросистем високого тиску не перевищує 0,6-1,8 м<sup>3</sup>/год (100-300 л/хв).

Неможливість забезпечити потрібні для очищення швидкості потоку мийної рідини (25-30 м/с) призводить до значного збільшення тривалості очищення, а також не гарантує повного видалення частинок забруднень розміром менше 5-10 мкм.

Спеціальні дослідження показують, що ефективно видалення полідисперсного порошку забруднювальних частинок розміром 2-100 мкм можливе й за помірних середніх швидкостей мийної рідини, якщо в потоці штучно створити збурювання коливаннями тиску або швидкості потоку рідини [12].

Недостатня швидкість потоку мийної рідини при цьому компенсується певною мірою за рахунок створення таких умов для очищення, що сприяють інтенсивнішому руйнуванню зв'язків, які утримують частинки забруднень на очищуваній поверхні.

Для турбулентного потоку рідини характерна наявність поперечних (відносно основного напрямку руху) пульсаційних швидкостей рідини, що є наслідком турбулентного перенесення кінцевих мас рідини.

Наявність у турбулентному потоці поперечних пульсаційних швидкостей рідини робить можливим перенесення разом з масою рідини (у поперечному напрямі) твердих частинок і підтримання їх у зваженому стані.

Шорсткість поверхні очищувальних деталей за певних умов також може стати джерелом виникнення турбулентності потоку, у результаті чого в пристінній ділянці потоку виникають вихори і створюються умови, потрібні для стійкого зважування твердих частинок рідиною.

Оскільки тверді частинки мають більшу, ніж рідина, щільність, вони прагнуть осісти на поверхню каналу, чому перешкоджають наявні у пристінному шарі рідини імпульси турбулентності.

З теоретичних схем, що описують стрибкоподібний рух частинок у пристінній ділянці, найбільш прийнятна теорія А. Ейнштейна, яка потім була розвинена М.А. Великановим, у якій розглядається механізм зважування частинок на основі ймовірності їх відривання від стінки й невипадення частинок, що перебувають у зваженому стані. Основні параметри, що визначають процес за цією теорією – це пульсаційні характеристики потоку і гідравлічна крупність твердих частинок.

Розглянемо тепер відповідно до цієї схеми механізм зважування частинок забруднень турбулентним потоком миючої рідини, для чого виділимо в потоці об'єм рідини, обмежений поверхнями  $ab$  і  $cd$  (рис. 2) з площею стінки трубопроводу  $S_{CT}$ .

Прийmemo, що повздовжніх швидкостей  $v$  у потоці немає, а діють лише поперечні пульсаційні швидкості  $v_{oz}$ , які характерні для турбулентного потоку. Із площі стінки  $S_{CT}$  за час  $\Delta t$  у перший (пристінний) шар рідини за швидкості  $v_{oz}$  надходить  $n$  частинок забруднення. На поверхні  $I-I$ , що розділяє перший і другий шари потоку, виділимо площу потоку в перетині  $ab$ , яка дорівнює площі  $S_{CT}$ . Під гідравлічною крупністю частинки  $v_{oz}$  розуміють швидкість рівномірного падіння важкої частинки в деякому об'ємі рідини. Очевидно, що після закінчення часу  $\Delta t$  одна частина частинок із числа  $n$  зі швидкістю  $v_{oz} = v_{oz}' + v_{oz}$  випаде (осяде) назад на стінку, друга зі швидкістю  $v_{oz} = v_{oz}' + v_{oz}$ , пройшовши через перетин  $ab$ , потрапить у другий шар потоку. Природно, що переміщатися вгору можуть тільки частинки, у яких  $v_{oz} = v_{oz}' + v_{oz}$ . Розглянувши аналогічно площу потоку в перетині  $cd$ , знаходимо, що деяка (ще менша) кількість частинок потрапить із другого шару в третій і т. д. Таким чином, завдяки дії швидкостей турбулентний потік до певної межі буде насичуватися частинками забруднень. Концентрація забруднень  $C_0$  у напрямі від стінки до осі трубопроводу буде зменшуватися (див. епюру 1–2–3), а найбільший розмір частинок  $d_{max}$  зі зменшенням інтенсивності швидкостей  $v_{oz}'$  повинен також зменшуватися зі збільшенням відстані від стінки (див. епюру 3–4–5–6–7). За малих значень  $v_{oz}'$  найбільші частинки не відриваються від стінки, а ковзають або перекочуються по ній під дією сили  $W_x$ . У цьому випадку частинки можуть потрапити в такі ділянки трубопроводної магістралі, з яких наступне видалення буде затрудненим (через мікросорсткості, канавки та ін.).

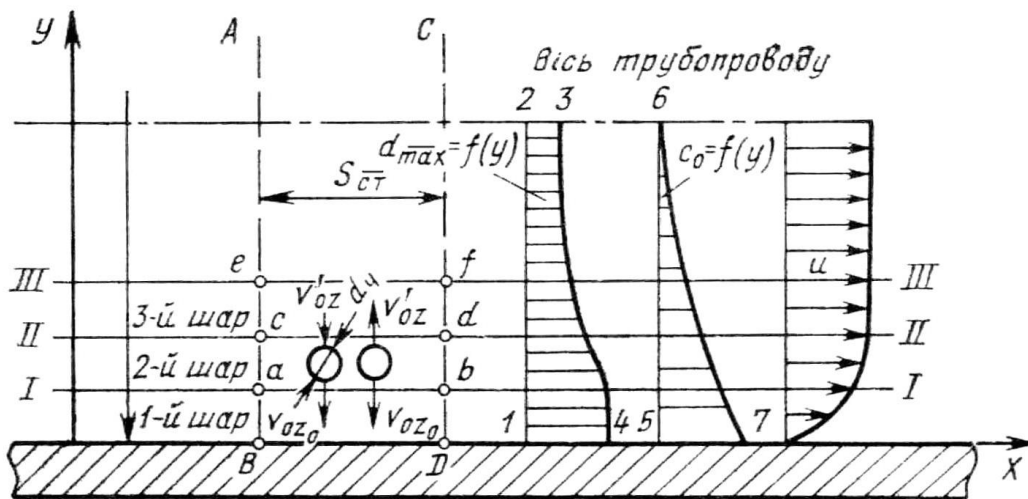


Рис. 2. Схема зважування частинок забруднень турбулентним потоком рідини:  $C_0$  – концентрація забруднень;  $S_C$  – площа стінки трубопроводу;  $d_{max}$  – найбільший розмір частинок;  $v_{oz}$ ,  $v_{oz}'$  – поперечні пульсаційні швидкості;  $d$  – діаметр частинки.

Вважають, що ефективність очищення деталей не залежить від тиску мийної рідини. Величину цього тиску зазвичай вибирають за умов забезпечення необхідної об'ємної подачі рідини  $Q$  за заданої форми деталей, причому потрібний для очищення (промивання) тиск рідини має не перевищувати робочий тиск у гідросистемі.

Особливо актуальна проблема очищення деталей машин для нерозбірних трибосистем, таких, наприклад, як кулькові підшипники, у яких є приховані поверхні від прямої дії турбулентних потоків через їх конструктивне виконання. Це порожнини, утворені поверхнею тертя-ковзання сепаратора та тіл кочення.

Дослідження впливу змінних електромагнітних полів на забруднення підшипникової сталі ШХ15 підтвердили, що мікро- та субмікро- струмопровідні частинки під дією відомих методів очищення (ультразвуковий, гідродинамічний та змішаний) не видаляються з поверхонь повністю. Тобто відомі технологічні способи очищення деталей машин дозволяють лише зсунути металічні забруднення по межі зерен, на якій в конструкційних сталях виникає і завжди діє електромагнітна складова утримання мікро-, субмікро- та нано- струмопровідних частинок (рис.3).

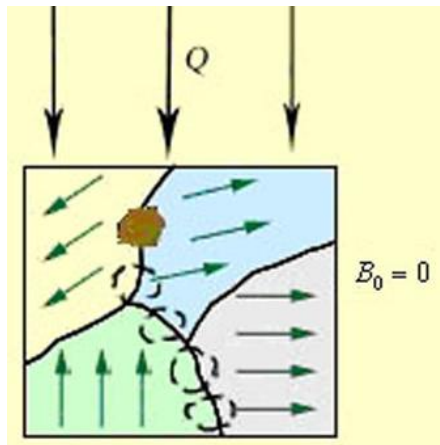


Рис. 3. Переміщення металічної частки забруднення по межі зерен під дією потоку мийної рідини  $Q$ . Деталь розмагнічена ( $B_0 = 0$ )

Виходячи з гіпотези домінуючого внеску електромагнітної складової сили утримання струмопровідних часток забруднень на поверхні деталей машин, нами було розроблено новий метод їх видалення за допомогою джерела змінних імпульсних магнітних полів. Таким джерелом може служити декілька варіантів виконання. Апробація показала надзвичайно високу ефективність цього методу та переваги над існуючими, а саме: безконтактність, відносно невелике енергоспоживання, малогабаритність та продуктивність. Зокрема, при очищенні таким методом кулькових підшипників, в яких є приховані порожнини для прямої дії гідравлічних, кавітаційних та ультразвукових потоків миючої рідини спостерігалось зменшення рівня вібрації на 5-15%, плавність обертання та підвищення їх довговічності і надійності. Про це свідчать численні акти спільних випробувань з такими підприємствами, як ЗМКБ „Прогрес” (м. Запоріжжя), „20-й підшипниковий завод” (м. Курськ), ВАТ „Відео фон” (м. Воронеж), а також науковий центр ARCI (Індія).

Таким чином, розроблений метод, який побудовано на засадах гіпотези електромагнітної природи утримання мікро забруднень на поверхнях деталей машин має велику перспективу в машинобудівному комплексі, зокрема в підшипниковій галузі.

**Висновки.** Незважаючи на високий рівень сучасної очисної техніки, що дозволяє робити очистку на досить високому рівні, при аналізі процесів, що відбуваються під впливом гідродинамічного потоку миючої рідини на частку забруднення, ми прийшли до висновку і експериментально довели, що досі ніхто не надавав істотного значення магнітній та електромагнітній складовій. Так як повністю розмагнітити кожне зерно феромагнетиків неможливо і завжди має місце залишкова намагніченість, то ця складова грає далеко не останню роль, особливо у випадку з мікро- і наночастинками металу, коли останні утримуються градієнтними міжзеренними магнітними полями, що виникають на межі доменів. Враховуючи розмір доменів (у середньому порядку 10-100 мкм) можна припустити, що гравітаційна складова, яка має місце між часткою забруднення і поверхнею є значно меншою ніж магнітна, особливо у випадку зі струмопровідними наночастинками. Розроблений метод дозволяє вийти на новий рівень промислової чистоти, і відкриває шлях не тільки до істотного збільшення терміну служби вузлів і агрегатів машин, але й при підвищенні їх експлуатаційних характеристик. Це особливо актуально для прецизійних вузлів і агрегатів, які широко застосовуються в авіації й космонавтиці.

**Література**

1. Коваленко В.П. Загрязнение и очистка нефтяных масел. – М.: Химия, 1978. – 302 с.
2. Никитин Г.А., Чирков С. В. Влияние загрязненности жидкости на надежность работы гидросистем летательных аппаратов. М.: Транспорт, 1969 – 183 с.
3. Итикава М. Контроль загрязнений и промывка гидравлического оборудования// Юацу гидзюцу (Hydraulics and Pneumatics). – 1975. – Vol. 4, N. 4. P. 25—32.
4. Beers R., Dougali J., Zuccarello R. Preventive Maintenance in Hydraulic Systems by Sustematic Routine Fluid Mnitoring. – Ironand teel Engineer, USA – 1975 – Vol. 52, N. 2 – P. 53–56.
5. Kirnbauer E. A. Contamination Control For Fluid Power Symposium, 2-d, Guilford, 1971.
6. Абрамзон Л. А. Поверхностно-активные вещества. – Л.: Химия, 1975. – 248 с.
7. Тельнов Н. Ф. Технология очистки и мойки сельскохозяйственных машин. – М.: Колос, 1973. – 295 с.
8. Белянин П. Н., Данилов В. М. Промышленная чистота машин. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
9. Белянин П. Н. Центробежная очистка рабочих жидкостей авиационных гидросистем. М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.
10. Белянин П. Н., Черненко Ж. С. Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем. – М.: Машиностроение, 1964. – 294 с.
11. Зимон А. Д. Адгезия пыли и порошков. – М.: Химия, 1976. – 431 с.
12. Келлер О.К., Кратыш Г.С., Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. – Л.: Машиностроение, 1977. – 184 с.

Стаття надійшла до редакції 14.12.2018