

DOI: 10.20535/1810-0546.2018.4.141241

УДК 538.93

І.В. Ночніченко*, О.М. Яхно

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ЯВИЩА ПЕРЕНОСУ ТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЕНТРОПІЇ ДО АНАЛІЗУ ПОВЕДІНКИ МАГНІТОРЕОЛОГІЧНОГО ДЕМПФЕРА

Проблематика. Оскільки відомі способи підвищення робочих характеристик магнітореологічного демпфера не достатньо структуровані для їх використання при розрахунку характеристик гасіння в широкому температурному діапазоні, розглядаються фізичні аспекти явища переносу для розв'язку задач при створенні демпферів з високою швидкодією та точністю зміни робочої характеристики.

Мета дослідження. Метою роботи є дослідження явища переносу та робочих процесів у магнітореологічному демпфері.

Методика реалізації. Виконано експерименти та розрахунки, які, за експериментальними даними, описують процеси тепло- та масопереносу (в окремому випадку), включаючи вплив магнітного поля на них.

Результати дослідження. Обробка експериментальних даних і розрахунків показують, що зміна електромагнітної потужності в межах 0–26 Вт забезпечує регулювання потоку рідини в діапазоні 0–0,25 мл/хв. Встановлено залежність між швидкістю потоку магнітної рідини та силою струму. Доведено можливість зміни перепаду тиску в робочих камерах зміною сили струму та напруги.

Висновки. Врахування явища переносу та фізичних ефектів дає можливість більш поглиблено пізнати процеси, які відбуваються в магнітореологічному демпфері та магнітореологічній рідині. Поглиблене пізнання явищ і процесів відкриває нові можливості з урахування режимів роботи в змінних умовах експлуатації. Незважаючи на споживану потужність, використання магнітореологічного ефекту є найбільш доцільним у демпферах малої групи (з максимальним зусиллям опору до 600 Н). Отриманий закон, для досліджуваної рідини, можливо закласти в алгоритм керування робочою характеристикою магнітореологічного демпфера. Запропонований підхід дає можливість враховувати явище переносу та вплив пондеромоторної сили на характеристики демпфірування магнітореологічного демпфера.

Ключові слова: характеристика демпфера; в'язкість; температура; тепловий потік; магнітореологічна рідина; явища переносу; інформаційний перенос.

Вступ

Дослідження механічних процесів у машинобудуванні та вивчення процесів руху робочої рідини у системах гідроприводу має важливе теоретичне та прикладне значення [1–3]. Магнітореологічна рідина широко застосовується останніми роками, що підтверджується значними науковими та практичними досягненнями в магнітній гідродинаміці [4–7]. Магнітореологічна рідина відноситься до класу так званих “розумних” матеріалів, властивості яких змінюються під впливом магнітних і зсувних полів. На сьогодні під час дослідження механічних і гідродинамічних процесів у різних галузях промисловості виникає необхідність вибору раціональних напрямів підходу до аналізу системи, які тісно пов'язані з явищами переносу [8–10].

У більшості випадків у технічній гідромеханіці ми зустрічаємося з переносами маси, тепла та імпульсу. Гідропривід є специфічним кла-

сом механічних систем із рідинним робочим середовищем, яке має особливі властивості. Особливості процесів, які виникають під час роботи гідроприводу, зумовлюють надзвичайно складні динамічні процеси та супровідні ефекти, такі як спінення, кавітація, пульсації тисків, зміна в'язкості тощо [3]. Це проявляється нестабільністю роботи окремих агрегатів і призводить до зміни функціональних характеристик елементів гідроприводу та його точності позиціонування. В результаті врахування явища переносу можливо покращити та створити нові інтелектуальні конструкції, схожі за своєю структурою та функціями на біонічні або біомехатронні системи [4, 8–10]. Застосування магнітореологічної рідини дає змогу спростити систему керування і підвищити ефективність мехатронних систем. Наприклад, застосування ефекту пондеромоторної сили дає можливість діяти на заряджену частинку в неоднорідному осцилюючому електромагнітному полі. Гідроінформатику як науковий напрям можна засто-

* corresponding author: igor-nochnichenko@ua.fm

сувати для вивчення питання прикладних форм інформатики, спрямованої на вирішення проблем прогнозування дії та ефективного використання робочого середовища. Для підрахунку й аналізу мікроскопічних частинок, які рухаються у потоці рідини, використовують метод протокової цитометрії. Метод дає змогу проводити одночасний багатопараметричний аналіз фізичних або хімічних характеристик окремих частинок за допомогою оптичних і електричних методів вимірювання.

Зазначені принципи та ефекти можна використати для різних задач, наприклад для динамічного гасіння коливань. Одним із методів забезпечення заданої швидкості руху ланок механізмів та гасіння шкідливих коливань є застосування гідравлічних демпферів. Задані характеристики руху об'єкта віброзахисту забезпечуються за рахунок дисипації енергії рідини при її проходженні через калібровані дросельні отвори, які виконані в поршні або в радіальному зазорі демпфера. При цьому відбувається її перетворення на теплову енергію з подальшим розсіюванням в навколишнє середовище.

Як відомо [1, 3], на ступінь дисипації енергії впливають розміри прохідних перерізів дроселів, реологічні характеристики рідини (в'язкість, густина) та швидкість її руху. Це зумовлено зміною температури навколишнього середовища та нагріву рідини в процесі роботи, що негативно відображається на робочій характеристиці демпфера. Забезпечення стабільності характеристики можна досягти за рахунок застосування рідини, реологічні характеристики якої майже не змінюються в широкому діапазоні температури. Також використовуються засоби тепловідведення та гідравлічні або гібридні "компенсатори", що змінюють опір потоку рідини в каналі. Крім того, існує необхідність у здатності демпферів змінювати свою робочу характеристику за заданим законом у зовнішніх умовах експлуатації.

Виконання цих вимог можна забезпечити використанням у демпфері магнітореологічної рідини, що здатна змінювати свої характеристики під впливом прикладеного магнітного поля. При застосуванні магнітореологічної рідини виникає можливість створити системи регулювання без застосування рухомих елементів для зміни опору потоку рідини [4].

Актуальною науково-технічною задачею є застосування підходу явища переносу в остаточному розв'язку задач при створенні демпферів з високою швидкістю і точністю змін робочих

характеристик. Є два принципово різних підходи при побудові та дослідженні магнітореологічного демпфера, ми використали підхід явища переносу. Основною перевагою підходу є те, що зони потоку рідини, теплопередачі та масопереносу можуть бути розглянуті в кожному окремому випадку на різному рівні. Оскільки робоча характеристика демпфера формується, як правило, за рахунок реологічних властивостей, поведінки рідини та елементами клапанно-дросельної групи, то, на нашу думку, раціонально застосовувати підхід явища переносу.

Постановка задачі

Мета роботи полягає у дослідженні явища переносу та робочих процесів у магнітореологічному демпфері.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- обґрунтувати принципову схему магнітореологічного демпфера та схеми фізичного процесу гасіння коливань;
- визначити явища переносу в магнітореологічному демпфері;
- отримати залежність витрати робочої рідини крізь магнітореологічний дросель від сили струму в обмотці соленоїда демпфера.

Методика досліджень

Магнітореологічна рідина забезпечує швидку зміну реологічних властивостей: в'язкості, пластичності, пружності суспензії під дією магнітного поля. Це відкриває широкі можливості щодо керування гідродинамічними і теплообмінними процесами, характеристиками плинності магнітореологічної робочої рідини безпосередньо від контролера [4].

Явища переносу розглядають, як правило, на чотирьох ієрархічних рівнях: макроскопічному, мікроскопічному, молекулярному, атомарному (рис. 1). Розглянемо особливості явища переносу на прикладі фізичної хімії, яка не тільки перейшла від макро- та мікроскопічного підходу, але також ефективно відмовилася від багатьох областей у цьому процесі. Ці рівні переносу застосовують у трьох основних областях: потоки рідини, теплопередача, масообмін. Макро- та мікроскопічний підхід до потоку рідини може використовуватись для опису процесів і режимів руху рідини. Молекулярний і атомарний підхід набув значного поширення для опису явища переносу та процесів у живих

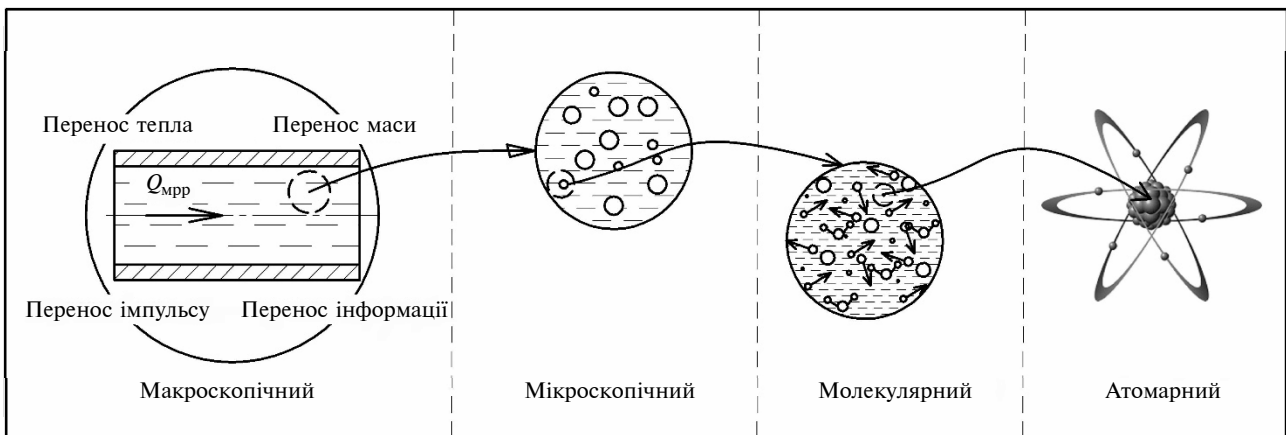


Рис. 1. Рівні розгляду явища переносу та супровідних ефектів

системах (органічних), хімічній та фармацевтичній промисловості.

Сферою застосування магнітореологічної рідини є традиційні та нові електрогідравлічні апарати: адаптивні демпфери зі змінним зусиллям опору, насоси-дозатори, слідкуючі приводи тощо [4]. Регулювання параметрів робочої рідини в таких технічних системах відбувається в каліброваних каналах або зазорах невеликих розмірів. Це потребує виготовлення високоточних елементів гідравлічних апаратів, що в разі підвищує їх вартість і потребує складних систем керування. Також практична реалізація таких технічних рішень потребує точного настроювання діапазону регулювання характеристик і технології виготовлення елементів.

Розглянемо принцип магнітореологічного регулювання на прикладі керованого демпфера. Рационально керувати зусиллям опору демпфе-

ра за рахунок використання магнітореологічної рідини з розміром часток $0,00001$ мм і прикладеного магнітного поля. В'язкість магнітореологічної рідини можна змінювати в десятки разів з часом реагування не більше 40 мс [4]. Важливою перевагою такої рідини є можливість її застосування за температури до -30 °С. Спеціальне покриття магнітних частинок поверхнево-активною речовиною перешкоджає їх злипанню.

На рис. 2 показано принципову схему демпфера з використанням магнітореологічної рідини при накладанні змінного магнітного поля. В цій конструкції електромагніт вбудований у поршень демпфера. Контролер керує силою струму за рахунок електричних імпульсів, які подаються на котушку. На ній створюється магнітне поле, за рахунок чого магнітні частинки активуються в ланцюги (лінії), при цьому збільшується в'язкість магні-

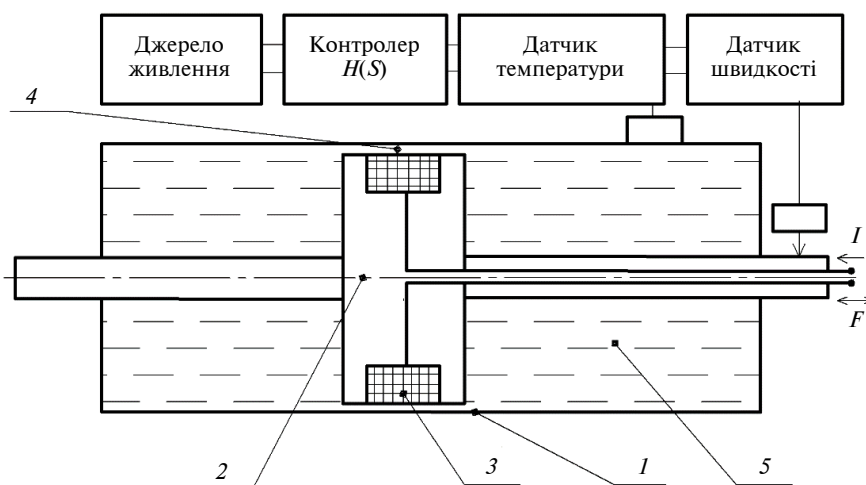


Рис. 2. Принципова схема демпфера з використанням магнітореологічної рідини та змінного магнітного поля: 1 – циліндр; 2 – поршень зі штоком; 3 – обмотка збудження; 4 – дросельний концентричний канал; 5 – магнітореологічна рідина

тореологічної рідини в дроселі. Магнітореологічний демпфер складається з циліндра 1, штока з поршнем 2, обмоток збудження 3 (рис. 2). Порожнини циліндра заповнені магнітореологічною рідиною. Циліндр 1 і поршень 2 виконані з магнітного матеріалу. Обмотка збудження 3 прокладена в пазах, виконаних у поршні. При русі поршня відносно циліндра в поперечному напрямку рідина протікає з однієї порожнини в іншу через вузький кільцевий зазор 4

між поршнем. Оскільки гідравлічний опір зазору визначає величину демпферного зусилля (F) і швидкість поршня, то керування робочою характеристикою демпфера (коефіцієнт демпфування) зводиться до зміни гідравлічного опору: в нашому випадку через створення в зазорі радіального магнітного поля заданої напруженості, яке виникає в результаті проходження струму керування (I) через обмотку збудження 3 і концентрується в зазорі магнітопроводу – поршнем-штоком 2 і циліндром 1.

Головним показником багатьох робочих рідин, від якого значно залежить зусилля опору демпферів, є кінематична в'язкість [1]:

$$\nu = \frac{dP_{\tau}}{ds \left| \frac{du}{dz} \right| \rho},$$

де dP_{τ} – сила в'язкого тертя; ds – площа дотику шарів у частині рідини; $|du/dz|$ – модуль градієнта швидкості; du – різниця швидкостей на зсувних площинах рідини; dz – відстань між площинами; ρ – густина робочої рідини.

Зусилля опору на штоку демпфера при режимах роботи “стиснення” F_c і “віддачі” F_b з урахуванням зміни властивостей магнітореологічної рідини і геометричних параметрів його складових елементів може бути знайдене за такою системою рівнянь [1]:

$$\begin{cases} F_c = pF_b = \frac{Q^2 \rho}{2\mu F_p} F_b \\ F_b = \frac{Q^2 \rho}{0,1F_g \sqrt{\frac{\tau_0 e^{\frac{ud}{kh}}}{u_p} + \nu}} F_b, \end{cases}$$

де Q – витрата магнітореологічної рідини через дросель; F_b – площа поршня; u_p – швидкість переміщення поршня; τ_0 – межа плинності магнітореологічної рідини; k – коефіцієнт кривизни залежності $\tau_0 = f(h)$; h – напруженість магнітного поля; u_d – швидкість витікання рідини; F_g – площа прохідного отвору поршня; ν – кінематична в'язкість рідини; μ – динамічна в'язкість рідини; p – тиск робочої рідини при режимах “стиснення” і “віддачі”.

Характерні три режими роботи магнітореологічної рідини в складі магнітореологічного демпфера (рис. 3): клапанний режим, режим зсуву, режим стиснення.

Принцип роботи рідинних демпферів полягає в перетворенні енергії механічних коливань на теплову енергію за рахунок в'язкого тертя в дросельних елементах із подальшим розсіюванням у навколишнє середовище (рис. 4).

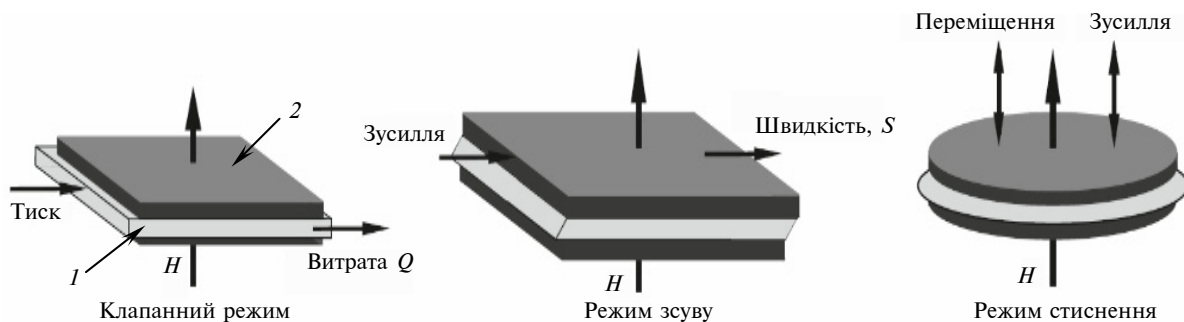


Рис. 3. Характерні режими роботи магнітореологічної рідини: а – клапанний, б – зсуву, в – стиснення; 1 – магнітореологічна рідина; 2 – пластина



Рис. 4. Схема фізичних процесів при гасінні коливань

При цьому витрату робочої рідини можливо змінювати за рахунок зміни в'язкості під дією магнітного поля. Тому при значній інтенсивності коливань і тривалій роботі демпфера також відбуватиметься зміна температурних режимів. Крім того, основними функціональними недоліками магнітореологічного демпфера є: зміна об'єму магнітореологічної рідини в процесі роботи, спінування магнітореологічної рідини та кавітація, деструкція, згущення частинок, залежність магнітореологічної рідини від температури та інерційність магнітореологічної рідини.

Враховуючи складність фізичних процесів, які спостерігаються при роботі демпфера, в якому застосовується магнітореологічна рідина, розглянемо математичні моделі процесів і проаналізуємо їх взаємозалежність.

Рівняння руху нестисливої магнітореологічної рідини має вигляд [5]

$$\begin{cases} \operatorname{div} u = 0, \\ \rho \frac{du}{dt} = -\nabla p + \mu \Delta u + \frac{1}{4\pi} (\operatorname{rot} B) \times B, \\ \rho c_v \frac{dT}{dt} = k \Delta T + \Phi + \frac{v_m}{4\pi} (\operatorname{rot} B)^2, \\ v_m \equiv \frac{c^2}{4\pi\sigma}, \end{cases}$$

де u – швидкість, B – магнітне поле, c_v – теплоємність, k – теплопровідність, T – температура, Φ – дисипативна функція, v_m – магнітна в'язкість, c – швидкість світла, σ – електрична провідність.

Проаналізувавши наведене вище рівня, ми встановили, що на перепад тиску діють сили інерції, сили в'язкого тертя і сила Лоренца. Силу Лоренца можна покласти на одному рівні з пондеромоторною силою та силою інерції. З урахуванням цих особливостей можна змінювати перепад тиску в камерах демпфера.

Електромагнітна сила (Лоренца) становить [5]

$$fdV = \sum_a e_a \left(E + \frac{1}{c} u_a \times B \right) = \left[\rho_e E + \frac{1}{c} j_i \times B \right] dV,$$

де e_a – електричний заряд, u_a – швидкість заряду, ρ_e – густина електричного заряду, j_i – густина струму.

Вираз для визначення пондеромоторної сили має вигляд [5]

$$F_n = -\frac{e^2}{4m\omega^2} \nabla(E^2),$$

де e – електричний заряд частинок, m – її маса, ω – кутова частота вібрацій поля, E – амплітуда електричного поля. За досить малих амплітуд магнітне поле створює дуже малу силу.

Явища переносу імпульсу, маси, переносу тепла та інформації у магнітореологічному демпфері можна подати так:

1. В'язкість (закон Ньютона, внутрішній перенос імпульсу від одного шару до іншого – тертя, перенос частинок) – зміна в'язкості магнітореологічної рідини під дією магнітного поля.

Перенос імпульсу (кількості руху), закон в'язкості Ньютона [11]:

$$\tau = \mu \operatorname{grad} u,$$

2. Масоперенос (дифузія – перемішування частинок – самодифузія, процес вирівнювання концентрації (зміна реологічних властивостей магнітореологічної рідини)).

Перенос маси, закон дифузії Фіка [11]:

$$q_t = D \operatorname{grad} C,$$

де D – коефіцієнт дифузії, C – концентрація молекул у речовині.

3. Теплоперенос (теплопровідність – перенос теплоти від більш нагрітого середовища до менш нагрітого – теплопередача за рахунок нагріву обмотки та в'язкого тертя в дреселі).

Перенос тепла (теплопровідність, закон Фур'є) [11]:

$$q_e = Q_\lambda \operatorname{grad} T,$$

де Q_λ – коефіцієнт теплопровідності.

4. У першому наближенні для оцінки інформаційного переносу можна використати гідроінформатику та поняття інформаційної ентропії (системи, які обмінюються з навколишнім середовищем енергією, речовиною та інформацією) К. Шеннон.

Інформаційна двійкова ентропія для незалежних випадкових подій x , c , n можливими станами, розподіленими з можливостями p_i ($i = 1, \dots, n$), розраховується за формулою [12]

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i,$$

де $H_i = -\log_2 p_i$ – частинкова ентропія, що характеризує тільки i -й стан.

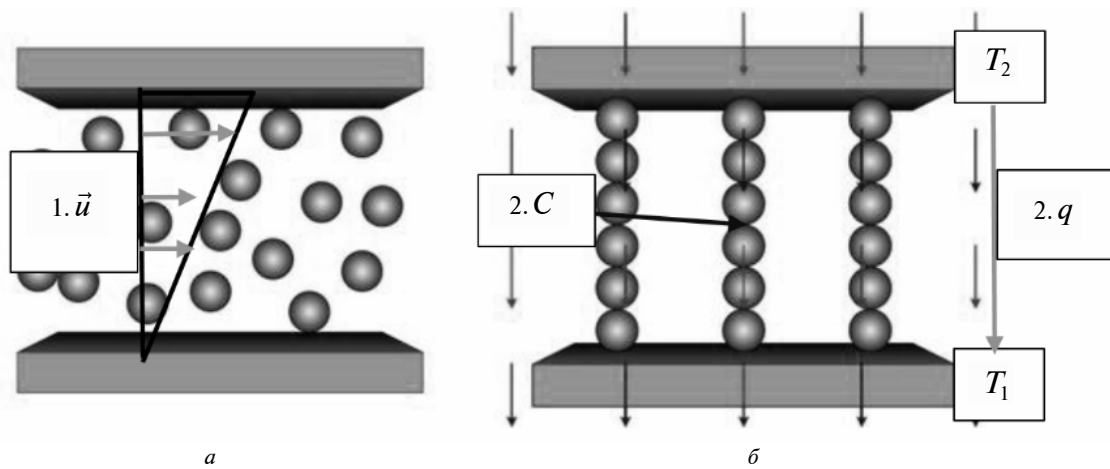


Рис. 5. Схема активізації магнітореологічної рідини: *a* – магнітне поле відсутнє; *b* – під дією магнітного поля

Час проходження пакета інформації:

$$t = \frac{W_p}{k_p},$$

де W_p – об'єм даних; k_p – пропускна здатність пакета.

5. Перенос заряду (електричний струм):

$$i = \frac{dq_i}{dt},$$

де q_i – електричний заряд.

На наступному кроці розглянемо більш детально потік магнітореологічної рідини в каліброваному каналі, оскільки витрата робочої рідини визначає робочу характеристику демпфера. Витрата визначається як геометричними розмірами каналу, так і властивостями рідини. Основними характеристиками магнітореологічної рідини є залежності: напруження плинності від напруженості прикладеного магнітного поля, напруження зсуву від градієнта швидкості для неактивної рідини. Вектори напруженості магнітного поля перпендикулярно перетинають магнітореологічний дросель, а тому магнітореологічна рідина здатна структуруватися під дією магнітного поля (рис. 5). За рахунок структування та збільшення в'язкості під час дроселювання активізована магнітореологічна рідина протікатиме з меншою швидкістю.

При аналізі явища переносу в магнітореологічному демпфері не враховувалися гідродинамічна кавітація, спінювання рідини, деструкція молекул магнітореологічної рідини. Незважаючи на це, ці ефекти та процеси потрібно враховувати при розробці та проектуванні демпферів, які працюють у широкому діапазоні температур і змінних умов експлуатації.

Результати досліджень

Для можливості врахування зміни в'язкості робочої рідини під дією магнітного поля при визначенні характеристик магнітореологічних дроселів проведено експериментальне дослідження. Дослідження проводилося на експериментальному стенді (рис. 6), що містить магнітореологічний дросель, який, наприклад, застосовується в магнітореологічному демпфері.

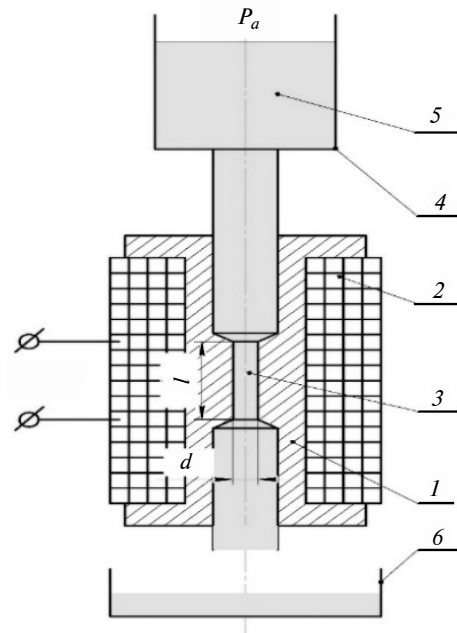


Рис. 6. Принципова схема експериментального стенда для дослідження магнітореологічного дроселя: 1 – корпус; 2 – електромагніт; 3 – дросель; 4 – ємність; 5 – магнітореологічна рідина; 6 – витратомір

Експериментальний стенд складався з корпусу 1, електромагніту 2, гідравлічного дросе-

ля 3 зі співвідношенням $l/d = 4,25$, ємності 4, у якій знаходиться магнітореологічна рідина 5 витратоміра 6 [13].

Експеримент проводився таким чином: у ємність 4 заливалась магнітореологічна рідина 5, яка під дією атмосферного тиску та сили тяжіння протікає через калібрований канал 3 у витратомір 6. Електромагнітом 2 створюється змінне магнітне поле за рахунок подачі на його контакти постійного струму в діапазоні 0–15 В. При цьому витратоміром 6 фіксувалась витрата рідини за температури 20 °С й атмосферного тиску. З урахуванням високої вартості магнітної рідини було вирішено створити її власноруч [14]. На наступному кроці було розроблено технологію виготовлення рідини: на основі мастила та дрібнодисперсного порошку заліза. Така рідина поступається стандартизований, однак для проведення цього дослідів її властивості цілком задовільні. Магнітну рідину було створено змішуванням магнітного порошку та основи – поліпшеної рідини для демпферних пристроїв АЖ-12Т [1], у пропорції 1:4. Також було розроблено методику отримання (змішування складових) магнітореологічної рідини.

Характеристики рідини:

- кінематична в'язкість (при 100 °С): не менше 3,5 сСт;
- температура спалаху у відкритому тиглі: не нижче 165 °С;
- температурний інтервал застосування: від –50 до +50 °С;
- марка рідини: АЖТ-12Т.

Характеристики магнітного порошку:

- розмір частинок 5–30 мкм;
- хімічний склад: Fe_2O_3 .

Дрібнодисперсний порошок у поєднанні з мастилом утворює насичений розчин, що проявляє властивості магнітореологічної рідини.

Отримані результати дали змогу визначити математичну залежність витрати робочої рідини через магнітореологічний дросель від струму в обмотці соленоїда у вигляді

$$Q = -IA + K,$$

де Q – витрата магнітореологічної рідини через калібрований канал; I – сила струму, A – коефіцієнт, що враховує магнітореологічні властивості рідини (чутливість до впливу магнітного поля), K – коефіцієнт, зв'язаний з витратою рідини (в'язкість).

Для цих умов $A = 0,8816$, $K = 17,48$, графічна залежність зображена на рис. 7. Наведе-

на математична залежність отримана для лінійної ділянки характеристики дроселя, яка спостерігається в межах робочого струму від 0,5 до 1,5 А, що значно полегшує алгоритм керування демпфером.

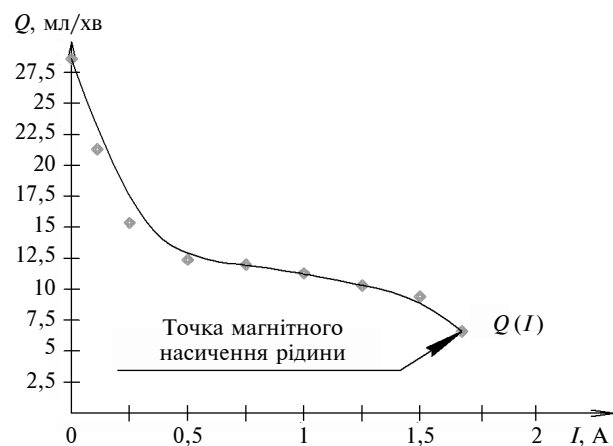


Рис. 7. Залежність витрати робочої рідини через магнітореологічний дросель від сили струму в обмотці соленоїда

Слід зазначити, що при прикладенні додаткового тиску спостерігалась сепарація магнітних частинок від мастила. Також встановлено при додаткових дослідженнях, що отримана магнітна рідина виявилась невідповідною для застосування в умовах високого тиску. Для таких випадків доцільно використовувати магнітну рідину, виготовлену на основі поверхнево-активних речовин, у яких основа та магнітні частинки поєднані на молекулярному рівні.

Висновки

Встановлено, що потік магнітореологічної рідини та явища переносу розглядають, як правило, на чотирьох ієрархічних рівнях: макроскопічному, мікроскопічному, молекулярному, атомарному. Від рівня погляду залежать глибина припрацювання системи та концептуальний підхід при побудові технічної системи.

Врахування явища переносу та фізичних ефектів дає можливість більш поглиблено пізнати процеси, які відбуваються в магнітореологічному демпфері та магнітореологічній рідині. Поглиблене пізнання явищ і процесів відкриває нові можливості щодо врахування режимів роботи в змінних умовах експлуатації.

Експериментально встановлено, що застосування магнітореологічного дроселя дає змогу регулювати витрату робочої рідини. Для вибра-

ної модельної рідини та при заданих параметрах дроселя і зміні потужності електромагніту в діапазоні 0–26 Вт спостерігалася зміна витрати в діапазоні 0,25–0 мл/хв. Зважаючи на споживану потужність, використання магнітореологічного ефекту є найбільш доцільним у демпферах малої групи (з максимальним зусиллям опору до 600 Н). Отриманий закон, для вибра-

ної рідини, можливо закласти в алгоритм керування робочою характеристикою магнітореологічного демпфера.

Подальші дослідження в напрямі застосування явища переносу та супровідних ефектів можуть бути враховані при розробці магнітореологічного демпфера, що здатен працювати в широкому діапазоні змінних умов експлуатації.

References

- [1] A. Derbaremdiker, *Transport Vehicles Shock Absorbers*. Moscow, SU: Mashinostroenie, 1985.
- [2] X. Wang and F. Gordaninejad, “Flow analysis of field-controllable, electro- and magnetno-rheological fluids using herchel-bulkley model”, *J. Intelligent Materials, Systems and Structures*, vol. 2, no. 2, pp. 87–121, 2000.
- [3] I. Nochnichenko and O. Uzunov, “Characteristics of throttles in hydraulic shock absorber considering temperature changes of fluid”, *Mech. Adv. Technol.*, vol. 2, no. 80, pp. 39–44, 2017. doi: 10.20535/2521-1943.2017.80.109169
- [4] K. Uorden, *New Intelligent Materials and Structures. Properties and Applications*, 1st ed. Moscow, Russia: Tekhnosfera, 2006, pp. 165–170.
- [5] A. Vatazhin *et al.*, *Magneto-hydrodynamic Flows in Channels*. Moscow, SU: Nauka, 1970, p. 672.
- [6] Z. Shul'man and V. Kordonskii, *Magnetorheological Effect*. Minsk, Belarus: Nauka i Tekhnika, 1982.
- [7] D. Sherklif, *Course of Magnetic Fluid Dynamics*. Moscow, SU: Mir, 1967.
- [8] A. Kulikovskii and G. Lyubimov, *Magnetic Hydrodynamics*, 2nd ed. Moscow, Russia: Logos, 2005.
- [9] G. Richard Griskey, *Transport Phenomena and Unit Operations a Combined Approach*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [10] R. Berd *et al.*, *Transport Phenomena*. Moscow: Khimiya, 1974.
- [11] R. Bird *et al.*, *Transport Phenomena*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [12] K. Shannon, *Work on Information Theory and Cybernetics*. Moscow, Russia: Laboratoriya Bazovykh Znaniy, 2002.
- [13] I. Nochnichenko and O. Ghalecjkyj, “Experimental study of magnetoresistance choke”, in *Proc. XV Int. Conf. Advanced Engineering, Technology and Engineering Education*, Kyiv, 2014, pp. 30–32.
- [14] A. Karpov *et al.*, “Experimental study of flow characteristics in a magnetoresistance choke channel”, in *Proc. the All-Ukr. Sci. Tech. Conf. for Youth – Machine Building” 2018*, Kyiv, 2018, pp. 1–3.

И.В. Ночниченко, О.М. Яхно

ПРИМЕНЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА И ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭНТРОПИИ К АНАЛИЗУ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ДЕМПФЕРА

Проблематика. Поскольку известные способы повышения рабочих характеристик магнито-реологического демпфера не структурированы для их использования при расчете характеристик гашений в широком температурном диапазоне, рассматриваются физические аспекты явления переноса для решения задач при создании демпферов с высоким быстродействием и точностью изменения рабочей характеристики.

Цель исследования. Целью работы является исследование явления переноса и рабочих процессов в магнито-реологическом демпфере.

Методика реализации. Выполнены эксперименты и расчеты, которые, по экспериментальным данным, описывают процессы тепло- и массопереноса (в частном случае), включая влияние магнитного поля на них.

Результаты исследования. Обработка экспериментальных данных и расчет показывают, что изменение электромагнитной мощности в диапазоне 0–26 Вт обеспечивает регулирование потока в диапазоне 0–0,25 мл/мин. Установлена зависимость между скоростью потока магнитной жидкости и силой тока. Доказана возможность изменения перепада давления в рабочих камерах путем изменения силы тока и напряжения.

Выводы. Учет явления переноса и физических эффектов дает возможность более углубленно познать процессы, которые происходят в магнито-реологическом демпфере и магнито-реологической жидкости. Углубленное познание явлений и процессов открывает новые возможности по учету режимов работы в изменяющихся условиях эксплуатации. Невзирая на потребляемую мощность, использование магнито-реологического эффекта является наиболее целесообразным в демпферах малой группы (с максимальным усилием сопротивления до 600 Н). Полученный закон для данной жидкости возможно заложить в алгоритм управления рабочей характеристикой магнито-реологического демпфера. Представленный подход позволяет учитывать явление переноса и влияние пондеромоторной силы на характеристики демпфирования магнито-реологического демпфера.

Ключевые слова: характеристика демпфера; вязкость; температура, тепловой поток; магнито-реологическая жидкость; явления переноса; информационный перенос.

I.V. Nochnichenko, O.M. Yakhno

APPLYING OF TRANSFER EFFECT AND INFORMATION ENTROPY TO ANALYZE THE MAGNETO-RHEOLOGY SHOCK ABSORBER

Background. Known methods of enhancing the magneto-rheological damper operation characteristics are not enough structured to use them to calculate damping characteristics in wide temperature range, physical aspects of the transfer phenomenon are considered in the design task of the high-speed and accurate shock absorbers.

Objective. The aim of the paper is to investigate transfer phenomenon and working processes of the magneto-rheological shock absorber.

Methods. Experiments and calculation, based on experimental data, to describe heat and mass transfer (separately) processes including influence of the electromagnetic strength on them are carried out.

Results. Processing of experimental data and calculation show that changing the electromagnetic power in range 0–26 W provides the flow regulation in range 0.25–0 ml/min. Dependence between the magnetic liquid flow rate and electromagnetic strength was established. The possibility of changing pressure difference between damper chambers by changing electrical current and voltage was proved.

Conclusions. Taking into account the phenomenon of transport and physical effects makes it possible to learn the processes that occur in the magneto-rheological damper and magneto-rheological fluid more deeply. In-depth knowledge of phenomena and processes opens up new possibilities for taking into account operating modes in changing operating conditions. Despite the power consumption, the use of the magnetorheological effect is most suitable in the dampers of a small group (with a maximum resistance force of up to 600 N). The obtained law for a given fluid can be incorporated into the control algorithm for the operating characteristic of a magneto-rheological damper. The represented method provides possibility to take into account the transfer phenomenon and influence of ponderomotive force on damping characteristics of the magneto-rheology shock absorber.

Keywords: damper characteristics; viscosity; temperature; heat flow; magnetic liquid; shock absorber; characteristics transfer effect; information transfer.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
22 травня 2018 року

Прийнята до публікації
6 вересня 2018 року