

УДК 537.84; 629.07.01

# Дослідження фрагментів магніторідинного гермовіброзахисту великогабаритних конструкцій

О. М. Савостянов<sup>1</sup>, В. В. Ємець<sup>2</sup>, В. Ю. Єрмаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НВО ім. С. А. Лавочкіна, Хімки

<sup>2</sup>ДКБ «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

Надійшла до редакції 12.05.96

Пропонується до широкого використання в ракетно-космічній техніці магніторідинний гермовіброзахист, що поєднує функції ущільнення та віброізолятора. Завдяки адаптивності до поверхонь, що ізолюються, пристрій можна застосовувати у рухомих великогабаритних конструкціях. Наводяться результати експериментальних випробувань фрагментів пристрою в режимах герметизатора та віброізолятора. Висвітлюється послідовність експериментально-конструкторського пошуку адаптивного магнітного герметизатора. Окреслюються перспективи розвитку розглянутих пристріїв для створення керованого активного гермовіброзахисту та магнітної дефектоскопії.

Сполучними ланками багатьох конструкцій в машинобудуванні правлять ущільнення та віброізолятори, які забезпечують герметизацію об'ємів та демпфування зовнішніх і внутрішніх збурень. В космонавтиці ущільнення та віброізолятори стають необхідними складовими, наприклад, такого технологічного обладнання: устаткування для виробництва матеріалів підвищеної якості в умовах довготривалої невагомості (Авидуевский, 1985), орбітальних телескопів (Данилов и др., 1976), трубопроводів паливних, пневматичних систем, а також систем терmostатування та життезабезпечення (Чегодаев, Мальтеев, 1992). Звичайно, це лише мала частина тих приладів і систем, де необхідне використання гермовіброзахисту (ГВЗ). ГВЗ використовується також при створенні складених орбітальних комплексів і супутників (Бейнум и др., 1975). Проте функції герметизаторів та віброізоляторів в існуючих конструкціях, як правило, розмежовані і виконуються окремими пристроями, хоча накопичено великий досвід в створенні магніторідинних гермозахисних пристрій (магніторі-

динних ущільнень обертового руху (Михалев, 1990), магніторідинних герметизаторів зворотно-поступального введення (Баштова и др., 1991) і магніторідинних віброізоляторів (Рулев и др., 1988).

В багатьох випадках конструктори намагаються поєднати функції герметизаторів та віброізоляторів в одному пристрії. Втім, з огляду на складності технологічного характеру, розроблені пристрії не забезпечують вимог подвійної спрямованості. Такі пристрії добре працюють як герметизатори, але, як правило, маючи підвищену жорсткість, майже не знижують вібронарантуажень.

Проблема полягає також в створенні ГВЗ, який можна було б використовувати без попередньої механічної обробки поверхонь, що контактирують з герметизаторами, оскільки для виробів з великими габаритами така обробка часом створює нездоланні технологічні ускладнення.

Цією статтею пропонується до розгляду новий напрямок, пов'язаний з конструкторсько-експериментальними пошуками рішень щодо створення

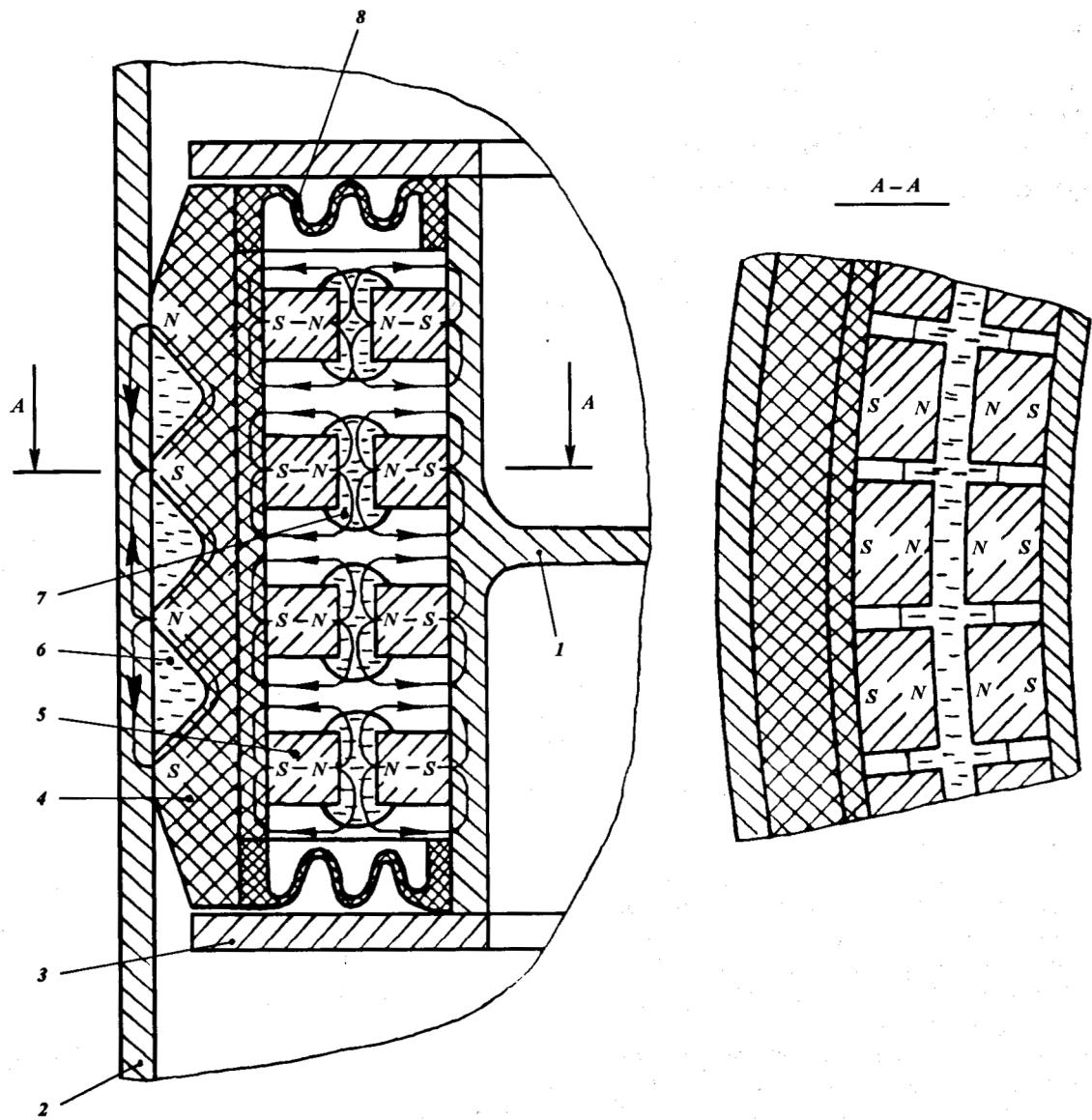


Рис. 1. Варіант будови магніторідинного гермовіброзахисту рухомого днища, яке пересувається в великогабаритному циліндрі (пояснення в тексті)

магніторідинного (МР) ГВЗ великогабаритних конструкцій, адаптованого до ущільнюваних поверхонь.

Один з варіантів будови МЖ ГВЗ наведено на рис. 1. Тут по периметру днища 1, яке поступально пересувається в циліндрі 2, встановлена обойма 3, в якій розташований кільцевий еластомагніт (ЕМ) 4 та система спрямованих одноіменними полюсами один до одного постійних магнітів 5. Кільцеві канавки на зовнішній поверхні ЕМ заповнені магнітною рідиною 6. Міжполюсні проміжки системи

магнітів 5 заповнені нормованою кількістю магнітної рідини 7, захищеною від зовнішнього середовища гнучкою оболонкою 8. На ЕМ 4 діють сили відштовхування магнітів 5, завдяки чому забезпечується його притискання до ущільнюваної поверхні 2 та зменшення проміжків, висота яких визначається в основному чистотою поверхні та нерівностями типу подряпин, раковин тощо. Герметизація проміжків забезпечується магнітною рідиною 6. Демпфування поперечних коливань циліндра здійснюється ЕМ 4, системою магнітів 5, а

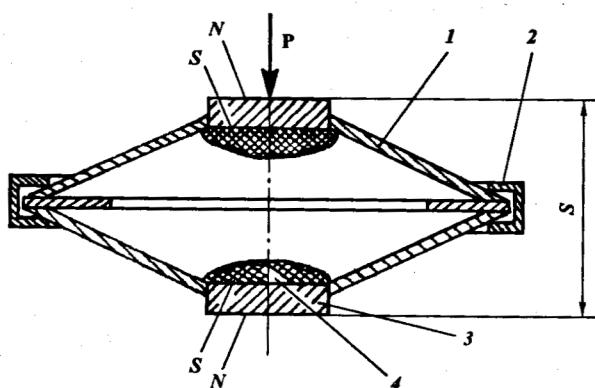


Рис. 2. Експериментальний зразок для дослідження демпфуючих характеристик магніторідинного гермовіброзахисту (пояснення в тексті)

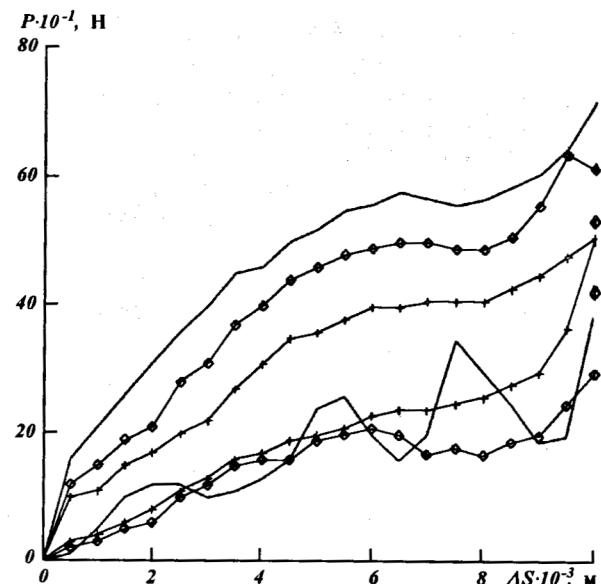


Рис. 3. Зміна висоти зразків  $\Delta S$  під дією сили навантаження  $P$  для трьох варіантів їх комплектації: 1 — тільки самі пружні елементи; 2 — пружні елементи з магнітами; 3 — пружні елементи з магнітами та магнітною рідиною

також магнітною рідиною 7.

Зауважимо, що при застосуванні МР ГВЗ в середовищах, які мають низькі температури (аж до кріогенних рідин), доцільно використовувати магнітні псевдорідини (МПР) (Ємець, Кравцов, 1995), які не вміщують рідкої фази, а замість ЕМ використовувати металеві обойми з розташованими в них системами постійних магнітів (Безвербий, Ємець, 1995).

Пристрої МР ГВЗ мають явні переваги перед існуючими герметизаторами та віброізоляторами, які полягають в тому, що вони можуть успішно виконувати функції цих пристріїв і разом з тим можуть застосовуватися для гермовіброзахисту конструкцій. Можлива секційність побудування МР ГВЗ дозволяє застосування його не тільки для контактуючих циліндричних поверхонь, але й для інших форм поверхонь.

Оцінку проектних параметрів МР ГВЗ великогабаритних конструкцій з урахуванням впливу збурень силового та кінетичного характеру на динаміку і стійкість системи рухомих тіл, якими можна представити об'єкт і пристрій захисту, можна провести з використанням математичних моделей та комп'ютерних програм, основу яких складає метод розрахунку динаміки просторового руху взаєморухомих конструкцій літальних апаратів (Савостьянов, 1988).

З метою з'ясування особливостей функціонування МР ГВЗ при роботі в окремих режимах герметизаторів і віброізоляторів були здійснені теоретичні та експериментальні дослідження фрагментів пристройів.

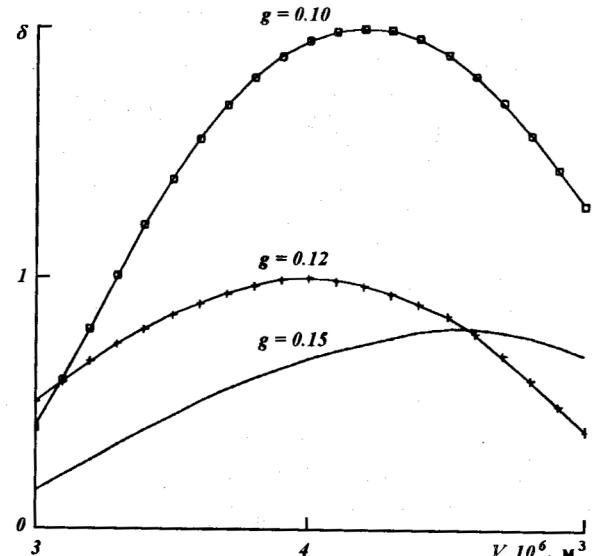


Рис. 4. Залежність логарифмічного декременту згасання коливань  $\delta$  системи зразків від об'єму заправки магнітною рідиною  $V$  та перевантаження  $g$

Для проведення експериментів по підтвердженю віброзахисних властивостей МР ГВЗ виготовлені зразки елементів конструкції пристроя, що імітують його демпфуючі характеристики, а також механічні і магнітні пружності (рис. 2). Кожний із

зразків складався з двох зрізаних конічних пружинних оболонок 1 із сталі С2А, скріплених обоймою 2. Усередині оболонок 1 вміщувались спрямовані одноіменними полюсами один до одного постійні магніти 3 зі сплаву Nd-Fe-B, а міжмагнітний проміжок заповнювався магнітною рідиною 4 типу ММТ-43, наданою Білоруською державною політехнічною академією.

На рис. 3 наведена діаграма статичного навантаження-розвантаження зразків, яка відображає цикли роботи трьох варіантів комплектації зразків. Найбільша повнота діаграми одержана на зразках

з пружними елементами та постійними магнітами. При введенні в міжмагнітний зазор магнітної рідини повнота діаграм зменшувалась на 10 %, що може свідчити про відповідність між повнотою діаграми та концентрацією магнетиту в магнітній рідині. Втім, демпфуючі властивості зразків завдяки магнітній рідині покращувались, про що свідчить характер дільниці розвантаження (нижні лінії діаграм).

Динамічні випробування зразків віброзахисту проводились на вібростенді з використанням системи збудження «Продера» та системи зняття, оброби-

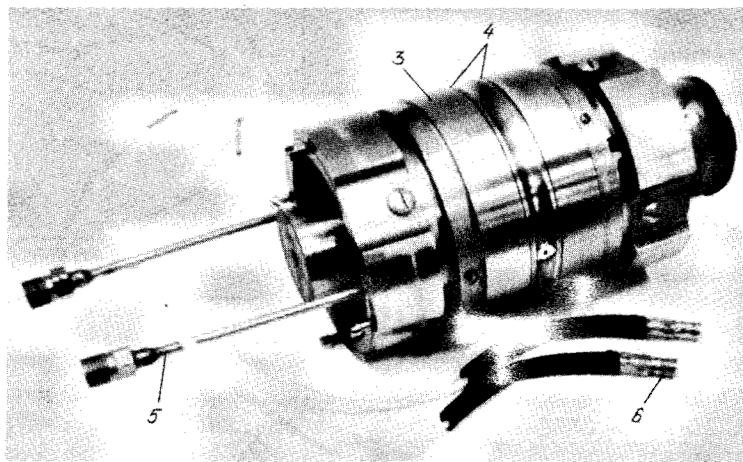
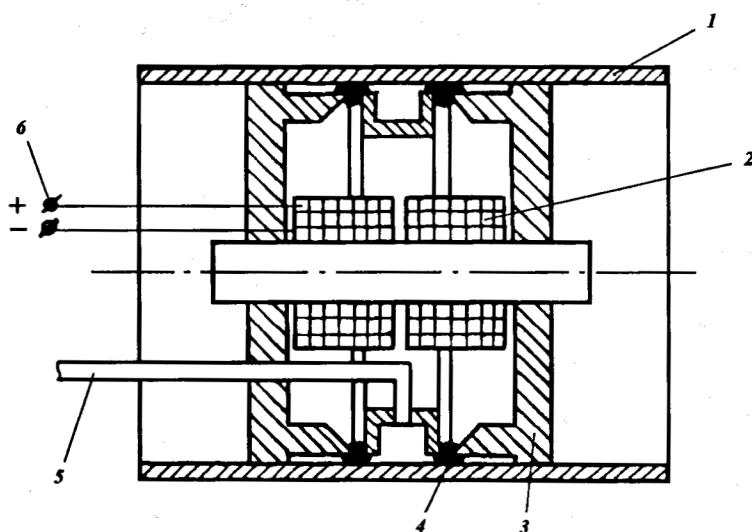


Рис. 5. Базова металева модель магніторідинного герметизатора зворотно-поступального введення традиційної схеми: вгорі — схема будови; внизу — загальний вигляд (1 — циліндр з діамагнітного матеріалу; 2 — котушка електромагніту; 3 — полюсний наконечник; 4 — робочий проміжок з магнітною композицією; 5 — трубопровід для створення надмірного тиску; 6 — штекери підключення котушок електромагніту)

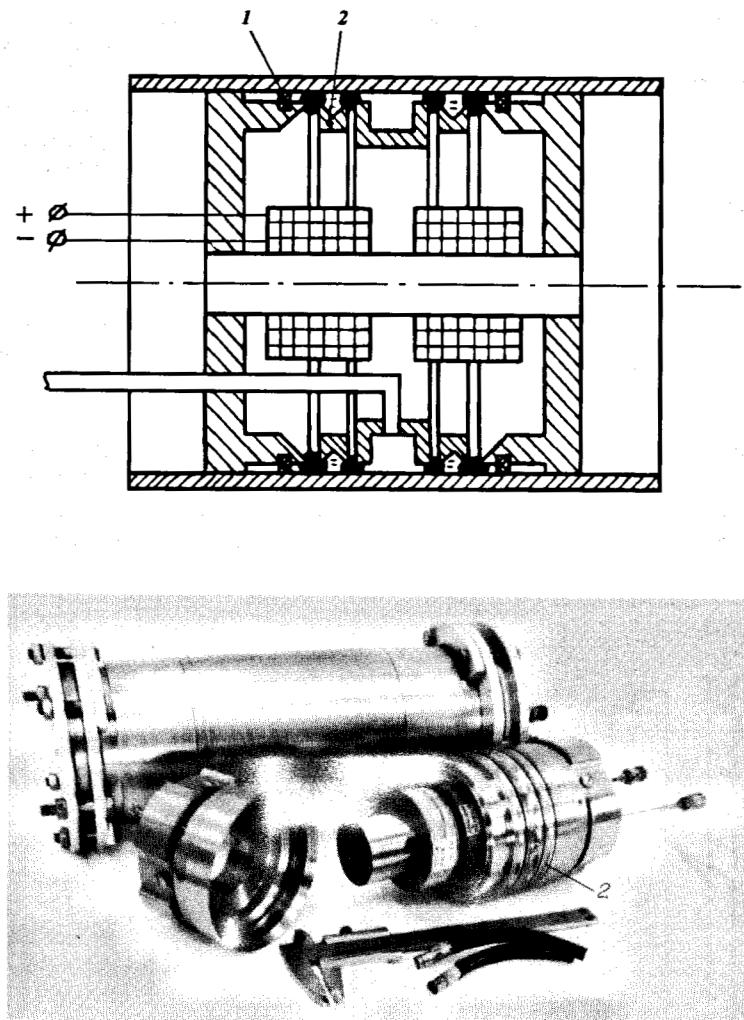


Рис. 6. Модифікована металева модель магніторідинного герметизатора зворотно-поступального введення: вгорі — схема будови; внизу — загальний вигляд (1 — ущільнююче кільце; 2 — прокладка із запасом магнітної композиції)

ки, зберігання і виведення інформації за даними вимірювань давачів «Брюль і К'єр», включно з двоканальним аналізатором 2034. Об'єктом випробувань була система послідовно з'єднаних зразків, яка зазнавала гармонійного впливу вібрації при фіксованих рівнях перевантаження ( $0.1g$ ,  $0.12g$ ,  $0.15g$ ) в діапазонах частот вібрацій 5—30 Гц та вплив випадкової вібрації в діапазоні частот 0—50 Гц. З аналізу одержаних результатів (рис. 4) випливає, що демпфуючі властивості зразків виявляються при об'ємі заправки магнітною рідиною більше ніж 3 мл та максимальні при об'ємі 4—4.5 мл. Для більших об'ємів заправки спостерігається деяке зниження демпфуючих властивостей.

результату виявляється при об'ємі заправки магнітною рідиною більше ніж 3 мл та максимальні при об'ємі 4—4.5 мл. Для більших об'ємів заправки спостерігається деяке зниження демпфуючих властивостей; резонансна частота зразків залежить від кількості заправки та змінюється в діапазоні 7.7—11.3 Гц; найбільш стабільні динамічні властивості виявляються при об'ємі заправки магнітною рідиною близько 4.5 мл і при перевантаженні  $0.15g$ .

Експерименти по з'ясуванню особливостей роботи МР ГВЗ в режимі герметизатора проводились в два етапи. На першому етапі була застосована базова повністю металева модель магніторідинного герметизатора зворотно-поступального введення традиційної схеми (рис. 5), за допомогою якої визначалась можливість використання подібних пристрій для утримання необхідного перепаду тиску в тих випадках, коли ущільнювана поверхня

має дефекти типу подряпин, раковин, місцевих нерівностей. За герметизатор правив електромагніт у вигляді поршня діаметром 95 мм, в кільцевих проміжках якого концентрувалась магнітна композиція (МК), яка правила за ущільнюючі кільця. Дві котушки електромагніту, кожна по 1500 витків, створювали магніторушійну силу величиною 2400 А при максимальному струмі 0.8 А. Різниця магнітних потенціалів між полюсними наконечниками складала близько 500 А. Це дозволяло одержувати напруженість поля близько 850 кА/м в обох кільцевих проміжках завширшки 0.3 мм кожний, що забезпечувало максимальну напруженість близько 500 кА/м на відстані 0.1 мм від полюсних наконечників в радіальному напрямку.

Герметизатор пересувався зі швидкістю 0.01—0.5 м/с в діамагнітному (латунному) циліндрі до-

вжиною 0.3 м. В кільцевій порожнині, обмеженій ущільнюючими кільцями з МК, створювався надмірний тиск. Як МК використовувалась суміш МР С-1-20 з намагніченістю насищення  $M_s = 28 \text{ кA/m}$  і магнітореологічної сусpenзії з  $M_s = 670 \text{ кA/m}$  виробництва СКТБ «Полюс» (Росія, м. Іваново) у співвідношенні 2:1. Максимальний радіальний проміжок між герметизатором та циліндром в різних експериментах змінювався від 0.01 до 0.1 мм, до того ж на внутрішній поверхні циліндра мали місце численні подряпини глибиною до 0.1 мм. Максимальний утримуваний перепад тиску в залежності від умов випробувань досягав 0.1—0.5 МПа.

Дослідженнями встановлено, що суттєвий вплив на герметизуючу спроможність та на тривалість функціонування герметизатора має винесення МК з ущільнюваного проміжку, розхід якої, імовірно, можна оцінити за відомим співвідношенням (Коро-

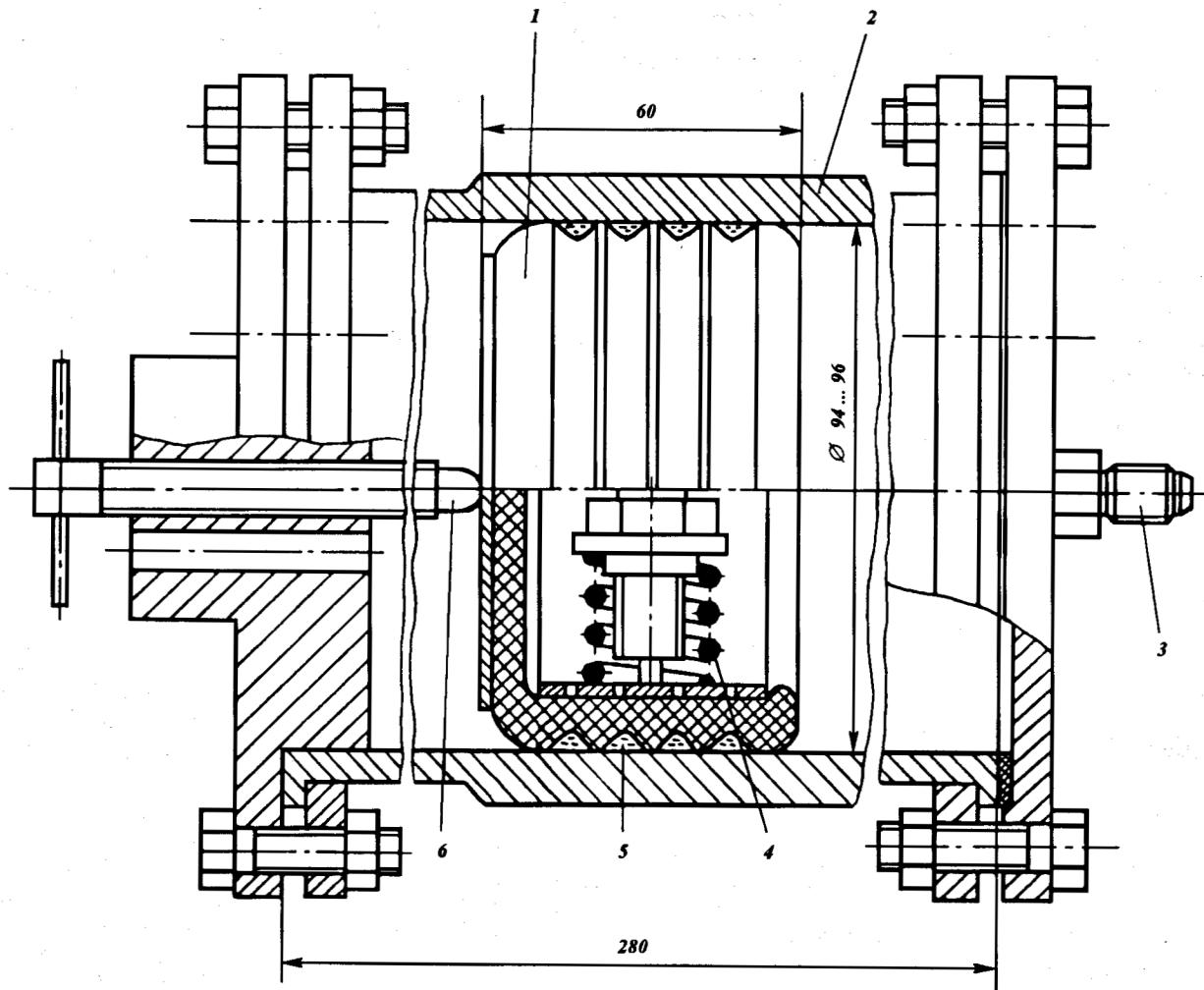


Рис. 7. Адаптивний магнітопсевдорідинний герметизатор на основі еластомагніту (пояснення в тексті)

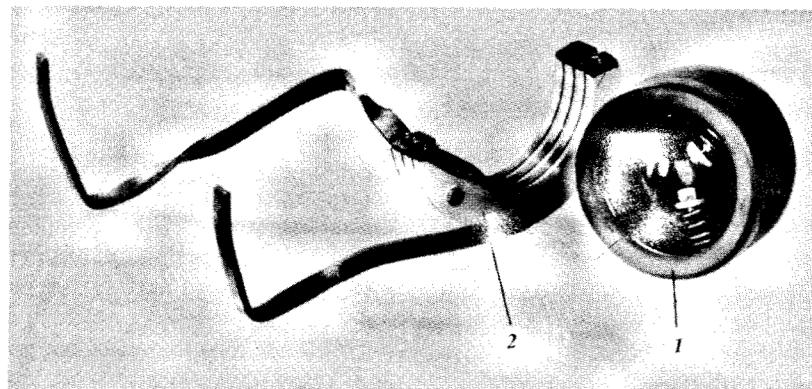


Рис. 8. Поршень з еластомагніту та індуктор для його намагнічення: 1 — поршень; 2 — індуктор

вин, Райхер, 1987).

Втрата герметизуючої спроможності наставала після пересування герметизатора на 50—100 мм, що не суперечить результатам вивчення магніторідинного ущільнення штоку діаметром 5 мм (Баштовой и др., 1991), згідно з якими також відзначалось зниження ущільнюючої спроможності, обумовлене винесенням МР. Втім, в тому експерименті втрата ущільнюючої здатності не спостерігалась, позаяк відгинок штоку довжиною близько 10 мм, по якому пересувалось ущільнення, був покритий шаром винесеної МР.

З метою збільшення довжини робочого ходу герметизатора на базову модель були встановлені ущільнюючі кільця для запобігання винесенню МК, а також кільцеві проставки із запасом МК (рис. 6), яка надходила в ущільнюваний проміжок завдяки неоднорідності магнітного поля у прокладці, градієнт напруженості якого спрямований на цей проміжок. Після такої модифікації втрата герметизуючої здатності спостерігалася після 5—10 циклів зворотно-поступального руху з амплітудою 150—200 мм.

Таким чином, внаслідок першого етапу випробувань виявлено, що при подальшій розробці герметизатора доцільно забезпечити притиснення елементів його магнітної системи до ущільнюваної поверхні (для зменшення винесення МК та мінімізації висоти робочого проміжку магнітної системи), а також ввести підживлення МК для компенсації винесення. Ці нові для магніторідинних герметизаторів поступального руху принципи побудови конструкції були реалізовані на другому етапі досліджень при розробці та випробуваннях адап-

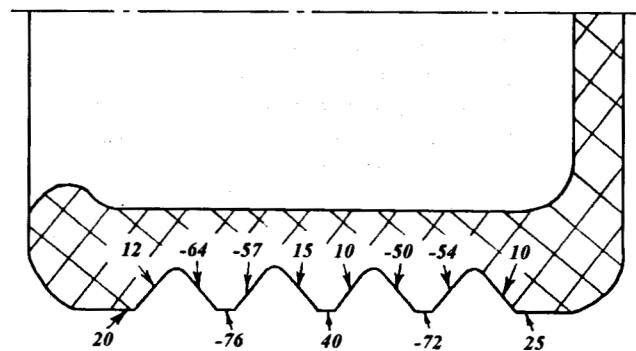


Рис. 9. Розподіл індукції магнітного поля (мТл) на поверхні еластомагнітного поршня

тивного магнітного герметизатора (рис. 7), прототип якого був запропонований для ущільнення валів (Алексеев, Корнев 1987).

Поршень 1, виготовлений з магнітної гуми з максимальною питомою енергією  $1.28 \text{ кДж}/\text{м}^3$ , залишковою індукцією 0.1 Тл, коерцитивною силою по індукції 50 кА/м, вміщувався в циліндр 2, в якому через штуцер 3 за допомогою води створювався надмірний тиск, що притискував стінки поршня до внутрішньої поверхні циліндра (допоміжне, необхідне тільки в початковий період притискання створювалось пружинами 4). Кільцеві віймки 5 на зовнішній поверхні поршня заповнювались МПР виробництва київської фірми «Дисматех» із намагніченістю насичення близько 650 кА/м. Поршень виготовлявся НДІ еластомагнітних матеріалів (Росія, Санкт-Петербург); за магнітотвердий на-

повнівач правив ферит барію, який складав 87 % від загальної маси, а полімерною основою був бутадієннітрильний та ізопреновий каучук.

Намагнічування еластомагнітного поршня здійснювалось імпульсним електричним струмом силою до 3000 А за допомогою індуктора, наведено на рис. 8. Розподіл магнітної індукції по зовнішній поверхні поршня, заміряний мілітесlamіром ЕМЦ 2-21 з датчиком Холла, наведено на рис. 9. Він має виразну симетричну картину, що, імовірно, пояснюється суперпозицією полів, створюваних кожним провідником індуктора окремо. Максимальне значення індукції — близько 0.07 Тл — зафіксовано на поверхні кільцевих виступів (полюсів) ЕМ.

Внутрішня поверхня циліндра, в який вміщувався герметизатор, мала хвилясту форму. Внутрішній діаметр кілька разів змінювався у напрямку по-вздовжної осі від 94 до 96 мм. Внутрішня поверхня мала раковини, вибої, нарости та місцеві нерівності висотою (глибиною) до 0.3 мм.

В процесі експерименту здійснювалось пересування герметизатора вздовж бака під дією надлишкового тиску води зі швидкістю 1—10 мм/с, яка обмежувалась гвинтом б (рис. 7).

Заміряний максимальний утримуваний перепад тиску — 0.55 МПа — суттєво перевищує значення, що очікувалось згідно з відомими формулами (Берковський і др., 1989), які враховують тільки дію магнітних сил в ущільненні. Це, імовірно, пояснюється дією еластичного поршня як гідралічного опору.

Під час досліджень з'ясовано, що втрата ущільнюючої спроможності наставала тільки після практично повного винесення МПР з кільцевих віймок герметизатора при пересуваннях на 200—250 мм, а винесена МПР заповнювала лише западини на внутрішній поверхні циліндра. Відтак, можна вважати, що максимальний робочий хід адаптивного магнітного герметизатора визначається в основному винесенням магнітної речовини, а винесення — чистотою ущільнюваної поверхні.

Експерименти підтвердили дієздатність нового типу герметизаторів зворотно-поступального руху — адаптивних магнітних герметизаторів, а також правильність засад їх побудови.

Наведені моделі герметизаторів, завдяки наявності в конструкціях електромагнітних контурів, постають перспективними пристроями для подальших досліджень раніше виявлених віброэффектів МР, опублікованих останніми роками (Савостянов і др., 1991, Савостянов, 1992). Напевне, викличе зацікавленість визначення сигналів від МР (Савостянов і др., 1991), які виникають при пересуву-

ванні герметизатора усередині циліндра з дефектами внутрішньої поверхні, що при успішному розв'язанні може надати нову перспективу подальшому розвитку магніторідинної дефектоскопії (Майоров, Прохоренко, 1990).

Подібні герметизатори, крім того, можуть бути застосовані для досліджень ефектів магнітомеханічної релаксації в МРС та МР (Савостянов, 1992). Завдяки підживленню МРС електромагнітними імпульсами можна, як свідчать перші результати вивчення цього ефекту, суттєво (на порядок) підвищити ефективність віброзахисту та створити нові системи керованого та адаптивного ГВЗ великоабаритних конструкцій.

Автори вдячні всім, хто сприяв проведенню досліджень, і особливо панам Олександру Римареву та Борису Борисову за ширу допомогу, без якої було б неможливе виготовлення герметизаторів.

Авдуевский В. С. Космическая техника и технология // Гидроаэромеханика и космические исследования. — М.: Наука, 1985.—С. 24—31.

Алексеев А. Г., Корнев А. Е. Магнитные эластомеры. — М.: Химия, 1987.—240 с.

Баштовой В. Г., Дащевич В. С., Краков М. С. и др. Исследование магнитожидкостного герметизатора возвратно-поступательного ввода // Магнитная гидродинамика.—1991.—№ 4.—С. 97—101.

Безвербый В. К., Емец В. В. Повышение эффективности транспортных космических систем путем использования уменьшаемых топливных отсеков // Тр. 1 Междунар. авиакосмич. конф. «Человек-Земля-Космос». — М., 1995.—Т. 2. Крылатые космические системы.—С. 246—258.

Бейнум П. М., Фуксел П. Дж., Макмсон Д. Л. Движение и устойчивость спутника с двойным вращением, снабженного демпферами нутации // Задачи стабилизации составных спутников / Механика. Новое в зарубежной науке. — М.: Мир, 1975.—№ 1.—С. 59—78.

Берковский Б. М., Медведев В. Ф., Краков М. С. Магнитные жидкости. — М.: Химия, 1989.—240 с.

Данилов А. М., Дулькин Л. З., Земляков А. С. и др. Динамика и управление внеатмосферными астрономическими обсерваториями // Управление в пространстве. — М.: Наука, 1976.—Т. 1.—С. 153—171.

Ємець В., Кравцов В. Експериментальні дослідження кріогенних магнітопорошкових герметизаторів для бакових заборників пристрій // Тез. доп. 2 Міжнар. симп. українських інженерів-механіків у Львові. — Львів, 1995.—С. 165.

Коровин А. Г., Райхер Ю. Л. Увлечение магнитной жидкости движущейся границей плоскопаралельного слоя // Магнитная гидродинамика.—1987.—№ 1.—С. 49—52.

Майоров А. Л., Прохоренко П. П. Проектирование магнитных систем ультразвуковых преобразователей с магнитной контактной жидкостью // 13 Рижское совещ. по магнитной гидродинамике. Магнитные жидкости: Тез. докл. — Саласпілс, 1990.—Т. 3.—С. 163—164.

Михалев Ю. О. Классификация и анализ магнитожидкостных уплотнений // Механизация и автоматизация производства. — М.: Машиностроение, 1990.—С. 21—25.

Рулов С. В., Самсонов В. Н., Савостянов А. М., Шмырин Г. К. Управляемые магнитожидкостные виброзоляторы. — М.,

- 1988.—206 с.  
Савостьянов А. М. К выбору проектных параметров уплотнений и виброизоляторов системы подвижных тел летательных аппаратов // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации, 1987 г. — М.: Наука, 1988.—С. 80—84.
- Савостьянов А. М., Ермаков В. Ю., Пронин М. А. Наведение электрического тока в индукторе магнитожидкостного виброизолятора при механических воздействиях // Магнитная гидродинамика.—1991.—№ 1.—С. 107—113.
- Савостьянов А. М. Эффекты магнитомеханической релаксации в магнитореологической суспензии // Магнитная гидродинамика.—1992.—№ 1.—С. 48—54.
- Чегодаев Д. Е., Мальтеев М. А. Виброзащита трубопроводов двигателей космических аппаратов // Тез. докл. 2 Российско-Китайского симп. по космической науке и технике. — Самара, 1992.—С. 39.

## INVESTIGATION OF FRAGMENTS OF A FERROFLUID HERMETIC-VIBRATION PROTECTION DEVICE FOR LARGE-SIZED CONSTRUCTIONS

*O. M. Savostianov, V. V. Yemetz, and V. Yu. Yermakov*

Some design problems in ferrofluid hermetic-vibration protection adapted to surface defects in moving large-sized cylindrical constructions are considered. The results of the experimental investigation of protection fragments are presented. The relations between the damped oscillation logarithmic decrement and ferrofluid volume in the devices are obtained. The tightness and seal working period as functions of ferrofluid entrainment are investigated. The results show that the hermetic-vibration protection, which requires no energy consumption, is an advantageous solution for large constructions.