

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ КАМЕР ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

К.В. Найгерт¹, В.А. Целищев²

¹Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

²Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

Магнитореологические системы демпфирования и виброгашения отличаются адаптивностью, хорошими показателями диссипации ударной и вибрационной нагрузки и незначительными перемещениями поршня под нагрузкой. Исследовательская работа посвящена созданию конструктивных решений в области магнитореологических рабочих камер с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами и их компоновке в гидравлическом демпфирующем оборудовании. В статье представлены два варианта исполнения магнитореологических рабочих камер: магнитореологическая камера с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами и магнитореологическая камера с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, разделенная на субполости. Предложенные конструкции магнитореологических рабочих камер обладают большей энергоэффективностью и стабильностью рабочих процессов. Разработанный способ демпфирования и его конструктивная реализация значительно улучшают динамику рабочего процесса и уменьшают время диссипации ударных и вибрационных нагрузок. Демпфирование в рабочей камере, в случае применения магнитореологической камеры с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, осуществляется за счет нейтрализации ударной волны или изменения скорости ее распространения путем генерации акустической волны. Магнитореологическая камера с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, разделенная на субполости, производит диссипацию механической энергии посредством моделирования характеристик вязкостного трения в объеме магнитореологической среды. Описанные численные модели позволяют производить расчет и проектирование модификаций магнитореологических камер предложенной конструкции. Приведена методика расчета конструктивных параметров магнитореологических камер по значениям коэффициентов, учитывающих частотные характеристики управляющих электромагнитных полей. Результаты численного моделирования иллюстрируют динамику изменения значений вязкостных характеристик в управляющих бегущих электромагнитных полях, по которым формируются значения коэффициентов, учитывающих частотные характеристики управляющих электромагнитных полей.

Ключевые слова: магнитореологические системы, технологии управления рабочей средой, частотные характеристики, управляющие электромагнитные поля.

Введение

В последние годы широкое распространение получили адаптивные системы демпфирования и виброгашения, применяющие в качестве среды магнитореологическую жидкость. Управление диссипативно-жесткостными свойствами в рабочих камерах подобных устройств осуществляется за счет изменения вязкости магнитореологической среды во внешних электромагнитных полях, что позволяет эксплуатировать оборудование в режиме вязкоупругого демпфирования. Наиболее распространенные варианты конструкций представлены в работах [1–6]. Как известно, значительное повышение вязкости магнитореологической жидкости приводит к целому ряду негативных последствий, основные из которых – это высокое энергопотребление и нагрев рабочей среды во внешних полях, приводящий к нестабильности ее характеристик. Магнитореологические камеры могут выступать как самостоятельные устройства диссипации ударных и вибрационных нагрузок, так и в сочетании с иными жидкостными или газовыми рабочими камерами. Поэтому существует потребность инновационного подхода к дальнейшему развитию конструкций магнитореологических рабочих камер адаптивных аппаратов.

Актуальность

Существующие магнитореологические системы не способны удовлетворить многие предъявляемые к ним эксплуатационные требования, имеют некоторые недостатки, но сохраняют в себе

Расчет и конструирование

все преимущества жидкостных элементов, применяемых для диссипации ударных нагрузок. Реализация управления в реальном времени характеристиками гидравлических рабочих камер является дорогостоящим и конструктивно сложно реализуемым процессом. Поэтому совершенствование адаптивных устройств демпфирования и виброгашения, включающих в конструкции магнитореологические рабочие камеры, способствует рационализации процессов защиты оборудования от воздействия динамических нагрузок и сохранению целостности элементов и систем, то есть является актуальным.

Цель исследовательской работы

Создание принципиально новых конструкций магнитореологических рабочих камер, обладающих большей энергоэффективностью и стабильностью течения рабочих процессов, а также разработка методов их численного моделирования.

Конструктивная реализация

Целесообразно выполнение демпфирующих устройств магнитореологических рабочих камер с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами. Наиболее предпочтительные варианты конструктивной реализации распределения диссипативно-жесткостных свойств по объему магнитореологической камеры представлены на рис. 1, 2.

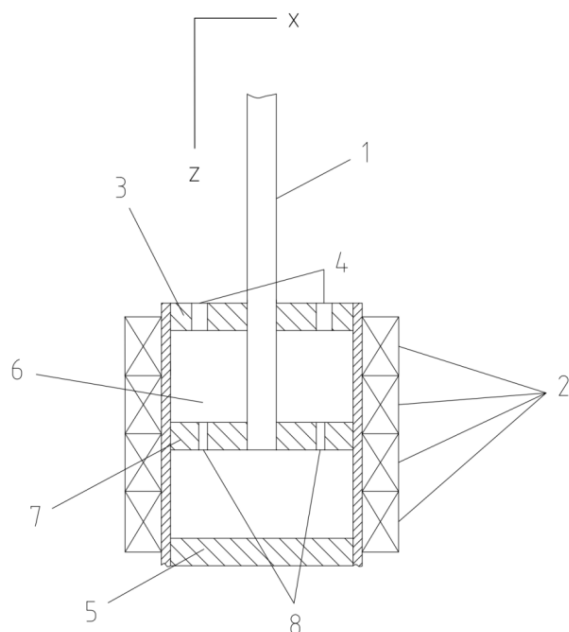


Рис. 1. Магнитореологическая камера с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами: 1 – шток; 2 – серия управляющих электромагнитов; 3 – крышка; 4 – отверстия для включения сливной и напорной линий; 5 – подвижная межполостная перегородка; 6 – рабочая полость; 7 – плунжер; 8 – дросселирующие отверстия

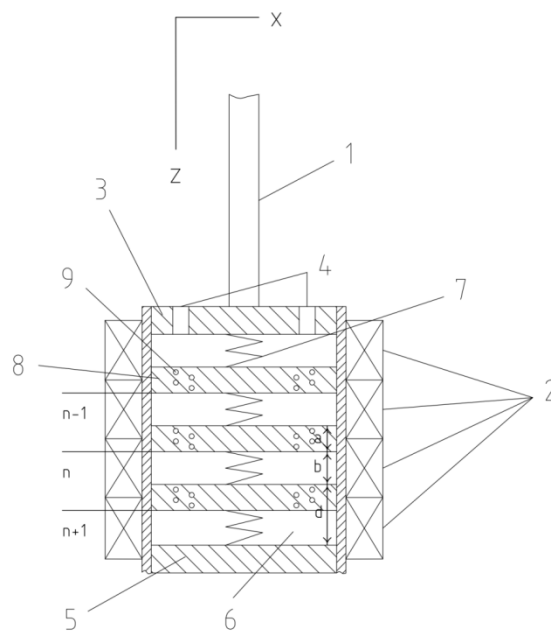


Рис. 2. Магнитореологическая камера с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, разделенная на субполости: 1 – шток; 2 – серия управляющих электромагнитов; 3 – крышка; 4 – отверстия для включения сливной и напорной линий; 5 – подвижная межполостная перегородка; 6 – рабочая субполость; 7 – пружина; 8 – подвижная межполостная перегородка; 9 – спиральный канал

В случае интенсивных ударных нагрузок неравномерность диссипативно-жесткостных свойств по направлению распространения ударных волн осуществляется за счет установки на корпус сборки управляющих электромагнитов, создающих бегущее неоднородное электромагнитное поле посредством последовательной подачи электрического сигнала, с индивидуально заданной вольт-амперной характеристикой, на кольцевые индукторы, установленные каскадом.

Это позволяет моделировать диссипативно-жесткостные свойства в направлении распространения ударной волны как при режиме сжатия амортизатора, так и в режиме отбоя, а также влиять на скорость истечения магнитореологической среды через клапаны, что дает возможность поглощать динамические нагрузки и регулировать скорость перемещения поршня. Предложенная конструкция магнитореологической камеры для управления расходными характеристиками клапанов не требует обязательной интеграции запорно-регулирующих аппаратов в поршень, так как

скорость истечения рабочей среды может изменяться за счет задания объема магнитореологической рабочей среды, находящемуся на пути перемещения поршня, требуемых реологических свойств. Поэтому в данной конструкции возможно вместо клапанов ограничиться выполнением в поршне отверстий нужного диаметра. При выраженных вибрационных воздействиях рационально применять магнитореологическую камеру с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, разделенную на субполости. Установка подвижных перегородок с системой спиральных каналов и пружин, обладающих квазиулевой жесткостью, обеспечивает более эффективную диссипацию вибрационной нагрузки и незначительные перемещения поршня под нагрузкой. Более подробные описания конструкций и рабочих процессов данных устройств приведены в ранее опубликованной работе [7].

Численная модель

Численная модель и принцип работы предложенных устройств базируется на акустических эффектах, протекающих в объемах магнитореологической жидкости, помещенных в бегущие магнитные поля [8–19].

В рамках данной статьи с целью упрощения расчетов объема в полостях и субполостях считаем постоянными и перетечкой жидкости пренебрегаем. Для начала рассмотрим влияние ударных волн на магнитные свойства магнитореологической среды. Исходя из утверждения об ортогональности направлений ударной акустической волны и вектора напряженности и индукции магнитного поля, запишем следующие выражения, описывающие намагниченность магнитореологической среды в рабочей камере устройства:

$$M = M_0 + \delta M,$$

$$i\omega\tau_l \partial M = M_e - M - i\omega\tau_l M \frac{\partial u}{\partial z},$$

где $M_e = M_0 + M_n \cdot \delta\vartheta + M_T \cdot \delta T$,

$$\tau_l = \frac{d(\ln L(\xi))}{d(\ln \xi)}; L(\xi) = cth\xi - \xi^{-1},$$

$$\xi = \mu_0 m_* H / k_0 T; \delta T = q T c^2 C_p^{-1} \rho^{-1} \cdot \delta \rho,$$

$$\frac{\delta\vartheta}{\vartheta} = -\frac{\partial u}{\partial z}; q = -\rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial T},$$

то есть

$$\frac{\delta M}{M_0} = -\left[\left(\vartheta \frac{M_n}{M_0} + \gamma_* \frac{M_T}{M_0} + \omega^2 \tau^2 \right) (1 + \omega^2 \tau^2)^{-1} + i\omega\tau \left(1 - \vartheta \frac{M_n}{M_0} - \gamma_* \frac{M_T}{M_0} \right) (1 + \omega^2 \tau^2)^{-1} \right] \frac{\partial u}{\partial z},$$

где $\gamma_* = q T c^2 C_p^{-1}$, ω – круговая частота колебаний, T – абсолютная температура, τ – время релаксации, τ_l – время продольной релаксации, ρ – плотность, u – смещение из положения равновесия, M_0 – намагниченность в отсутствии ударных волн, M_T – температурный коэффициент намагниченности, M_n – концентрационный коэффициент намагниченности, ϑ – концентрация частиц магнетика, c – скорость распространения волны, q – температурный коэффициент расширения, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, $L(\xi)$ – функция Ланжевена, k_0 – постоянная Больцмана, H – напряженность, μ_0 – магнитная постоянная, m_* – магнитный момент частицы.

Система акустических уравнений для магнитореологической среды примет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div \rho v = 0,$$

$$\rho T \frac{d}{dt} \left(S + \mu_0 \rho^{-1} \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_{\rho, H} dH \right) = \tau_{i,k} \frac{\partial v_i}{\partial z_k} + div (\chi \nabla T),$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} - \nabla(p - M_0 H) + \eta_s \Delta v + \left(\eta_v + \frac{\eta_s}{3} \right) \nabla div v,$$

$$div B = 0; rot H = 0.$$

С учетом уравнения теплопроводности

$$T \delta \left(S + \mu_0 \rho^{-1} \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_{\rho, H} dH \right) = \frac{i\omega\chi}{\rho c^2} \delta T.$$

Уравнение сохранения энергии:

$$i\omega\chi c^{-2} \rho^{-1} \delta T - T \delta \left[\mu_0 \rho^{-1} \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_{\rho, H} dH \right] = C_V \delta T - q T c^2 \rho^{-1} \gamma^{-1} \delta \rho,$$

где t – время, $\tau_{i,k}$ – тензор вязких напряжений, v – скорость, χ – магнитная восприимчивость, p – давление, η_s – сдвиговая вязкость, η_v – объемная вязкость, B – магнитная индукция, S – энтропия, C_V – удельная теплоемкость при постоянном объеме, γ – отношение удельных теплоемкостей.

Расчет и конструирование

Для рабочей камеры с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами опишем следующие численные зависимости. Влияние бегущего управляющего поля на скорость распространения ударной волны представим в виде

$$H^2 = H^{*2} + 2H^*H_a \operatorname{ch} kx \sin(kz - \omega t) + H_a^2 [sh^2 kx + \sin^2(kz - \omega t)],$$

$$v_z = \frac{(A_H/\rho)\omega/k}{(\omega/k)^2 - c_f^2} \cos 2(kz - \omega t) - \frac{4A_H H^* k}{\rho H_a \omega} \operatorname{ch} kx \sin(kz - \omega t),$$

$$v_x = \frac{4A_H H^* k}{\rho H_a \omega} \operatorname{ch} kx \cos(kz - \omega t),$$

$$H_a = \frac{B_0}{\mu_0(1+\chi)shkl}; A_H = \mu_0 \chi H_a^2 / 4.$$

Для случая без постоянной составляющей напряженности по оси x , то есть если напряженность выражена как

$$H^2 = H_a^2 [sh^2 kx + \sin^2(kz - \omega t)],$$

справедливо следующее:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -c_f^2 \nabla \rho' + \frac{1}{2} \mu_0 \chi \nabla H^2 + \nabla \eta \Delta v + \nabla \left(\eta_v + \frac{\eta_s}{3} \right) \nabla (\nabla v),$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho \operatorname{div} v = 0,$$

$$v_z = v_{za} \cos[2(kz - \omega t) + \varphi_{vz}]; v_{za} = \frac{(A_m/\rho) \cdot \omega/k}{\left([c_f^2 - (\omega/k)^2]^2 + 4\omega^2 b_m^2 \right)^{1/2}},$$

$$A_m = \mu_0 \chi H_a^2 / 4; b_m = [\eta_v + (4/3)\eta_s] / \rho; \operatorname{tg} \varphi_{vz} = \frac{2b_m \omega}{c_f^2 - (\omega/k)^2},$$

$$\eta_s(H) = \left(\frac{\tau_{sh}}{\dot{\gamma}_v} + \eta_v \right) + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau_n M(H)}{(1 + (\tau_n \tau_s M(H))/J)},$$

где H^* – постоянная составляющая напряженности, k – волновой вектор, c_f – скорость звука в магнитогеологической среде, l – высота объема магнитогеологической среды в рабочей камере, φ_{vz} – разность фаз, τ_{sh} – сдвиговое напряжение, J – суммарный момент инерции частиц, τ_n ; τ_s – времена релаксации немагнитных и магнитных частиц, $\dot{\gamma}_v$ – градиент скорости, нормален к направлению движения. При рассмотрении камеры с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, разделенной на субполости, справедливы следующие выражения. Давление в сегменте:

$$\Delta p_n = \delta p_n - \delta p_{n+1}; F_n = S_c \Delta p_n.$$

С учетом процесса ударного сжатия немагнитных перегородок:

$$A_w = p \Delta V; p = \frac{A_w}{\Delta V}; p = \frac{A_w}{\Delta(S_c a)}.$$

Принимая во внимание крайне малые значения деформации немагнитных перегородок при рабочих давлениях, примем значение работы постоянной:

$$A_w = \operatorname{const}; \delta p = -\frac{p_0}{a} \cdot \delta a,$$

$$\delta p_n = -\frac{p_0}{a} (U_n - U_{n-1}); \delta p_{n+1} = -\frac{p_0}{a} (U_{n+1} - U_n).$$

Давление в рассматриваемом сегменте:

$$\Delta p_n = -\frac{p_0}{a} (U_n - U_{n-1} - U_{n+1} + U_n) = \frac{p_0}{a} (U_{n-1} + U_{n+1} - 2U_n),$$

$$F_n = K_e (U_{n-1} + U_{n+1} - 2U_n); \rho_f S_c b \frac{d^2 U_n}{dt^2} = K_e (U_{n-1} + U_{n+1} - 2U_n),$$

$$K_e = \frac{p_0 S_c}{a}; U = U_0 \cos(\omega t - k_w z),$$

смещение из положения равновесия рассматриваемого сегмента

$$U_n = U_0 \cos(\omega t - nq),$$

с учетом внешних управляющих полей перепишем как

$$\rho_f S_c b \frac{d^2 U_n}{dt^2} = S_c \frac{p_0}{a} (U_{n-1} + U_{n+1} - 2U_n) - 2\mu_0 S_c M_z \left(\frac{\partial H_z}{\partial z} + \frac{\partial M_z}{\partial z} \right) U_n$$

или перепишем как

$$\frac{d^2 U_n}{dt^2} + \omega_m^2 U_n = \chi' (U_{n-1} + U_{n+1} - 2U_n),$$

$$\omega_m = \sqrt{\frac{2\mu_0 M_z}{\rho_f b} \left(\frac{\partial H_z}{\partial z} + \frac{\partial M_z}{\partial z} \right)}; \chi' = \rho_b c^2 / \frac{\eta}{v} ab.$$

Для бегущей волны

$$U_n = A \exp i(\omega t - nk_w d); \omega^2 = \omega_m^2 + 4\chi' \sin^2 \frac{k_w d}{2},$$

где K_e – коэффициент упругости, p_0 – давление перегородки, S_c – площадь сечения, b – высота магнитореологической субкамеры, d – период идентичности, F_n – действующая на субполость сила, a – высота перегородки, $U_{n-1}; U_{n+1}; U_n; U$ – смещения сегментов, ρ_b – плотность перегородки, ρ_f – плотность магнитореологической среды, A – амплитуда, k_w – волновое число, n – номер сегмента, ν – кинематическая вязкость. Теперь найдем значение магнитной силы в рабочих объемах магнитореологической жидкости. Осовая составляющая магнитной силы:

$$f_z = 2\pi\mu_0 \int_{z_1+\Delta z}^{z_2+\Delta z} M_z \frac{\partial H_z}{\partial z} r dr dz,$$

$$f_z = \mu_0 S_c \int_{z_1}^{z_2} M_z \frac{\partial H_z}{\partial z} dz + \mu_0 S_c \int_{z_2}^{z_2+\Delta z} M_z \frac{\partial H_z}{\partial z} dz - \mu_0 S_c \int_{z_1}^{z_1+\Delta z} M_z \frac{\partial H_z}{\partial z} dz.$$

Поэтому сила, возвращающая объем магнитореологической жидкости, находящейся в субполости:

$$\Delta f_z = \mu_0 S_c \left(\int_{z_2}^{z_2+\Delta z} M_z \frac{\partial H_z}{\partial z} dz - \int_{z_1}^{z_1+\Delta z} M_z \frac{\partial H_z}{\partial z} dz \right).$$

Принимая симметричность $H_z(z)$; $M_z(z)$ относительно $z = 0$:

$$M \frac{\partial H}{\partial z} \Big|_{z_1} = -M \frac{\partial H}{\partial z} \Big|_{z_2} - 2 \left[M \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + 2 \frac{\partial M}{\partial z} \frac{\partial H}{\partial z} \right] \Big|_{z_2} \delta z,$$

$$\Delta f_z = 2\mu_0 S_c \left\{ M \frac{\partial H}{\partial z} + \left[M \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + 2 \frac{\partial M}{\partial z} \frac{\partial H}{\partial z} \right] \delta z \right\}_{z_2} \Delta z.$$

Магнитная сила:

$$\Delta f_m = 2\mu_0 S_c \left\{ M \left(\frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\partial M}{\partial z} \right) + \left[M \left(\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) + 2 \frac{\partial M}{\partial z} \left(\frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\partial M}{\partial z} \right) \right] \delta z \right\}_{z_2} \Delta z.$$

Коэффициент пондеромоторной упругости:

$$k_p = 2\mu_0 S_c \left\{ M \left(\frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\partial M}{\partial z} \right) + \left[M \left(\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) + 2 \frac{\partial M}{\partial z} \left(\frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\partial M}{\partial z} \right) \right] \delta z \right\}_{z_2}.$$

Принимая во внимание преобладания значений диаметра магнитореологической субполости над ее высотой, справедливо следующее:

$$\Delta f_z = k_p^{(0)} \Delta z + K (\Delta z)^2,$$

уравнение колебаний:

$$\frac{\eta}{\nu} V \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial u}{\partial t} + k_p^{(0)} u + K u^2 = 0,$$

уравнение колебаний с учетом затухания:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \omega_0^2 u + b_u u^2 + 2\beta \frac{\partial u}{\partial t} = 0,$$

где $b_u = -\frac{2\mu_0 S_c}{\eta V} \left[M \left(\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) + 2 \frac{\partial M}{\partial z} \left(\frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\partial M}{\partial z} \right) \right]_{z_2}$,

$$k_p^{(0)} = k_p / \left(1 + \left[\frac{\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2}}{\frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\partial M}{\partial z}} + \frac{2}{M} \frac{\partial M}{\partial z} \right]_{z_2} \delta z \right),$$

$$K = 2\mu_0 S_c \left[M_z \left(\frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 M_z}{\partial z^2} \right) + 2 \frac{\partial M_z}{\partial z} \left(\frac{\partial H_z}{\partial z} + \frac{\partial M_z}{\partial z} \right) \right]_{z_2}.$$

Приведенные системы уравнений позволяют описывать процессы распространения ударных и вибрационных нагрузок в магнитореологических рабочих камерах разработанных оригинальных конструкций.

Методика расчета

На основе описанных выше численных моделей определяются рациональные частотные и вязкостные параметры для магнитореологических рабочих камер.

Требуемые параметры вязкости магнитореологической жидкости определяются путем рационализации процессов диссипации распространения ударных и вибрационных волн в рабочей среде, что реализуется за счет варьирования значений коэффициентов b_m для камеры с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами и b_u – для камеры с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, разделенной на субполости. При определении значений коэффициентов b_m , b_u учитываются частотные характеристики управляющих электромагнитных полей. В процессе определения оптимальной частоты управляющего электромагнитного поля необходимо учитывать:

Расчет и конструирование

- бегущее магнитное поле способно в объеме намагничивающейся магнито-реологической жидкости возбуждать продольные звуковые волны, частота которых в два раза превосходит частоту внешнего поля, что позволяет генерировать волны, совпадающие с волнами от ударных и вибрационных нагрузок, но находящимися с ними в противофазе;

- совпадение скорости ударных и вибрационных волн и скорости бегущего поля приводит к резонансу.

По полученным значениям b_m , b_u рационализируются вязкостные характеристики магнито-реологической среды, способные обеспечить предпочтительные режимы демпфирования или виброгашения. В случае рабочей камеры с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, разделенной на субполости, вязкость объема магнито-реологической среды определяется индивидуально и последовательно для каждого сегмента, с учетом результатов расчета давления, осевой составляющей магнитной силы и коэффициента пондеромоторной упругости для предыдущего сегмента.

Численный эксперимент

Произведем численный эксперимент для магнито-реологической камеры с неравномерно-распределенными диссипативно-жесткостными свойствами. Как известно, на динамику распространения акустических волн в жидкой среде основное влияние оказывают значения их плотности, то есть вязкости, поэтому главным критерием моделирования выберем вязкостные характеристики сред. Значения вязкости магнито-реологической жидкости являются функцией напряженности магнитного поля и имеют аналогичную динамику и схожий характер изменения значений во времени (рис. 3, 4). Результаты моделирования вязкости магнито-реологической жидкости в бегущем управляющем поле представлены на рис. 4. По полученным расчетным значениям вязкостных характеристик определяются значения коэффициента b_m на заданном временном интервале (рис. 5). Искомые значения коэффициента b_m формируют амплитуду скорости, следовательно, и скоростные характеристики процесса распространения ударных волн (рис. 6, 7).

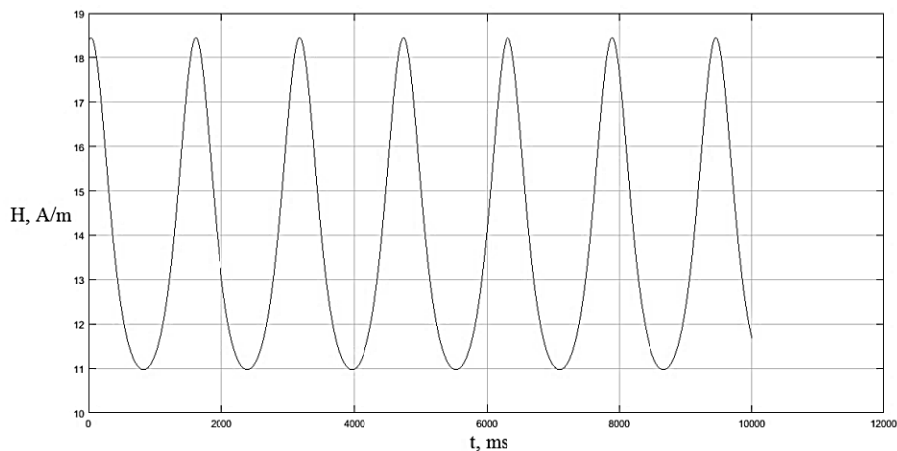


Рис. 3. Напряженность управляющего поля

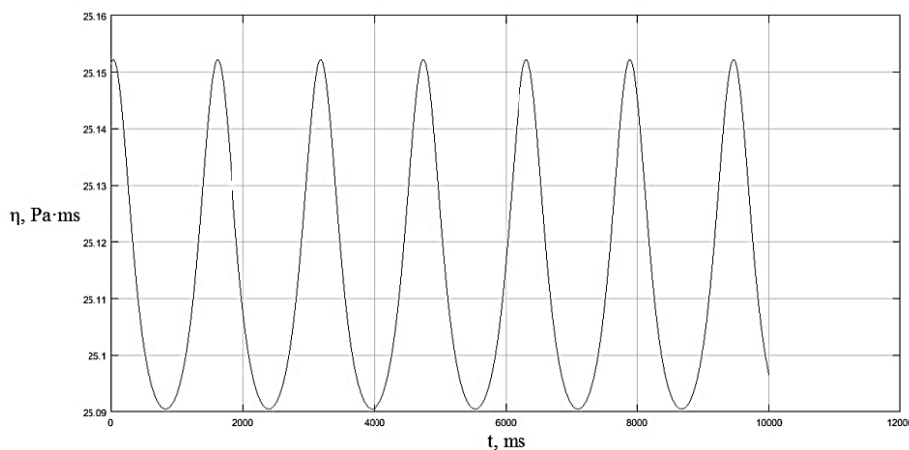


Рис. 4. Динамика изменения показателя вязкости в бегущем управляющем поле

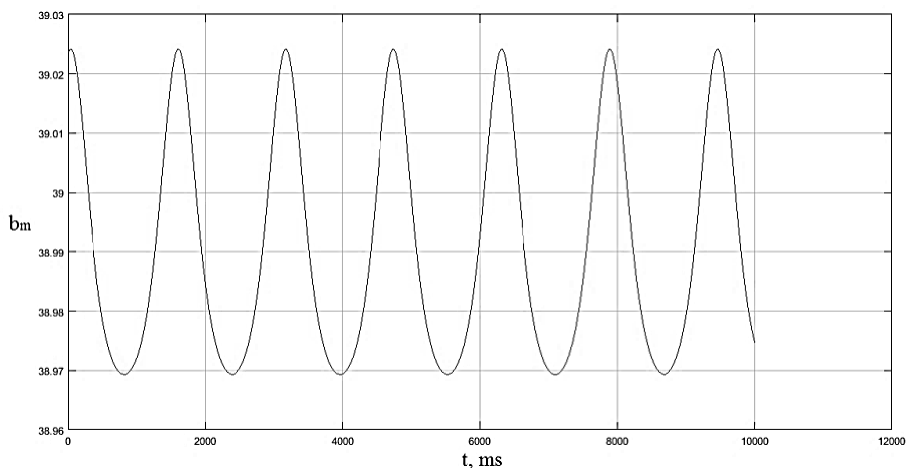


Рис. 5. Динамика изменения значений коэффициента b_m в бегущем управляющем поле

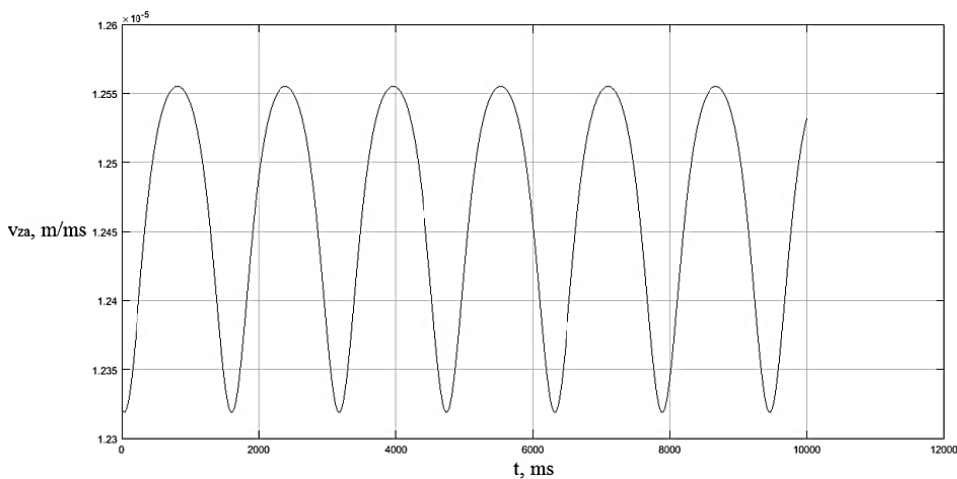


Рис. 6. Амплитуда скорости распространения акустической волны

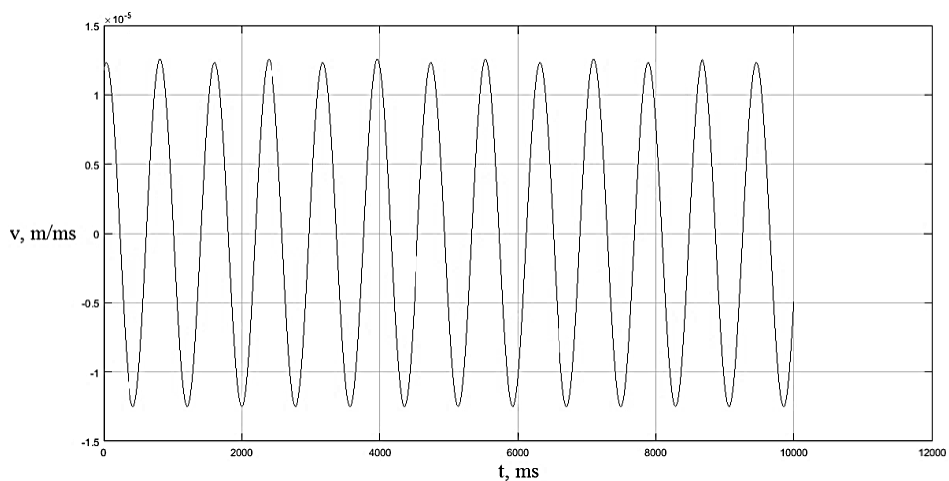


Рис. 7. Скорость распространения акустической волны

На рис. 7 видно периодичную смену направления вектора скорости, приводящую к торможению акустической волны в некоторые моменты времени при падении значений напряженности управляющего поля. Также очевидно, что генерирование акустической волны в противофазе к ударной волне позволит компенсировать вибрацию и полностью нейтрализовать распространение ударных нагрузок в объеме магнитогеологической рабочей среды.

Методика расчета конструктивных параметров

Инженерный подход к определению геометрических параметров рабочих камер достаточно прост. По заданным значениям предельно возможного повышения вязкости магнитореологической среды и с учетом предполагаемого диапазона ударных или вибрационных нагрузок, а также исходя из рациональных значений l высоты объема магнитореологической среды в рабочей камере и b высоты магнитореологической среды в субкамере, определяются оптимальные для гашения ударной волны значения радиальных размеров рабочих объемов магнитореологических камер. Для монолитного рабочего объема магнитореологической жидкости определяются конечные значения высоты, исходя из требуемой толщины слоя, для диссипации энергии ударной волны, при заданной максимальной вязкости. Поэтому ее высота должна быть не меньше значения l высоты объема магнитореологической среды. При разделении рабочего объема магнитореологической жидкости на субполости по результатам произведенного индивидуального расчета диссипации энергии вибрационной нагрузки для каждой субполости последовательно, задав параметры динамического воздействия с учетом поглощения части энергии в предыдущих субполостях и определив необходимое количество субполостей, при заданной максимальной вязкости магнитореологической среды значение высоты объема субполости принимается равным расчетному значению b высоты объема магнитореологической среды. Примем следующие обозначения: $l = z$; $b = z$. Зададим изменение горизонтальных составляющих волны как [20]:

$$\frac{dx}{dz} = \frac{\partial \omega / \partial k_r}{\partial \omega / \partial m}; \quad \frac{dy}{dz} = \frac{\partial \omega / \partial l_r}{\partial \omega / \partial m}.$$

Тогда справедливо следующее:

$$x = x_0 + \int_{z_0}^z \left(\frac{\partial \omega / \partial k_r}{\partial \omega / \partial m} \right) dz; \quad y = y_0 + \int_{z_0}^z \left(\frac{\partial \omega / \partial l_r}{\partial \omega / \partial m} \right) dz,$$

где k_r, l_r – горизонтальные составляющие волнового вектора, m – продольная составляющая волнового вектора.

Оптимальные параметры радиальных размеров рабочих магнитореологических камер задаются, основываясь на полученных значениях x, y , которые принимаются равными наибольшим значениям из x, y или превосходящими их.

Новизна

Разработаны варианты конструкции магнитореологической камеры гидравлического аппарата, отличающиеся от ранее известных тем, что рабочий процесс устройства заключается в создании в магнитореологических рабочих камерах неравномерно распределенных диссипативно-жесткостных свойств. Разработаны методологические основы численного моделирования представленного в работе запатентованного магнитореологического устройства, отличающиеся тем, что способны производить оценку характеристик устройств, имеющих предложенные инновационные варианты конструкций магнитореологических рабочих камер, рабочие процессы которых базируются на оригинальных методах управления их адаптивными диссипативно-жесткостными свойствами.

Выводы

Разработан метод повышения эффективности процессов демпфирования и виброгашения за счет создания распределенных диссипативно-жесткостных свойств в магнитореологических рабочих камерах. Разработаны варианты конструктивной реализации оригинального метода демпфирования и виброгашения, в результате чего созданы конструкции камеры с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами и камеры с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, разделенной на субполости. Численный эксперимент подтверждает эффективность предложенных конструктивных решений.

Литература

1. Пат. РФ № 2145394. Магнитожидкостное устройство для гашения колебаний / В.Н. Бурченков и др. – Оpubл. 10.02.2000, Бюл. № 4.
2. Пат. РФ № 2449188. Регулируемый магнитореологический пневматический амортизатор / А.Б. Корчагин и др. – Оpubл. 27.04.2012, Бюл. № 12.
3. Пат. РФ № 2232316 Магнитореологический амортизатор / Е.П. Гусев и др. – Оpubл. 27.10.2003, Бюл. № 30.

4. Пат. РФ № 2106551. Магнито-реологический виброгаситель / Ю.Б. Кудряков и др. – Оpubл. 10.03.1998.
5. Пат. РФ № 2354867. Динамический гаситель / И.А. Яманин и др. – Оpubл. 10.05.2009, Бюл. № 13.
6. Пат. РФ № 2561610. Магнито-реологический амортизатор / Б.А. Гордеев и др. – Оpubл. 27.08.2015, Бюл. № 24.
7. Пат. РФ № 175044. Адаптивный комбинированный реологический амортизатор / К.В. Найгерт, В.Т. Тутынин. – Оpubл. 20.11.2017, Бюл. № 32.
8. Полуниин, В.М. Акустические свойства нанодисперсных магнитных жидкостей / В.М. Полуниин – М.: Физматлит, 2012. – 383 с.
9. Такетоми, С. Магнитные жидкости / С. Такетоми, С. Тикадзуми. – М.: Мир, 1993. – 272 с.
10. New Composite Elastomers with Giant Magnetic Response / A.V. Chertovich, G.V. Stepanov, E.Y. Kramarenko, A.R. Khokhlov // *Macromolecular Materials and Engineering*. – 2010. – Vol. 295, no. 4. – P. 336–341. DOI: 10.1002/mame.200900301
11. Brigadnov, I.A. Mathematical Modeling of Magneto-Sensitive Elastomers / I.A. Brigadnov, A. Dorfmann // *Int. J. Solid. Struct.* – 2003. – Vol. 40. – P. 4659–4674. DOI: 10.1016/S0020-7683(03)00265-8
12. Magnetic and Viscoelastic Response of Elastomers with Hard Magnetic Filler / E.Y. Kramarenko, A.V. Chertovich, G.V. Stepanov et al. // *Smart Materials and Structures*. – 2015. – Vol. 24. – P. 035002. DOI: 10.1088/0964-1726/24/3/035002
13. Stepanov, G.V. Magnetorheological and Deformation Properties of Magnetically Controlled Elastomer with Hard Magnetic Filler / G.V. Stepanov, A.V. Chertovich, E.Y. Kramarenko // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2012. – Vol. 324. – P. 3448–3451. DOI: 10.1016/j.jmmm.2012.02.062
14. Dorfmann, A. Nonlinear Magnetoelastic Deformations / A. Dorfmann, R.W. Ogden // *Q.J. Mech. Appl. Math.* – 2004. – Vol. 57 (4). – P. 599–622. DOI: 10.1093/qjmath/57.4.599
15. Bustamante, R. On Variational Formulations in Nonlinear Magnetoelastostatics / R. Bustamante, A. Dorfmann, R.W. Ogden // *Math. Mech. Solids*. – 2008. – Vol. 13. – P. 725. DOI: 10.1177/1081286507079832v1
16. Filipcsei, G. Magnetodeformation Effects and the Swelling of Ferrogels in a Uniform Magnetic Field / G. Filipcsei, M. Zrinyi // *J. Phys. Condens.* – 2010. – Matter 22. – P. 276001. DOI: 10.1088/0953-8984/22/27/276001
17. Bustamante, R. A Nonlinear Magnetoelastic Tube under Extension and Inflation in an Axial Magnetic Field: Numerical Solution / R. Bustamante, A. Dorfmann, R.W. Ogden // *J. Eng. Math.* – 2007. – Vol. 59. – P. 139–153. DOI: 10.1007/s10665-006-9088-4
18. Material Transport of a Magnetizable Fluid by Surface Perturbation / V. Bohm, V.A. Naletova, J. Popp et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2015. – Vol. 395. – P. 67–72. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.07.036
19. Carlson, J.D. MR Fluid, Foam and Elastomer Devices / J.D. Carlson, M.R. Jolly // *Mechatronics*. – 2000. – Vol. 10. – P. 555–569. DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00064-1
20. Архипов, В.Н. и др. Механическое действие ядерного взрыва / В.Н. Архипов и др. – М.: Физматлит, 2003. – 384 с.

Найгерт Катарина Валерьевна, кандидат технических наук, докторант кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, kathy_naigert@mail.ru.

Целищев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная гидромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, pgl.ugatu@mail.ru.

Поступила в редакцию 21 февраля 2019 г.

CALCULATION AND DESIGN OF MAGNETORHEOLOGICAL CHAMBERS FOR HYDRAULIC EQUIPMENT

K.V. Naigert¹, kathy_naigert@mail.ru,
V.A. Tselischev², pgl.ugatu@mail.ru

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

²Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

Magnetorheological damping and vibration-absorbing systems are characterized by adaptability, good dissipation of shock and vibration load, and minor plunger movements under loads. The research is devoted to constructive solutions for magnetorheological working chambers with inhomogeneously distributed dissipative stiffness properties, and their layout in hydraulic damping equipment. The paper presents two types of magnetorheological working chambers: magnetorheological chamber with inhomogeneously distributed dissipative stiffness properties; and magnetorheological chamber with inhomogeneously distributed dissipative stiffness properties that is divided into subcavities. The proposed magnetorheological working chambers have higher energy efficiency and workflow stability. The developed damping method and its constructive implementation significantly improve the dynamics of workflow and reduce the dissipation time of shock and vibration loads. In a magnetorheological chamber with inhomogeneously distributed dissipative stiffness properties, damping is carried out by neutralizing the shock wave and by generating an acoustic wave to change its propagation velocity. The magnetorheological chamber with inhomogeneously distributed dissipative stiffness properties and subcavities dissipates mechanical energy by modeling viscous friction characteristics in the volume of magnetorheological fluid. The described numerical models make it possible to calculate and design modifications of the proposed magnetorheological working chambers. We proposed a method for calculating the design parameters of magnetorheological working chambers; it is based on values of the coefficients that take into account the frequency characteristics of control electromagnetic fields. The results of numerical simulation illustrate the dynamics of changes of viscosity characteristics in control electromagnetic fields and values of the coefficients that take into account the frequency characteristics of control electromagnetic fields.

Keywords: magnetorheological systems, technologies of working fluid control, frequency characteristics, control electromagnetic fields.

References

1. Burchenkov V.N. et al. *Magnitozhidkostnoye ustroystvo dlya gasheniya kolebaniy* [MR Device for Vibration Damping]. RU Patent, no. 2145394, 2000.
2. Korchagin A.B. et al. *Reguliruyemyy magnitoreologicheskyy pnevmaticheskyy amortizator* [Adjustable Magnetorheological Pneumatic Damper]. RU Patent, no. 2449188, 2012.
3. Gusev E.P. et al. *Magnitoreologicheskyy amortizator* [MR Shock Absorber]. RU Patent, no. 2232316, 2003.
4. Kudryakov Yu.B. et al. *Magnitoreologicheskyy vibrogasitel'* [MR Vibration Damper]. RU Patent, no. 2106551, 1998.
5. Yamanin I.A. et al. *Dinamicheskyy gasitel'* [Dynamic Absorber]. RU Patent, no. 2354867, 2009.
6. Gordeev B.A. et al. *Magnitoreologicheskyy amortizator* [MR Damper]. RU Patent, no. 2561610, 2015.
7. Naigert K.V., Tutynin V.T. *Adaptivnyy kombinirovannyi reologicheskyy amortizator* [The Adaptive Combined Rheological Damper]. RU Patent, no. 175044, 2017.
8. Polunin V.M. *Akusticheskiye svoystva nanodispersnykh magnitnykh zhidkostey* [Acoustic Properties of Nanodispersed Magnetic Fluids]. Moscow: Publishing House. Fizmatlit, 2012. 383 p.
9. Taketomi S., Tikadzumi S. *Magnitnyye zhidkosti* [The Magnetic Fluids]. Moscow: Mir Publ., 1993. 272 p.

10. Chertovich A.V., Stepanov G.V., Kramarenko E.Y., Khokhlov A.R. New Composite Elastomers with Giant Magnetic Response. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2010, vol. 295, no. 4, pp. 336–341. DOI: 10.1002/mame.200900301
11. Brigadnov I.A., Dorfmann A. Mathematical Modeling of Magneto-Sensitive Elastomers. *Int. J. Solid. Struct.*, 2003, vol. 40, pp. 4659–4674. DOI: 10.1016/S0020-7683(03)00265-8
12. Kramarenko E.Y., Chertovich A.V., Stepanov G.V. et al. Magnetic and Viscoelastic Response of Elastomers with Hard Magnetic Filler. *Smart Materials and Structures*, 2015, vol. 24, p. 035002. DOI: 10.1088/0964-1726/24/3/035002
13. Stepanov G.V., Chertovich A.V., Kramarenko E.Y. Magnetorheological and Deformation Properties of Magnetically Controlled Elastomer with Hard Magnetic Filler. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, vol. 324, pp. 3448–3451. DOI: 10.1016/j.jmmm.2012.02.062
14. Dorfmann A., Ogden R.W. Nonlinear Magnetoelastic Deformations. *Q. J. Mech. Appl. Math.*, 2004, vol. 57 (4), pp. 599–622. DOI: 10.1093/qjmam/57.4.599
15. Bustamante R., Dorfmann A., Ogden R.W. On Variational Formulations in Nonlinear Magnetoelastostatics. *Math. Mech. Solids*, 2008, vol. 13, p. 725. DOI: 10.1177/1081286507079832v1
16. Filipcsei G., Zrínyi M. Magnetodeformation Effects and the Swelling of Ferrogels in a Uniform Magnetic Field. *J. Phys. Condens.*, 2010, Matter 22, p. 276001. DOI: 10.1088/0953-8984/22/27/276001
17. Bustamante R., Dorfmann A., Ogden R.W. A Nonlinear Magnetoelastic Tube under Extension and Inflation in an Axial Magnetic Field: Numerical Solution. *J. Eng. Math.*, 2007, vol. 59, pp. 139–153. DOI: 10.1007/s10665-006-9088-4
18. Bohm V., Naletova V.A., Popp J. et al. Material Transport of a Magnetizable Fluid by Surface Perturbation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, vol. 395, pp. 67–72. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.07.036
19. Carlson J.D., Jolly M.R. MR Fluid, Foam and Elastomer Devices. *Mechatronics*, 2000, vol. 10, pp. 555–569. DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00064-1
20. Arkhipov V.N. et al. *Mekhanicheskoye deystviye yadernogo vzryva* [Mechanical Action of a Nuclear Explosion]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2003. 384 p.

Received 21 February 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Найгерт, К.В. Расчет и проектирование магнито-реологических камер гидравлического оборудования / К.В. Найгерт, В.А. Целищев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 55–65. DOI: 10.14529/engin190205

FOR CITATION

Naigert K.V., Tselischev V.A. Calculation and Design of Magnetorheological Chambers for Hydraulic Equipment. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 55–65. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin190205
