Расчетный анализ силовой характеристики электромеханического магнитоэластического демпфера¹

Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, С.А. Нестеров
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация,
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Электромеханические магнитоэластические демпферы начинают находить практическое применение в транспортных средствах, автомобилях, технологических установках. Существующие методики расчета демпферов на классических жидкостях для электромеханических магнитоэластических демпферов не учитывают магнитоэластические свойства магнитной жидкости, влияние управляемого магнитного поля на вязкость магнитной жидкости, особенности диссипации энергии колебаний. Используемые в настоящее время методики основаны на описании магнитной жидкости моделями без учета начального участка реологической кривой магнитной жидкости, что дает неверные результаты при малых градиентах течения магнитной жидкости. В связи с этим необходимо разработать корректную методику расчета силовой характеристики электромеханического магнитоэластического демпфера и провести расчетный анализ его силовой характеристики.

Материалы и методы: Исследования проведены на основе теории магнитоэластической реологии не ньютоновских жидкостей, электромагнитного поля, анализа диссипации энергии колебаний, расчетного анализа протекающих процессов.

Результаты: Разработана методика аналитического расчетного анализа, основанная на разбиении магнитоэластической кривой магнитной жидкости на два участка с различными вязкостями, что позволяет проводить расчеты при разных градиентах сдвигового течения магнитной жидкости в зазоре электромеханического магнитоэластического демпфера. Предложен оригинальный алгоритм расчета силовой характеристики электромеханического магнитоэластического демпфера с учетом нелинейности магнитоэластических свойств магнитной жидкости. Дан анализ влияния параметров магнитной жидкости и индукции магнитного поля на силу сопротивления электромагнитного магнитоэластического демпфера. Установлено, что при увеличении индукции магнитного поля в зазоре электромагнитного магнитоэластического демпфера с 0,1 до 0,55 Тл начальное усилие сдвига демпфера увеличивается в 6 раз – с 250 до 1500 Н.

Выводы: Разработанная методика аналитического расчетного анализа и предложенный алгоритм расчета силовой характеристики электромеханического магнитоэластического демпфера позволяют проводить корректную количественную оценку силы сопротивления, создаваемой демпфирующими устройствами с магнитоэластической жидкостью. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых типов электромеханических магнитоэластических демпферов.

Ключевые слова: магнитная жидкость, электромагнитный магнитоэластический демпфер, силовая характеристика, нелинейная характеристика, регулируемая жесткость, расчетный анализ.

Calculation of force-velocity relationship of electromechanical magnetorheological fluid damper

Yu.B. Kazakov, N.A. Morozov, S.A. Nesterov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation,
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Abstract

Background: Electromechanical magnetorheological fluid dampers are currently getting into use in vehicles and technological installations. The existing methods of damper calculation based on classic fluids for electromechanical magnetorheological fluid dampers are inapplicable because they do not take into account the magnetic fluids magnetorheological properties, magnetic field effect on the magnetic fluid viscosity, especially that of vibration energy dissipation. The currently used methods are based on magnetic fluid description with models excluding the initial section of the flow curve of a magnetic fluid, which gives incorrect results in case of small gradients of the magnetic fluid flow. Therefore, it is necessary to develop an adequate method of calculating force-velocity relationship of electromechanical magnetorheological fluid dampers and to conduct a design analysis of its power characteristics.

Materials and Methods: The studies were based on the theory of magnetohydrodynamics, rheology of non-Newtonian liquids, electromagnetic field, design analysis of vibration energy dissipation, process calculation.

Results: A method of analytical calculation has been developed based on splitting the magnetic fluid rheological curve into two sections with different viscosities, which enables calculations at different shear flow rates of the magnetic fluid in the gap of an electromechanical magnetorheological fluid damper. A new algorithm has been suggested for calculating

¹ Работа выполнена в рамках базовой части госзадания Минобрнауки РФ в сфере научной деятельности.

force-velocity relationship of the electromechanical magnetorheological fluid damper considering the nonlinearity properties of the magnetorheological fluid. Analysis of the influence of magnetic fluid and magnetic induction parameters on the resistance force of the electromagnetic magnetorheological damper revealed that an increase in magnetic induction in the gap of the electromagnetic magnetorheological damper from 0,1 to 0,55 tesla results in a 6 time growth of the initial damper force – from 250 to 1500 N.

Conclusions: The proposed algorithm of analytical calculation of the force-velocity relationship of the electromechanical magnetorheological damper allows us to make an adequate quantitative assessment of the resistance force created by the damping device with magnetorheological fluid. The obtained results can be used to develop new types of electromechanical magnetorheological fluid dampers.

Key words: magnetorheological fluid, electromechanical magnetorheological fluid dampers, force-velocity relationship, non-linear characteristics, adjustable stiffness, computational analysis.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.4.017-022

При разработке новых магнитоожидкостных демпфирующих устройств (МЖД) возникает необходимость в эффективной оценке их рабочих свойств. Под рабочими свойствами в демпфирующих устройствах понимается силовая характеристика, представляющая зависимость силы сопротивления демпфера от скорости перемещения штока. Основным преимуществом МЖД является возможность регулировки силовой характеристики демпфера путем изменения напряженности магнитного поля в областях протекания жидкости.

В демпфирующих устройствах без магнитной жидкости (МЖ) диссипация энергии колебаний происходит при дросселировании жидкости через узкие отверстия, зазор между поршнем и корпусом не используется [1]. В МЖД использование узких дроссельных отверстий малоприменимо, так как градиент скорости МЖ в них слишком велик, а регулировка силовой характеристики МЖД в этой зоне градиента скорости МЖ малоэффективна. В МЖД максимальный эффект будет достигнут при воздействии магнитным полем на большой объем медленно текущей жидкости. Поэтому методики расчета демпферов на классических жидкостях для МЖД неприменимы и необходимо разработать методику, позволяющую предварительно оценить свойства МЖД.

Следует отметить решения, приведенные в [2, 3] и основанные на представлении МЖ как тела, описываемого моделью Шведова-Бингама. Недостаток такого подхода заключается в отсутствии учета начального участка реологической кривой МЖ, что даст неверные результаты при малых градиентах течения МЖ в зазоре. Представленный далее подход в большей степени учитывает нелинейность реологической кривой МЖ, что позволяет говорить о результатах, более приближенных к реальным и не зависящих от величины градиента сдвига в зазоре МЖД.

В [4, 5] отмечается ламинарный характер течения МЖ в зазоре МЖД. Это связано с достаточно большой вязкостью используемых МЖ и стабилизирующим влиянием на течение внешнего магнитного поля.

Ламинарное течение МЖ в щелевом канале демпфера с поперечным магнитным полем. Рассмотрим напорное течение МЖ в щелевом канале при внешнем магнитном поле, вектор

напряженности ΔH которого перпендикулярен направлению течения среды. Известно, что поле скоростей в щелевом канале при напорном течении обычной вязкой жидкости имеет параболический характер [6]. При перепаде давления Δp , длине щелевого канала L , вязкости жидкости η и толщине щели $2R$ для текущего значения координаты r скорость течения определится по формуле

$$v = \frac{\Delta p}{L2\eta} (R^2 - r^2). \quad (1)$$

При наличии внешнего магнитного поля и структурирования МЖ ее реологическая кривая (зависимость касательного напряжения τ от градиента сдвига γ слоев жидкости) имеет вид, представленный на рис. 1 [7].

Рис. 1. Реологическая кривая МЖ при воздействии магнитного поля

Диапазон течения можно разбить на две области: первая – от нуля до γ_{12} с усредненной вязкостью η_1 ; вторая – от γ_{12} и далее с вязкостью η_2 . В первой области после преодоления силы сдвига слоев, которая определяется начальным касательным напряжением τ_0 , происходит разрушение элементов структуры МЖ, образованной во внешнем магнитном поле до начала движения жидкости. Наличие крупных цепочечных структур, агрегатов, которые взаимодействуют с магнитным полем и тормозятся им, вызывает увеличение динамической вязкости текущей среды. В первом приближении можно считать в этой области динамическую вязкость постоянной и равной η_1 .

Во второй области, при значительных градиентах сдвига слоев жидкости, энергия гидродинамического сдвигового течения больше энергии диполь-дипольного взаимодействия. Все агрегаты разрушаются, и даже действие внешнего магнитного поля не удерживает их от разруше-

ния. Динамическая вязкость η_2 в этой области практически равна вязкости двухфазного коллоида. Тогда для напряжений сдвига в этих двух областях при течении МЖ имеем

$$\tau = \tau_0 + \eta_1 \dot{\gamma} \quad \text{и} \quad \tau = \tau_d + \eta_2 \dot{\gamma}. \quad (2)$$

Из (2) для граничного значения градиента скорости из равенства

$$\tau_0 + \eta_1 \dot{\gamma}_{12} = \tau_d + \eta_2 \dot{\gamma}_{12}$$

получаем

$$\dot{\gamma}_{12} = \frac{\tau_d - \tau_0}{\eta_1 - \eta_2}. \quad (3)$$

Из соотношения (1), описывающего поле скоростей течения МЖ, производная скорости по координате высоты щели имеет вид

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = -\frac{C}{\eta} r, \quad (4)$$

где $C = \Delta p/L$.

Из общего соотношения $\tau = \eta \dot{\gamma}$ начальное напряжение сдвига τ_0 , которое определяется градиентом сдвига текущей среды, будет достигнуто на координате r_0 :

$$\tau_0 = \eta_1 \left. \frac{dv}{dr} \right|_{r=r_0} = \eta_1 \frac{C}{\eta_1} r_0, \quad \text{или} \quad \tau_0 = C r_0. \quad (5)$$

Из этого следует, что в области течения с малыми градиентами сдвига, ограниченной в щелевом течении размером r_0 от центральной линии, скорость течения будет одинаковой. Из (5) следует

$$r_0 = \frac{\tau_0}{C} = \frac{\tau_0 L}{\Delta p}. \quad (6)$$

Схема течения для случая, когда динамическая вязкость жидкости может иметь два значения, соответствующих реологической кривой рис. 1, приведена на рис. 2 [8].

Рис. 2. Схема течения жидкости с изменяющейся динамической вязкостью

На участке 0-0 скорость течения постоянна, образуется стержневое тело течения. Это связано с малыми значениями градиента скорости, которые не могут разрушить структуры, образованные диполь-дипольным магнитным взаимодействием частиц в коллоидной системе и усиленные внешним магнитным полем.

На участке 0-1 по обе стороны от оси течения градиент скорости сдвига слоев мал. Поле скоростей определяется большой динамической

вязкостью η_1 , которая соответствует наличию в жидкости значительного количества неразрушенных агрегатов в виде цепочечных или пространственных структур, которые ориентируются внешним магнитным полем.

На участке 1-2 по обе стороны от оси течения градиент скорости сдвига слоев велик, практически все агрегаты разрушены и динамическая вязкость η_2 практически равна вязкости двухфазной коллоидной системы с учетом некоторого тормозящего действия внешнего магнитного поля.

Начальная скорость течения на участке 0-1 определяется максимальной скоростью течения жидкости на участке 1-2, а скорость среды на участке 0-0 равна максимальной скорости на участке 0-1.

Размер области с постоянной скоростью течения из-за структурирования среды определен соотношением (6). Поле скоростей и градиент сдвига относительно ядра течения изменяются до градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}_{12}$ согласно формулам (1), (4).

Приравняв градиенты сдвигового течения на этом участке к граничному градиенту скорости сдвига $\dot{\gamma}_{12}$ согласно (3), получим значение радиуса r_1 перехода к течению с меньшей вязкостью η_2 :

$$r_1 = r_0(1 + k), \quad (7)$$

$$\text{где } k = \frac{\frac{\tau_d}{\eta_2} - 1}{1 - \frac{\eta_2}{\eta_1}}.$$

Анализ соотношения (7) показывает, что параметр k всегда больше нуля. Это следует из того, что $\tau_d > \tau_0$ и $\eta_1 > \eta_2$.

На участке 1-2 поле скоростей определяется вязкостью η_2 и может быть рассчитано по формуле (1) при изменении текущего параметра r в пределах от R , равного половине толщины щелевого канала, до r_1 – границы течения с вязкостью η_2 и течения с вязкостью η_1 , что соответствует градиенту сдвига $\dot{\gamma}_{12}$:

$$v_{12} = \frac{C}{2\eta_2} (R^2 - r^2). \quad (8)$$

На границе участков 1-2 и 0-1 скорость течения определяется соотношением

$$v_1 = \frac{C}{2\eta_2} (R^2 - r_1^2) = \frac{C}{2\eta_2} (R^2 - r_0^2 k^2). \quad (9)$$

Тогда скорость течения на участке 0-1 определится как

$$v_{01} = \frac{C}{2\eta_2} (R^2 - r_1^2) + \frac{C}{2\eta_1} (r_1^2 - r^2). \quad (10)$$

На участке 0-0 скорость течения равна значению

$$v_{00} = \frac{C}{2\eta_2} (R^2 - r_1^2) + \frac{C}{2\eta_1} (r_1^2 - r_0^2). \quad (11)$$

Одним из основных параметров, характеризующих воздействие магнитного поля на текущую в зазоре МЖ, является расход жидкости, который

тем меньше, чем больше тормозящий эффект магнитного поля. Для оценки значений расхода МЖ следует определить среднюю скорость течения МЖ в канале. В нашем случае течение МЖ в щелевом канале имеет три характерные области. Средняя скорость на каждом отдельном участке течения определяется начальной скоростью течения, которая равна конечной скорости течения предшествующего участка, и средней скоростью течения на самом участке. Среднее значение скорости течения на участке с координатами r_i и r_j при $r_i > r_j$ может быть определено в параболическом поле скоростей как

$$v_{cp} = \frac{1}{r_i - r_j} \int_{r_j}^{r_i} v_{ij} dr = \frac{C}{2\eta_{ij}} \frac{1}{r_i - r_j} \left[(r_i^3 - r_i^2 r_j) - \frac{1}{3} (r_i^3 - r_j^3) \right].$$

После преобразований получаем

$$v_{cp} = \frac{C}{2\eta_{ij}} \frac{1}{3} (2 - q_{ji} - q_{ji}^2), \quad (12)$$

где, как и ранее, $C = \Delta p / L$.

Обозначим: η_{ij} – динамическая вязкость жидкой среды на участке $i-j$; $r_j/r_i = q_{ji}$. Если принять конечное значение $r_j = 0$, то получим, что средняя скорость составляет две трети от максимальной скорости течения.

Для областей рассматриваемого течения на участке 1-2, на котором $r_2 = R$ и $v_2 = 0$, получаем

$$v_{12cp} = \frac{CR^2}{6\eta_2} (2 - q_{12} - q_{12}^2). \quad (13)$$

На участке 0-1, на котором $r_0 = \tau_0 / C$ и $r_1 = r_0$ k , для средней скорости течения получаем

$$v_{01cp} = \frac{CR^2}{2\eta_2} (1 - q_{02}^2 k^2) + \frac{Cr_0^2}{2\eta_1 \cdot 3} (2k^2 - k - 1). \quad (14)$$

На участке 0-0 скорость постоянна и определяется формулой

$$v_{00cp} = \frac{CR^2}{2\eta_2} (1 - q_{02}^2 k^2) + \frac{Cr_0^2}{2\eta_1} (k^2 - 1). \quad (15)$$

Выражения для средних скоростей течения на участках позволяют определить расход МЖ при течении в поперечном магнитном поле, определяемый суммой расходов в каждой области течения, которые равны произведению средней скорости течения на участке на площадь поперечного сечения этих областей при одинаковой ширине b щелевого канала. На участке 1-2 общая площадь поперечного сечения течения составит $S_{12} = 2b(R - r_1)$, на участке 0-1 – $S_{01} = 2b(r_1 - r_0)$, на участке 0-0 – $S_{00} = 2br_0$. Тогда после преобразования окончательно получим суммарный расход среды Q_Σ :

$$Q_\Sigma = \frac{2CR^3b}{3\eta_2} (1 - q_{02}^2 k^3) + \frac{2Cr_0^3b}{3\eta_1} (k^3 - 1), \quad (16)$$

где, как и ранее, $k = (\tau_0/\tau_0 - 1)/(1 - \eta_2/\eta_1)$; $q_{02} = r_0/R$; $r_0 = \tau_0/C$. Из этого также следует, что $q_{02} = \tau_0/CR = \tau_0/L/\Delta p$.

По отношению к развитому течению МЖ, когда практически все агрегаты разрушены, для относительного расхода получим

$$\frac{Q_\Sigma}{Q_2} = (1 - q_{02}^2 k^3) + \frac{\eta_2}{\eta_1} q_{02}^2 (k^3 - 1). \quad (17)$$

Относительный расход в случае отсутствия магнитного поля определяется формулой

$$\frac{Q_\Sigma}{Q_0} = \frac{\eta_0}{\eta_2} (1 - q_{02}^2 k^3) + \frac{\eta_0}{\eta_1} q_{02}^2 (k^3 - 1). \quad (18)$$

Алгоритм расчета силовой характеристики МЖД. Практически во всех случаях область диссипации энергии в МЖД представляет собой чередующиеся участки с присутствием и отсутствием магнитного поля (полюса и межполюсные пространства). Сложность расчета силовой характеристики состоит в том, что профиль скорости потока и вязкость жидкости на каждом из участков могут быть различны и определяться свойствами МЖ. Предложенный порядок расчета силовой характеристики МЖД представлен на рис. 3.

Рис. 3. Порядок расчета силовой характеристики магнитожидкостного демпфера

Перед началом расчета необходимо задать геометрические параметры рабочей зоны МЖД, свойства МЖ и необходимую силу сопротивления демпфера. По результатам расчета получаем скорость движения поршня. Далее вычисляется перепад давления на поршне, обеспечивающий данную силу сопротивления:

$$\Delta p_{необх} = \frac{F_{необх}}{S_{пор}}. \quad (19)$$

Исходя из предположения о равномерном падении напора по длине поршня, находится предварительный перепад давления на полюсе $\Delta p_{пол}$, как

$$\Delta p_{\text{пол}} = \frac{\Delta p_{\text{необх}} \cdot h_{\text{пол}}}{h_{\text{пор}}}, \quad (20)$$

где $h_{\text{пол}}$ – длина полюса; $h_{\text{пор}}$ – длина поршня.

С учетом свойств МЖ, по соотношениям, приведенным ранее, определяем параметры r_0 , r_1 , V_{00} , V_{01} , V_{12} , Q_{Σ} . Зная расход жидкости и учитывая параболический профиль течения в межполюсном пространстве, найдем падение давления

$$\Delta p_{\text{мпол}} = \frac{3h_{\text{мпол}}\eta_0 Q_{\Sigma}}{2\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 2\pi R_{\text{ср}}}, \quad (21)$$

где $R_{\text{ср}}$ – средний радиус зазора между поршнем и корпусом; δ – величина зазора между поршнем и корпусом; η_0 – вязкость МЖ в отсутствии магнитного поля; $h_{\text{мпол}}$ – длина межполюсного пространства.

Уточненное значение перепада давления на поршне составит

$$\Delta p_{\text{пор}} = \frac{\Delta p_{\text{необх}} - \Delta p_{\text{мпол}} \Delta(n_{\text{пол}} - 1)}{n_{\text{пол}}}. \quad (22)$$

Сравниваем полученное значение перепада давления на поршне с принятым ранее. Если разница меньше заданной величины, то происходит окончательный расчет параметров r_0 , r_1 , V_{00} , V_{01} , V_{12} , Q_{Σ} и скорости движения поршня

$$V_{\text{пор}} = \frac{Q_{\Sigma}}{S_{\text{пор}}}. \quad (23)$$

Если разница между принятым ранее и полученным значением больше заданной величины, то новое значение падения давления на поршне возвращается в начало цикла и расчет повторяется.

Анализ результатов и выводы. Выбранные для проведения анализа реологические кривые МРС получены в работе [9] и представлены на рис. 4. Данная МРС представляет из себя взвесь порошкового карбонильного железа со средним диаметром частиц 2,1 мкм, покрытого тонкой силикатной оболочкой, в вязкой жидкостно-носителе (перфторированный полиэфир) с динамической вязкостью 0,3 Па·с. Динамическая вязкость МРС в отсутствии магнитного поля составляет 1,02 Па·с.

Реологические кривые снимались на реометре Anton-Paar Physica MCR 100 при изменении скорости сдвига от 10^{-3} до 10^3 с^{-1} и в диапазоне изменения магнитной индукции от 0,1 до 0,55 Тл. Все измерения проводились при температуре 20°C.

По приведенным реологическим кривым МЖ в соответствии с обозначениями рис. 1 получены характерные значения параметров жидкости, представленные в таблице.

Рис. 4. Реологические кривые МРС с объемным содержанием твердой фазы 0,28 при различных значениях магнитной индукции

Характерные значения реологических кривых МРС

B , Тл	τ_d , кПа	τ_0 , кПа	η_1 , Па·с	η_2 , Па·с
0,1	2,8	0,7	74,97	1,613
0,15	7	2,2	206,1	2,646
0,25	14,2	6,2	304,29	3,301
0,33	21,4	11,16	380,52	3,856
0,43	29,2	17,8	434,7	4,41
0,55	37	24	497,7	4,977

С помощью описанного выше алгоритма рассчитаны силовые характеристики МЖД при разных значениях магнитной индукции (рис. 5).

Рис. 5. Силовая характеристика МЖД

Начальное усилие сдвига МЖД при $v = 0$ связано с преодолением предела текучести МЖ в зазоре. Анализ графиков показывает, что при увеличении индукции магнитного поля в зазоре демпфера от 0,1 до 0,55 Тл начальное усилие сдвига увеличивается в 6 раз – от 250 до 1500 Н. Нелинейность полученных зависимостей связана с изменениями вязкости МЖ на начальном участке реологической кривой.

Анализ выражений (17), (18) показывает, что отношение радиуса стержневого течения к половине толщины щелевого канала учитывается в степени три. Это говорит о незначительном влиянии на расход среды стержневого течения

малого радиуса, так как отношение r_0/R заметно меньше единицы. Только при значении q_{02} , равном 0,5 ($q_{02} = r_0/R$), его влияние на расход среды достигает значений более 12 %. Следовательно, необходимо обращать внимание на размер щелевого канала $2R$ и значение начального напряжения сдвига τ_0 , которые и определяют основные энергетические соотношения при течении МЖ в щелевом канале с поперечным магнитным полем.

Результаты исследований были положены в основу совершенствования конструкции магнито-жидкостного амортизатора с управляемой жесткостью [10].

Список литературы

1. **Дербаремдикер А.Д.** Гидравлические амортизаторы автомобилей. – М.: Машиностроение, 1969. – 237 с.
2. **Sireteanu T., Ghita G., Giuclea M.** Modelling of dynamic behaviour of magnetorheological fluid damper by genetic algorithms based inverse method // The 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics Timisoara. – Romania, 2004, October 21–22. – P. 619–628.
3. **Case D., Taheri B., Richer E.** Dynamic Magnetorheological Damper for Orthotic Tremor Suppression // Biomedical Engineering and Technology. – 2011, March 10.
4. **Guangqiang Y.** Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation: modeling, testing and control // Notre Dame. – Indiana, 2001. – 259 s.
5. **Шульман З.П., Кордонский В.И.** Магнитореологический эффект. – Минск: Наука и техника, 1982. – 184 с.
6. **Тарг С.М.** Основные задачи теории ламинарных течений. – М.; Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951. – 420 с.
7. **Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Нестеров С.А.** Магнитореологический демпфер с поршневой магнитной системой // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 23–28.
8. **Морозов Н.А., Нестеров С.А.** Течение магнитной жидкости в щелевом канале с поперечным магнитным полем // XVI Междунар. Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. науч. тр. – Иваново, 2014. – С. 173–179.
9. **Gudmundsson K.H.** Design of a Magnetorheological Fluid for an MR Prosthetic Knee Actuator with an Optimal Geometry / School of Engineering and Natural Sciences University of Iceland. – Prentun: Háskólaprent Reykjavík, May 2011. – 88 p.

Казаков Юрий Борисович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Морозов Николай Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-06.

Нестеров Сергей Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-15.

10. Пат. № 2550793 С1 Российская Федерация.
Управляемый магнито-жидкостный амортизатор / Н.А. Морозов, С.А. Нестеров, Ю.Б. Казаков. Заявка № 2013153796/11, 04.12.2013. Оpubл. 10.05.2015. Бюл.13.

References

1. **Derbaremdiker, A.D.** *Gidravlicheskie amortizatory avtomobiley* [Hydraulic shock absorbers of cars]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1969. 237 p.
2. **Sireteanu, T., Ghita, G., Giuclea, M.** Modelling of dynamic behaviour of magnetorheological fluid damper by genetic algorithms based inverse method. The 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics Timisoara. Romania, October 21–22, 2004, pp. 619–628.
3. **Case, D., Taheri, B., Richer, E.** Dynamic Magnetorheological Damper for Orthotic Tremor Suppression. Biomedical Engineering and Technology. 2011, March 10.
4. **Guangqiang, Y.** Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation: modeling, testing and control // Notre Dame. Indiana, 2001. 259 p.
5. **Shul'man, Z.P., Kordonskiy, V.I.** *Magnitореологический эффект* [Magnetorheological effect]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1982. 184 p.
6. **Targ, S.M.** *Osnovnye zadachi teorii laminarnykh techeniy* [The main problems of laminar flows theory]. Moscow; Leningrad, Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1951. 420 p.
7. **Kazakov, Yu.B., Morozov, N.A., Nesterov, S.A.** *Magnitореологический демпфер с поршневой магнитной системой* [Magnetorheological damper with magnetic piston system]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 23–28.
8. **Morozov, N.A., Nesterov, S.A.** *Techenie magnitnoy zhidkosti v shchelevom kanale s poperechnym magnitnym polem* [Magnetic fluid flows in an annular channel with a transverse magnetic field]. *Sbornik nauchnykh trudov XVI Mezhdunarodnoy Plesskoy nauchnoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam* [Proceedings of the XVIth International Plos scientific conference on nanodispersed magnetic fluids]. Ivanovo, 2014, pp.173–179.
9. **Gudmundsson, K.H.** Design of a Magnetorheological Fluid for an MR Prosthetic Knee Actuator with an Optimal Geometry. School of Engineering and Natural Sciences University of Iceland. Prentun, Háskólaprent Reykjavík, May 2011. 88 p.
10. **Morozov, N.A., Nesterov, S.A., Kazakov, Yu.B.** *Upravlyаемый magnitozhidkostnyy amortizator* [A controllable fluid damper]. Patent RF, no. 2550793 C1, 2015.