DOI: 10.15593/2224-9982/2019.58.10

УДК 532.13

К.В. Найгерт¹, В.А. Целищев²

¹ Южно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет), ООО НПО «Авионика и Мехатроника»,
Челябинск, Россия

² Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

МЕТОДОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

Изложены теоретические аспекты гидродинамических и реологических эффектов магнитореологической рабочей среды, которые легли в основу предложенных авторами способа и метода управления потоком магнитореологической жидкости. Рассмотрен способ формирования гидродинамических и реологических эффектов во внешних динамических электромагнитных полях. Приведены зависимости, позволяющие получать численные значения генерируемых эффектов. Рациональность применения предложенного способа подтверждена результатами численного моделирования. Описан и обоснован оригинальный метод реализации управления потоком магнитореологической жидкости. Предложены конструкции оригинальных запатентованных устройств: магнитореологический дроссель и магнитодинамический насос, применяющих дифференциальные электромагнитные блоки управления и их каскады, что дает возможность создавать вращающиеся и винтовые управляющие электромагнитные поля. Подобные устройства комбинированного типа способны создавать гидродинамические эффекты и производить регулирование гидродинамического сопротивления в потоке за счет изменения вязкости рабочей среды. Использование разработанных устройств значительно повышает эффективность магнитореологических приводных систем, расширяет диапазон значений рабочего давления и снижает массогабаритные показатели готового изделия. Адаптирован для магнитореологической среды метод численного моделирования. Это позволяет определить статические характеристики созданных устройств, в основе рабочего процесса которых находится формирование гидродинамических и реологических эффектов во внешних вращающихся и винтовых электромагнитных полях. Приведенные расчетные зависимости способны описывать течение магнитореологической среды в кольцевых каналах с вихревым направляющим аппаратом. Численная модель подтверждает работоспособность оригинальных запатентованных устройств. Результаты компьютерного моделирования демонстрируют существенное влияние вязкостных характеристик рабочей среды и окружных сдвиговых напряжений на статические характеристики магнитореологических устройств.

Ключевые слова: магнитореологические устройства, гидравлические системы специального назначения, гидродинамические эффекты, реологические эффекты.

K.V. Naigert¹, V.A. Tselishev²

¹ South Ural State University (National Research University), The Scientific and Production Enterprise
"Avionics and Mechatronics" Ltd., Chelyabinsk, Russian Federation

² Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

FORMATION METHODOLOGY OF HYDRODYNAMIC AND RHEOLOGICAL EFFECTS OF MAGNETORHEOLOGICAL WORKING ENVIRONMENT

The paper presents the theoretical aspects of hydrodynamic and rheological effects of magnetorheological working environment, which form the basis of author's method and way of magnetorheological fluid control. The method of formation of hydrodynamic and rheological effects in external dynamic electromagnetic fields is considered. The text shows the dependencies for obtaining the numerical values of the generated effects. The rationality of application of proposed method is confirmed by the results of numerical simulation. Original method of flow control realization in magnetorheological fluid is described and justified. Designs of original patented magnetorheological and magnetodynamic devices with differential electromagnetic control units are proposed and allow us to create rotating and helical electromagnetic fields. Such combined devices are capable of hydrodynamic effect creating and hydrodynamic resistance regulating by changes in viscosity of working environment. The use of developed devices significantly increases the efficiency of magnetorheological drive systems, expands the range of operating pressures and reduces weight and dimensions of finished product. Numerical simulation method for magnetorheological environment is adapted. This allows determining of static characteristics of created devices with working processes, which are

formed by hydrodynamic and rheological effects in external rotating and helical electromagnetic fields. Calculated dependencies can describe the flow of magnetorheological environment in annular channels with swirl guide. Numerical model confirms the performance of original patented devices. Computer simulation results demonstrate significant impact of viscosity characteristics of working environment and circumferential shear stresses on static characteristics of magnetorheological devices.

Keywords: magnetorheological devices, special purpose hydraulic systems, hydrodynamic effects, rheological effects.

Введение

Необходимость совершенствования способов регулирования параметров расхода рабочей среды в гидравлических приводных системах летательных аппаратов послужила причиной создания новых технологий и появления магнитореологических приводов. Магнитореологические системы в последние годы были внедрены авиастроительными компаниями, наиболее известной из которых является Boeing. Применяемые способы управления расходными характеристиками потока магнитореологической жидкости и их конструктивные исполнения базируются на регулировании вязкости посредством внешних магнитных или электромагнитных полей, что дает возможность осуществлять управление гидродинамическим сопротивлением в потоке. В некоторых вариантах существующих конструкций магнитореологических аппаратов дополнительно предполагается снижение инерционности жидкой среды за счет системы изогнутых каналов или разночастотное воздействие электромагнитных полей на рабочую среду без реализации в ней гидродинамических и реологических эффектов. Распространенные конструкции рассмотрены в работах [1–16]. Распространенные магнитореологические системы имеют существенные ограничения по значениям рабочего давления и выраженную нестабильность характеристик во времени, что является следствием их конструктивных и функциональных особенностей. Это требует дальнейшего развития магнитореологических технологий с последующей интеграцией результатов в промышленность.

Актуальность

Улучшение динамики гидравлических и магнитореологических приводных систем и расширение их рабочих характеристик во многом зависит от качества процессов регулирования течения рабочих сред. Ввиду этого развитие способов управления расходными характеристиками в магнитореологических приводных системах актуально.

Задача исследовательской работы – создание способа и метода управления потоком магнитореологической жидкости, позволяющих повысить эффективность регулирования характеристик приводных систем.

Способ формирования гидродинамических и реологических эффектов

Способ управления расходными характеристиками магнитореологической жидкости за счет создания гидродинамических и неньютоновских эффектов во внешних динамических электромагнитных полях осуществляет управление расходом магнитореологической жидкости путем регулирования гидродинамического сопротивления потока посредством внешних электромагнитных полей. При этом наложение на поток магнитореологической жидкости внешних динамических электромагнитных полей, т.е. вращающихся или винтовых электромагнитных полей, изменяет не только вязкостные свойства магнитореологической жидкости, но и способно генерировать в ней гидродинамические (вихревые) и неньютоновские (псевдопластичные и вязкопластичные) эффекты посредством сообщения потоку радиальной составляющей скорости, формирования круговой или винтовой траектории движения частиц магнетика и приложения к объему сдвиговых напряжений. В совокупности с повышением вязкости магнитореологической жидкости в электромагнитных полях происходит дополнительное падение давления в вихре и создаются в слоях потока сдвиговые напряжения, в результате чего вязкость магнитореологической жидкости начинает стремиться к бесконечности, численные значения которой

выражаются уравнением Шведова – Бингама. Это позволяет создавать перепады давления, в десятки раз превосходящие предельные перепады, реализованные только при помощи изменения вязкости магнитореологической среды. Управляющие вращающиеся или винтовые электромагнитные поля индуцируются сборками индукторов, установленных в виде кольцевых дифференциальных электромагнитов или каскадов кольцевых дифференциальных электромагнитов. Генерация только гидродинамического вихревого эффекта при минимальном повышении вязкости магнитореологической среды приводит к повышению кинетической энергии потока и росту расхода магнитореологической жидкости в зоне регулирования, что достигается при задании сигнала управления с высокими частотными характеристиками при малых вольт-амперных характеристиках. Вращающееся электромагнитное поле (рис. 1) создается сборкой индукторов, образующих кольцевой управляющий дифференциальный электромагнит. Последовательное включение индукторов с заданной частотой индуцирует вращающееся электромагнитное поле с требуемыми динамическими характеристиками. Приложение сдвиговых напряжений на объем магнитореологической жидкости, помещенный во внешние магнитные или электромагнитные поля, приводит к возникновению вязкопластичных эффектов, так как вязкость магнитореологической жидкости теоретически начинает стремиться к бесконечности. Падение давления в вихре без повышения вязкости напротив приводит к повышению расхода

Рис. 1. Магнитореологический дроссель: 1 – внутренний элемент; 2 – завихритель; 3 – обтекатель; 4 – корпус; 5, 6 – крышки; 7, 8 – отверстия под патрубки; 9 – блок электромагнитного управления потоком; 10 – отверстие завихрителя

Рис. 2. Магнитодинимический насос: 1 – шнек; 2 – корпус; 3 – обтекатель; 4 – каскад блоков электромагнитного управления потоком

в зоне регулирования. Установка кольцевых дифференциальных электромагнитов каскадами позволяет создавать винтовые управляющие электромагнитные поля. Индукторы дифференциальных электромагнитов запитываются источником синусоидальных ЭДС одинаковой частоты, сдвинутых друг относительно друга во времени на требуемый фазовый угол, например в трехфазной системе этот угол равен $2\pi/3$ (120°), в шестифазной – $\pi/3$ (60°), в девятифазной – $\pi/4,5$ (40°), в двенадцатифазной – $\pi/6$ (30°) и далее по аналогии. В случае установки сборок индукторов каскадом включение индуктора каждого последующего дифференциального электромагнита осуществляется с угловым сдвигом на один индуктор (рис. 2). Применение способа управления расходными характеристиками магнитореологической жидкости за счет создания гидродинамических и неньютоновских эффектов во внешних динамических электромагнитных полях позволяет обеспечить: повышение эффективности управляющих магнитореологических устройств, расширение диапазона значений рабочего давления и увеличение глубины регулирования, а также рост точности магнито-

реологических приводных систем. Использование внешних динамических электромагнитных полей, а именно вращающихся или винтовых электромагнитных полей, изменяет не только вязкостные свойства магнитореологической жидкости, но и способно генерировать в ней гидродинамические и неньютоновские эффекты. Предложенный способ в значительной степени улучшает динамику магнитореологического привода и повышает производительность при малых массогабаритных показателях магнитореологических устройств [17]. Устройства, реализующие

в своем рабочем процессе предложенный способ управления расходом магнитореологической среды, запатентованы и представлены на рис. 1, 2. Магнитореологические устройства оснащены направляющим аппаратом, выполненным в виде завихрителя и винтового канала. Подробное описание конструктивных и функциональных особенностей – в работах [17–20]. Использование в качестве несущей жидкости дилатантных сред позволяет увеличивать гидродинамическое сопротивление потока при росте приложенного сдвигового напряжения, изменяя расходные характеристики потока магнитореологической среды и повышая отклик системы на сигнал управления и энергоэффективность.

Численное описание гидродинамических и реологических эффектов

Как известно, реологические эффекты и аномалии в неньютоновских средах возникают под действием сдвиговых напряжений и зависят от температуры среды. Для обоснования достоверности гидродинамических процессов, которые формируют способ управления расходными характеристиками магнитореологической жидкости, использованный в конструкциях устройств, опишем численную модель рабочего процесса, основываясь на следующих работах [21–23]. Течение в кольцевом канале с учетом касательных напряжений и тепловых эффектов можно описать системой уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\rho v_\phi^2}{r} = \frac{\partial P}{\partial r}; \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 \tau_{r\phi})}{\partial r} + f_\phi = 0; \quad -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \tau_{rz})}{\partial r} + f_z = 0; \\ \zeta \rho c_p v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \lambda_{\text{efr}} \frac{\partial T}{\partial r} + q_v^*; \quad \zeta = \frac{\Delta V_F}{\Delta V} = \frac{\Delta \Phi_F}{2\pi}; \quad q_v^* = (1 - \zeta) q_v^{(s)}, \end{aligned}$$

где v_z – осевая компонента скорости; v_ϕ – окружная компонента скорости; c_p – теплоемкость; T – температура; P – давление; $q_v^{(s)}$ – мощность внутренних источников тепловыделения в материале направляющего аппарата; $\Delta \Phi_F$ – угол обхода по угловой координате; ΔV_F – объем рабочей среды; ΔV – объем рабочей зоны устройства, включающий объем материала направляющего аппарата. Компоненты эффективных касательных напряжений:

$$\tau_{r\phi}^{\text{ef}} = \mu_{r\phi}^{\text{ef}} r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\phi}{r} \right); \quad \tau_{zr}^{\text{ef}} = \mu_{zr}^{\text{ef}} \frac{\partial v_z}{\partial r},$$

где $\mu_{r\phi}^{\text{ef}}$; μ_{zr}^{ef} – компоненты эффективной вязкости:

$$\begin{aligned} \mu_{r\phi}^{\text{ef}} \approx \mu_{zr}^{\text{ef}} \approx \mu_{\text{ef}}(r) = \rho V^*(r) l(r); \quad V^*(r) = \sqrt{\frac{(\tau_{rz}^2(r) + \tau_{r\phi}^2(r))^{0.5}}{\rho}}; \\ \lambda_{\text{efr}} = \zeta \lambda \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_t} \frac{\mu_{zr}^{\text{ef}}}{\left(\frac{\tau_{zr}^{\text{ef}}}{\dot{\gamma}} + \mu_r \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H)) / J}}, \end{aligned}$$

где $l(r)$ – масштаб длины; λ – теплопроводность среды; J – суммарный момент инерции частицы; $\tau \tau_s$ – время на релаксации (магнитных и немагнитных частиц); M – намагниченность вещества под действием магнитного поля; H – напряженность магнитного поля; μ_r – реологическая вязкость, без проявления неньютоновских свойств, до помещения в энергетические поля; $\text{Pr}; \text{Pr}_t$ – молекулярное и турбулентное числа Прандтля; $\dot{\gamma}$ – градиент скорости. Компоненты силы сопротивления в угловом и продольном направлениях

$$f_\varphi = -(k_{\varphi\varphi}v_\varphi + k_{\varphi z}v_z); \quad f_z = -(k_{z\varphi}v_\varphi + k_{zz}v_z); \quad k_{\varphi\varphi} = k_{\eta\eta} \sin^2 \theta + k_{\xi\xi} \cos^2 \theta;$$

$$k_{\varphi z} = k_{z\varphi} = (k_{\eta\eta} - k_{\xi\xi}) \sin \theta \cos \theta; \quad k_{zz} = k_{\eta\eta} \cos^2 \theta + k_{\xi\xi} \sin^2 \theta; \quad k_{\xi\xi} = \frac{|f|}{v_\xi};$$

$$|f| = \frac{F_{ls}}{\xi 2\pi(r_2^2 - r_1^2)}; \quad \bar{\xi} = 1 - \frac{d^2 m}{4 \cos \theta (r_2^2 - r_1^2)}; \quad F_{ls} = C_d \frac{\rho v^2}{2} S_M; \quad C_d = C_f + C_\omega;$$

$$k_{\eta\eta} = \frac{\lambda_{fr}^0 \Psi_3 \rho \bar{v}_{sw} (1 + dm / (S \sin \theta))}{16 d_{sw} \cos \theta},$$

где θ – значение угла между продольной осью канала z и направлением, задаваемым направляющим аппаратом η ; C_f – сопротивление трения; C_ω – сопротивление давления; S_M – сечение направляющего аппарата; $r_1; r_2$ – внутренний и внешний радиусы; v_ξ – скорость поперек направляющего аппарата; $\bar{v}_{sw}$ – среднее значение полной скорости потока в области расположения направляющего аппарата; d_{sw} – диаметр направляющего аппарата; d – характерный размер направляющего аппарата; m – число заходов направляющего аппарата; S – шаг направляющего аппарата; Ψ_3 – поправочная функция, учитывающая кривизну линий тока:

$$\Psi_3 = 1 + \frac{0,0385 (d \sin^2 \alpha / d_{sw})^{0,5}}{\lambda_{fr}^0}; \quad \text{Re} = \frac{\bar{v}_z d_h}{\left[\left(\left(\frac{\tau_{sh}}{\dot{\gamma}} + \mu_r \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H) / J)} \right) / \rho \right] \cos \alpha},$$

где α – средний угол закрутки потока в области расположения направляющего аппарата; τ_{sh} – касательных напряжений. Дифференциальные уравнения вихревого течения примут вид

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^3 \mu_{ef} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\varphi}{r} \right) \right) - (k_{\varphi\varphi} v_\varphi + k_{\varphi z} v_z) = 0; \quad -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{ef} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) - (k_{z\varphi} v_\varphi + k_{zz} v_z) = 0;$$

$$\mu_{ef} = \rho \vartheta_{ef} = \rho \left[\left[\left(\left(\frac{\tau_{sh}}{\dot{\gamma}} + \mu_r \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H) / J)} \right) / \rho \right] + \vartheta_t \right],$$

где $\vartheta_{ef}; \vartheta_t$ – эффективная и турбулентная кинематические вязкости.

Сопротивление винтового канала

$$f = -k_{\eta\eta} \bar{v}_\eta e_\eta; \quad k_{\varphi\varphi} = k_{\eta\eta} \sin^2 \theta; \quad k_{zz} = k_{\eta\eta} \cos^2 \theta; \quad k_{\varphi z} = k_{z\varphi} = k_{\eta\eta} \sin \theta;$$

$$k_{\eta\eta} = \frac{\lambda_{fr}^0 \Psi \rho v_\eta m}{4 A \pi \cos \theta (R_1 + R_2)}; \quad \Psi = 1 + \frac{1}{\lambda_{fr}^0} 0,0385 \sqrt{\frac{d_h \sin^2 \theta}{R_1 + R_2}},$$

где d_h – гидравлический диаметр канала. Следующие параметры представлены в виде

$$\text{Re}_\eta = \frac{v_\eta d_h}{\left[\left(\left(\frac{\tau_{r\varphi}^{ef}}{\dot{\gamma}} + \mu_r \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H) / J)} \right) \right]}; \quad \lambda_{fr}^0 = \frac{0,316}{\text{Re}_\eta^{0,25}}.$$

Зависимость изменения расхода магнитореологической жидкости во внешнем поле:

$$Q = \frac{\operatorname{Re}_{\eta} \left[\left(\left(\frac{\tau_{r\varphi}^{\text{ef}}}{\dot{\gamma}} + \mu_r \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H)) / J} \right) / \rho \right]}{r \rho} S_d.$$

Зависимость перепада давления магнитореологической жидкости от напряженности поля

$$\Delta p = \frac{C_D l v}{d_{\text{ef}}^2} \left[\left(\left(\frac{\tau_{r\varphi}^{\text{ef}}}{\dot{\gamma}} + \mu_r \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H)) / J} \right) / \rho \right].$$

где S_d – рабочее сечение; C_D – коэффициент сопротивления; l – длина; d_{ef} – эффективный диаметр.

Результаты моделирования

Принимая во внимание то, что инициация реологических эффектов в неньютоновских жидкостях зависит от сдвиговых напряжений, рассмотрим влияние компоненты эффективных касательных напряжений в окружном направлении на расходные характеристики магнитореологических устройств. Статические характеристики магнитореологических устройств приведены на рис. 3–4.

Рис. 3. Расходная характеристика магнитореологического устройства

Рис. 4. Перепад давления на магнитореологическом устройстве

Численный эксперимент проводился в MATLAB при постоянных значениях напряженности управляющего поля и оценивался только вклад изменения касательных напряжений в регулирование вязкостных характеристик рабочей среды, т.е. статических характеристик магнитореологических устройств.

Полученные графические зависимости иллюстрируют наличие у магнитореологической среды неньютоновских свойств, проявляющихся в росте ее вязкости при увеличении численных значений сдвиговых напряжений, что приводит к коррекции расходных характеристик магнитореологических устройств. На рис. 5 представлены изменения зависимости перепада давления от вязкостных характеристик для ряда значений осевого компонента скорости потока. Графики иллюстрируют влияние увеличения значений осевой компоненты скорости потока на тенденцию повышения перепада давления при росте вязкости магнитореологической среды. Это обусловлено тем, что повышение осевой компоненты скорости потока приводит к общему увеличению сдвиговых напряжений в объеме рабочей среды. Результаты численного моделирования свидетельствуют о существенном влиянии окружных сдвиговых напряжений на статические характеристики магнитореологических устройств и необходимости учета данного фактора при конструировании рассматриваемых устройств, расчете параметров и моделировании их рабочих процессов.

Рис. 5. Распределение перепада давления на магнитореологическом устройстве при варьировании значений осевого компонента скорости потока: 1 – $v_z = 0,28$ см/с; 2 – $v_z = 0,64$ см/с; 3 – $v_z = 1,11$ см/с; 4 – $v_z = 1,71$ см/с

Метод реализации управления потоком магнитореологической жидкости за счет формирования гидродинамических и реологических эффектов

Очевидна существенная зависимость расходных характеристик и перепада давления на входе и выходе в зонах регулирования от вязкости, которая в неньютоновской среде является функцией сдвиговых напряжений. Во внешних энергетических полях магнитореологическая жидкость проявляет выраженные неньютоновские свойства. Наложение сильных электромагнитных полей формируют вязкопластичные свойства магнитореологической среды. Исходя из значений начальной вязкости магнитореологической жидкости и рабочих значений температуры задаются оптимальные параметры электрического сигнала управления, необходимые для изменения реологических свойств среды. Вольт-амперные характеристики сигнала управления находятся в диапазоне от 5 до 380 В и от 1 до 400 А в зависимости от параметров индукторов и блоков питания. Сдвиговые напряжения, требуемые для создания гидродинамических и реологических эффектов, задаются за счет моделирования частотных характеристик. Частота управляющего тока задается в диапазоне от 5 Гц до 20 кГц. Частота переключения обмоток индукторов определяется с учетом требуемых значений радиальной составляющей скорости, исходя из того, что частота вращения электромагнитного поля f_{em} по отношению к требуемой для реализации управления частоте вращения объема магнитореологической жидкости f_g , находящегося в зоне регулирования, до коррекции сигнала управления по обратной связи задается: в случае применения вращающихся электромагнитных полей как соотношение $\alpha f_{em} = f_g$, а для винтовых электромагнитных полей как соотношение $\gamma \alpha f_{em} = f_g$, значения которых находятся в диапазоне от 0,5 до 200 Гц. Принятие допущения о равной частоте вращения электромагнитного поля f_{em} и объема магнитореологической жидкости f_g неприемлемо. Ввиду этого расчет необходимо производить с учетом физических свойств магнитореологической жидкости и времени переходных процессов как в жидкой среде, так и в электромагнитных индукторах. Высокую точность и хорошую воспроизводимость результатов показал ряд следующих численных зависимостей:

$$\alpha f_{em} = f_g; \quad \gamma \alpha f_{em} = f_g.$$

Коэффициент α , учитывающий физические и реологические свойства рабочей среды, для групп магнитореологических жидкостей устанавливается экспериментально, с учетом каче-

ственно-количественного состава магнитореологических жидкостей, дисперсности их структуры и интенсивности сдвиговых напряжений. Для этого применяется измерительная ячейка Куэтта, коаксиальные цилиндры которой изготовлены из магнитопроводящего материала, помещенная в электромагнитное поле. Что позволяет установить влияние заданных параметров электромагнитного поля и частоты вращения объема магнитореологической жидкости в ячейке Куэтта на вязкостные характеристики образца магнитореологической жидкости η . Значение коэффициента α определяется относительно вязкости эталонной ферромагнитной среды η_{st} , измеренной аналогично, и рассчитывается исходя из выражения $\alpha = \eta_{st} / \eta$. Значение параметра γ задается как число дифференциальных электромагнитов в каскаде. Коррекция параметров сигнала управления и оптимизация рабочего процесса производятся посредством обратной связи при реализации заложенного в контроллер алгоритма управления [17–20, 24, 25].

Новизна

Разработан способ управления расходными характеристиками потока магнитореологической жидкости, отличающийся от ранее известных тем, что он реализует рабочие процессы в предлагаемых магнитореологических устройствах за счет формирования гидродинамических и реологических эффектов во внешних вращающихся и винтовых электромагнитных полях. Разработан адаптированный для магнитореологической среды метод численного моделирования, позволяющий определять статические характеристики созданных устройств, в основе рабочего процесса которых находится формирование гидродинамических и реологических эффектов во внешних вращающихся и винтовых электромагнитных полях, подтверждающий работоспособность оригинальных запатентованных устройств.

Заключение

Разработанный способ формирования гидродинамических и реологических эффектов во внешних вращающихся и винтовых электромагнитных полях эффективен и промышленно применим. Созданы конструкции устройств, позволяющих осуществлять управление расходными характеристиками потока магнитореологической среды при помощи формирования внешних вращающихся и винтовых электромагнитных полей. Предложен метод реализации управления потоком магнитореологической жидкости за счет формирования гидродинамических и реологических эффектов во внешних вращающихся и винтовых электромагнитных полях. Возможность применения для обоснования достоверности гидродинамических процессов, формирующих предложенный способ управления расходными характеристиками магнитореологической жидкости, общепризнанной численной модели является доказательством состоятельности предложенного метода управления и работоспособности созданных конструкций устройств. Численный эксперимент подтверждает состоятельность способа формирования гидродинамических и реологических эффектов.

Библиографический список

1. Беляев А.В., Смородин Б.Л. Конвекция магнитной жидкости под действием переменного магнитного поля. Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50, № 4. – С. 18–27.
2. Лебедев А.В. Динамика магнитной жидкости в переменных полях: автореф. ... д-ра техн. наук / Ин-т мех. сплошных сред УрО РАН. – Пермь, 2005. – 20 с.
3. Refractive index sensor based on magnetoplasmonic crystals / A.A. Grunin, I.R. Mukha, A.V. Chetvertukhin, A.A. Fedyanin // J. of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – Vol. 415. – P. 72–76
4. Material transport of a magnetizable fluid by surface perturbation / V. Bohm, V.A. Naletova, J. Popp [et al.] // J. of Magnetism and Magnetic Materials. – 2015. – Vol. 395. – P. 67–72.

5. Котур В.И. Электрические измерения и электрические приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Юрайт, 2014. – 318 с.
7. Stepanov G.V., Chertovich A.V., Kramarenko E.Y. Magnetorheological and deformation properties of magnetically controlled elastomer with hard magnetic filler // *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2012. – Vol. 324. – P. 3448–3451.
8. Magnetization reversal of ferromagnetic nanoparticles induced by a stream of polarized electrons / M.A. Kozhushner, A.K. Gatin, M.V. Grishin [et al.] // *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2016. – Vol. 414. – P. 38–44.
9. Magnetic and mössbauer spectroscopy studies of hollow microcapsules made of silica-coated CoFe_2O_4 nanoparticles / I.S. Lyubutin, N.E. Gervits, S.S. Starchikov [et al.] // *Smart Materials and Structures*. – 2015. – Vol. 25, no. 1. – P. 015022.
10. Brigadnov I.A., Dorfmann A. Mathematical modeling of magneto-sensitive elastomers // *Int. J. Solid. Struct.* – 2003. – Vol. 40. – P. 4659–4674.
11. Multifunctional properties related to magnetostructural transitions in ternary and quaternary heusler alloys / I. Dubenko, A. Quetz, S. Pandey [et al.] // *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2015. – Vol. 383. – P. 186–189.
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 Struct.* – 2015. – Vol. 24. – P. 035002.
13. Ronald G. Larson the structure and rheology of complex fluids. – NY: Oxford University Press, 1999. – 682 p.
14. Смык А.Ф. Физика: курс лекций / МАДИ. – М., 2016. – 293 с.
15. Dzade N.Y., Roldan A., de Leeuw N.H. A density functional theory study of the adsorption of benzene on hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) surfaces // *J. Minerals*. – 2014. – Vol. 4. – P. 89–115.
16. Виноградов Н.В. Как самому рассчитать и сделать электродвигатель. – М.: Энергия, 1974. – 168 с.
17. Магнитореологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы золотника: пат. 2634163 Рос. Федерация / Найгерт К.В., Редников С.Н. – Опубл. 24.10.2017, Бюл. № 30.
18. Naigert K.V., Tselishev V.A. Hardware implementation of automatic control system for new generation magnetorheological supports // *Proc. of the 4th Int. Conf. on Indust. Eng. ICIE 2018. Lecture Notes in Mech. Eng.* – Springer, Cham, 2019. – P. 2219–2228.
19. Naigert K.V., Tselishev V.A. New generation magnetorheological, magnetodynamic, and ferrofluid control devices with nonstationary electromagnetic fields // *Proc. of the 4th Int. Conf. on Indust. Eng. ICIE 2018. Lecture Notes in Mech. Eng.* – Springer, Cham, 2019. – P. 1375–1384.
20. Магнитореологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы с гидравлическим мостиком: пат. 2634166 Рос. Федерация / Найгерт К.В., Редников С.Н. – Опубл. 24.10.2017, Бюл. № 30.
21. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок – М.: Физматлит, 2010. – 288 с.
22. Такетоми С., Тикадзumi С. Магнитные жидкости. – М.: Мир, 1993. – 272 с.
23. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
24. Naigert K.V. The rotating magnetorheological fluid technologies in actuators of industrial automation systems // *Innov. in Modern Sci.* – Neftekamsk: Scientific Publish. Center “World of Science”; Praha: Publish. house “Osvícení”, 2017. – P. 102–113.
25. Naigert K.V. The realization principles of new generation magnetorheological systems // *Modern Sci.: Current Iss. and Develop. Prosp.* – Neftekamsk: Scientific Publish. Center “World of Science”; Sofia: Publish. house “SORoS”, 2017. – P. 132–147.

References

1. Belyaev A.V., Smorodin B.L. Konvektsiya magnitnoy zhidkosti pod deystviyem peremennogo magnitnogo polya [Convection of magnetic fluid under the action of an alternating magnetic field]. *Applied mechanics and technical physics*, 2009, Vol. 50, no. 4, pp. 18–27.

2. Lebedev A.V. Dinamika magnitnoy zhidkosti v peremennykh polyakh [Magnetic fluid dynamics in variable fields]. Ph.D. Thesis, 2005, 20 p.
3. Grunin A.A., Mukha I.R., Chetvertukhin A.V., Fedyanin A.A. Refractive Index Sensor Based on Magnetoplasmonic Crystals // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 415, pp. 72-76
4. 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.
5. Kotur V.I. Elektricheskiye izmereniya i elektricheskiye pribory [Electrical measurements and electrical appliances]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 400 p.
6. Bessonov L.A. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoye pole [Theoretical foundations of electrical engineering]. Electromagnetic field, Moscow: Yurayt, 2014, 318 p.
7. 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.
8. Kozhushner M.A., Gatin A.K., Grishin M.V. et al. Magnetization reversal of Ferromagnetic Nanoparticles Induced by a Stream of Polarized Electrons // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 414, pp. 38-44.
9. Lyubutin I.S., Gervits N.E., Starchikov S.S. et al. Magnetic and Mössbauer Spectroscopy Studies of Hollow Microcapsules Made of Silica-Coated CoFe₂O₄ Nanoparticles // *Smart Materials and Structures*, 2015, vol. 25, no. 1, pp. 015022.
10. Brigadnov I.A., Dorfmann A. Mathematical Modeling of Magneto-Sensitive Elastomers // *Int. J. Solid. Struct.*, 2003, vol. 40, pp. 4659-4674.
11. Dubenko I., Quetz A., Pandey S. et al. Multifunctional Properties Related to Magnetostructural Transitions in Ternary and Quaternary Heusler Alloys // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, vol. 383, pp. 186-189.
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, pp. 035002.
13. Ronald G. Larson The Structure and Rheology of Complex Fluids. NY: Oxford University Press, 1999, 682 p.
14. Smyk A.F. Fizika. Kurs lektsiy [Physics. Lecture course]. Moscow: MADI, 2016, 293 p.
15. Dzade N.Y., Roldan A., de Leeuw N.H. A Density Functional Theory Study of the Adsorption of Benzene on Hematite (α -Fe₂O₃) Surfaces // *J. Minerals*, 2014, vol. 4, pp. 89-115.
16. Vinogradov N.V. Kak samomu rasschitat i sdelat elektrodvigatel [How to calculate and make the electric motor]. Moscow: Energy, 1974, 168 p.
17. Naigert K.V., Rednikov S.N. Magnitoreologicheskiy privod pryamogo elektromagnitnogo upravleniya kharakteristikami potoka verkhnego kontura gidravlicheskoj sistemy zolotnika [The magnetorheological drive for directly electromagnetically controlling flow characteristics of an upper contour of a hydraulic slide-valve system]. RU Patent no. 2634163, Oct. 2017, bul. no. 30.
18. Naigert K.V., Tselishev V.A. Hardware Implementation of Automatic Control System for New Generation Magnetorheological Supports. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018 // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2019, pp. 2219-2228.
19. Naigert K.V., Tselishev V.A. New Generation Magnetorheological, Magnetodynamic, and Ferrofluid Control Devices with Nonstationary Electromagnetic Fields. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018 // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2019, pp. 1375-1384.
20. Naigert K.V., Rednikov S.N. Magnitoreologicheskiy privod pryamogo elektromagnitnogo upravleniya kharakteristikami potoka verkhnego kontura gidravlicheskoj sistemy s gidravlicheskim mostikom [The magnetorheological drive for directly electromagnetically controlling flow characteristics of an upper contour of a hydraulic system which includes a hydraulic bridge]. RU Patent № 2634166, Oct. 2017, bul. no. 30.
21. Mitrofanova O.V. Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov v kanalakh yadrono-energeticheskikh ustanovok [Hydrodynamics and heat transfer of swirling flows in channels of nuclear power plants]. Moscow, PHYSMATLIT, 2010, 288 p.
22. Taketomi S., Tikadumi S. Magnetic fluids [The Magnetic Fluids]. Moscow: Mir, 1993, 272 p.
23. Landau L.D., Lifshitz E.M. Gidrodinamika [Hydrodynamics]. Moscow: Nauka, 1986, 736 p.

24. Naigert K.V. The rotating magnetorheological fluid technologies in actuators of industrial automation systems // Innovations in modern science, Neftekamsk: Scientific Publishing Center «World of Science», Praha: Publishing house «Osvícení», 2017, pp. 102-113.

25. Naigert K.V. The realization principles of new generation magnetorheological systems // Modern science: current issues and development prospects, Neftekamsk: Scientific Publishing Center “World of Science”, Sofia: Publishing house “SORoS”, 2017, pp. 132-147.

Сведения об авторах

Найгерт Катарина Валерьевна (Челябинск, Россия) – кандидат технических наук, докторант кафедры «Автомобильный транспорт» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет», старший научный сотрудник ООО НПО «Авионика и Мехатроника» (454084, г. Челябинск, ул. Калинина, д. 16; e-mail: kathy_naigert@mail.ru).

Целищев Владимир Александрович (Уфа, Россия) – доктор технических наук, профессор, зав-кафедрой «Прикладная гидромеханика» ФГБОУ ВО УГАТУ (450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12; e-mail: pgl.ugatu@mail.ru).

About the authors

Katharina V. Naigert (Chelyabinsk, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences of Road Transport Department, South Ural State University, Senior Researcher, Scientific and Production Enterprise “Avionics and Mechatronics” (16, Kalinina st., Chelyabinsk, 454084, Russian Federation; e-mail: kathy_naigert@mail.ru).

Vladimir A. Tselischev (Ufa, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Applied Hydromechanics Department, Ufa State Aviation Technical University (12, K. Marksa st., Ufa, 450008, Russian Federation; e-mail: pgl.ugatu@mail.ru).

Получено 13.05.2019