

ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПОТОКА ПОСРЕДСТВОМ ИЗМЕНЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАБОЧИХ СРЕД

К.В. Найгерт, С.Н. Редников

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Анализируются недостатки, присущие классическим гидравлическим дросселирующим устройствам, применяемым в различных прецизионных системах. Авторами рассматриваются существующие методы управления потоком жидкой среды посредством изменения гидродинамического сопротивления рабочей жидкости гидравлической системы. Описываются физические основы реализации управления гидродинамическим сопротивлением магнитореологических и электрореологических рабочих сред. Производится анализ преимуществ использования подобных систем по сравнению с классической запорно-регулирующей гидравлической аппаратурой. Оцениваются преимущества применения магнитореологических регулирующих устройств по сравнению с электрореологическими регулируемыми устройствами.

На примере магнитореологических систем приводится метод расчета статических характеристик дросселирующих устройств, работающих за счет изменения гидродинамического сопротивления рабочей среды гидравлической системы. Приводится перечень исследований физико-химических свойств частиц магнетика, необходимых в определении параметров, требуемых для расчета управляющего сигнала. Представлены результаты, полученные при проведении сканирующей электронной микроскопии пробы магнитных частиц и спектроскопии магнитных частиц.

Авторами описываются методы комбинированного управления расходными характеристиками потока посредством изменения реологических свойств рабочих сред. Рассматривается прикладное значение исследований неньютоновских свойств рабочих сред. Авторы приводят пример моделирования требуемых неньютоновских свойств магнитореологической жидкости за счет применения в качестве жидкости носителя дилатантной среды. Указываются преимущества, достигаемые при использовании подобных методов комбинированного управления расходными характеристиками потока посредством изменения реологических свойств рабочих сред и простейшие способы реализации описанных методов.

Предлагается более эффективный метод комбинированного управления расходными характеристиками потока посредством вращающегося управляющего поля и дается обоснование возникающему физическому эффекту.

Ключевые слова: магнитореологические регулирующие устройства, электрореологические регулирующие устройства, дилатантные среды, реологические свойства.

Введение. Широко применяемые на сегодняшний день методы дросселирования в классической гидравлике обладают рядом существенных недостатков. Прежде всего, это связано с наличием прецизионных механических запорно-регулирующих элементов, посредством которых производится регулирование расходных характеристик и достижение требуемого перепада давления на дросселе. Прецизионные механические запорно-регулирующие элементы обладают высокой стоимостью производства, а некоторые из них, например, золотниковые пары еще и отличаются достаточно сложной технологией изготовления. Механические запорно-регулирующие элементы для поддержания высокого уровня надежности требуют систематического сервисного обслуживания, что связано с дополнительными расходами на ремонтно-наладочные мероприятия и простоем оборудования. Кроме того механические подвижные элементы обладают инерционной массой, вследствие чего происходит некоторая задержка отработки управляющего сигнала и снижение быстродействия системы в целом [1–3].

Также для механических запорно-регулирующих элементов распространенной проблемой является изменение со временем их рабочих характеристик, и даже потеря прецизионной парой герметичности. Подобные изменения геометрии проточной части являются следствием эрозии.

Существенными являются и потери энергии, происходящие в результате преобразования электрического сигнала управления в механическую энергию с последующей ее трансформацией при создании гидравлического сопротивления канала.

1. Постановка задачи. Очевидно, что существует потребность в повышении надежности, ресурса и прецизионности запорно-регулирующих элементов гидравлических систем, а также необходимость разработки конструкций запорно-регулирующих элементов и новых методов управления характеристиками потока рабочей среды, позволяющих упростить технологии изготовления запорно-регулирующих элементов и снизить затраты на их производство и сервисное обслуживание.

2. Решение поставленной задачи. Значительный вклад в решение выше перечисленных проблем может внести применение альтернативных методов дросселирования [4–21]: магнито-реологических дросселирующих устройств и электрореологических дросселирующих устройств.

В подобных альтернативных устройствах дросселирования происходит изменение параметров потока за счет воздействия на реологические характеристики рабочих сред, а именно за счет реализации изменения гидродинамического сопротивления рабочих сред. В качестве рабочих сред, способных менять свои реологические свойства, применяются магнито-реологические и электрореологические жидкости.

Магнито-реологическая жидкость представляет собой частицы магнетика, стабилизированные в немагнитной жидкости носителе. Как правило, в качестве магнетика используются магнитные модификации различных оксидов металлов.

Электрореологическая жидкость состоит из частиц с повышенной диэлектрической проницаемостью, стабилизированных в жидкости носителе с низкой диэлектрической проницаемостью.

Наиболее хорошо исследованными и получившими распространение являются магнито-реологические системы. Прежде всего, электрическое поле является одной из двух компонент электромагнитного поля, представляющей собой векторное поле, существующее вокруг тел или частиц, обладающих электрическим зарядом. Поэтому электромагнитное поле позволяет эффективно осуществлять воздействие на мультипольные электрические моменты частиц.

Очевидно, что применение магнито-реологических систем по сравнению с электрореологическими системами предоставляет возможность управлять реологическими характеристиками рабочей среды посредством воздействия, как на мультипольные электрические моменты, так и на магнитные моменты частиц. Следовательно, использование электромагнитного поля значительно расширяет возможности воздействия управляющих полей на реологические характеристики рабочих сред.

Для определения изменения вязкости магнито-реологической среды применимо уравнение [22]:

$$\eta^* = \eta_c + \frac{1}{4} \frac{\tau M_0(H_0)}{1 + (\tau \tau_S H_0 M_0(H_0)) / J}, \quad (1)$$

где η – вязкость; $\tau \tau_S$ – время релаксации немагнитных и магнитных частиц; ρ – плотность; J – момент инерций частиц; H_0 – напряженность магнитного поля; M_0 – намагниченность.

Уравнение (1) позволяет учитывать влияние физико-химических свойств частиц магнито-реологической среды на отклик на управляющий сигнал.

В рамках упрощенного инженерного расчета зависимость основных параметров потока магнито-реологической среды на местном сопротивлении можно описать при помощи выражений (2) и (3):

Перепад давления:

$$\Delta p = \frac{C_D l v}{d_3^2} \left(\eta_c + \frac{1}{4} \frac{\tau M_0(H_0)}{1 + (\tau \tau_S H_0 M_0(H_0)) / J} \right) / \rho, \quad (2)$$

где l – длина; v – скорость; d_3 – диаметр; C_D – коэффициент расхода дросселя.

Расход через рабочее сечение:

$$Q = \frac{\text{Re} \left(\eta_c + \frac{1}{4} \frac{\tau M_0(H_0)}{1 + (\tau \tau_S H_0 M_0(H_0)) / J} \right) / \rho}{\rho r} \cdot S_{др}, \quad (3)$$

где r – радиус; $S_{др}$ – площадь сечения; Re – критерий Рейнольдса.

Расчет и конструирование

В случае применения магнитореологической жидкости собственного производства необходимо производить ряд лабораторных исследований, позволяющих установить требуемые физико-химические параметры рабочей среды. Также многие производители магнитореологической жидкости часто не предоставляют достаточной информации о размерах и форме магнитных частиц. Так как в магнитореологических системах производится прямое электромагнитное управление характеристиками потока для расчета управляющего поля необходимо определить содержание частиц магнетика в рабочей среде и их качественно-количественный состав, а также их геометрические параметры [23–26].

В результате исследования образца магнитореологической рабочей среды получены следующие результаты:

Объемное содержание магнитных частиц в магнитореологической жидкости – 5 %.

По результатам спектроскопии магнитных частиц (рис. 1), магнитные частицы, содержащиеся в магнитореологической среде – магнетит (Fe_3O_4) с незначительным количеством примесей Cr, Fe, Co, O (см. таблицу).

Спектроскопия магнитных частиц

Спектр	В стат.	O	Na	Al	Si	Ca	Cr	Fe	Co	Итого
Спектр 1	Да	27,94	2,96	0,49	0,26	0,36	0,27	67,17	0,55	100,00 %

Примечание. Результаты приведены в весовых %. Cr, Fe, Co, O – компоненты магнитных частиц. Остальные элементы – случайные примеси и компоненты различных, стабилизирующих или кондиционирующих присадок, а следы Al частично происходят от подложки.

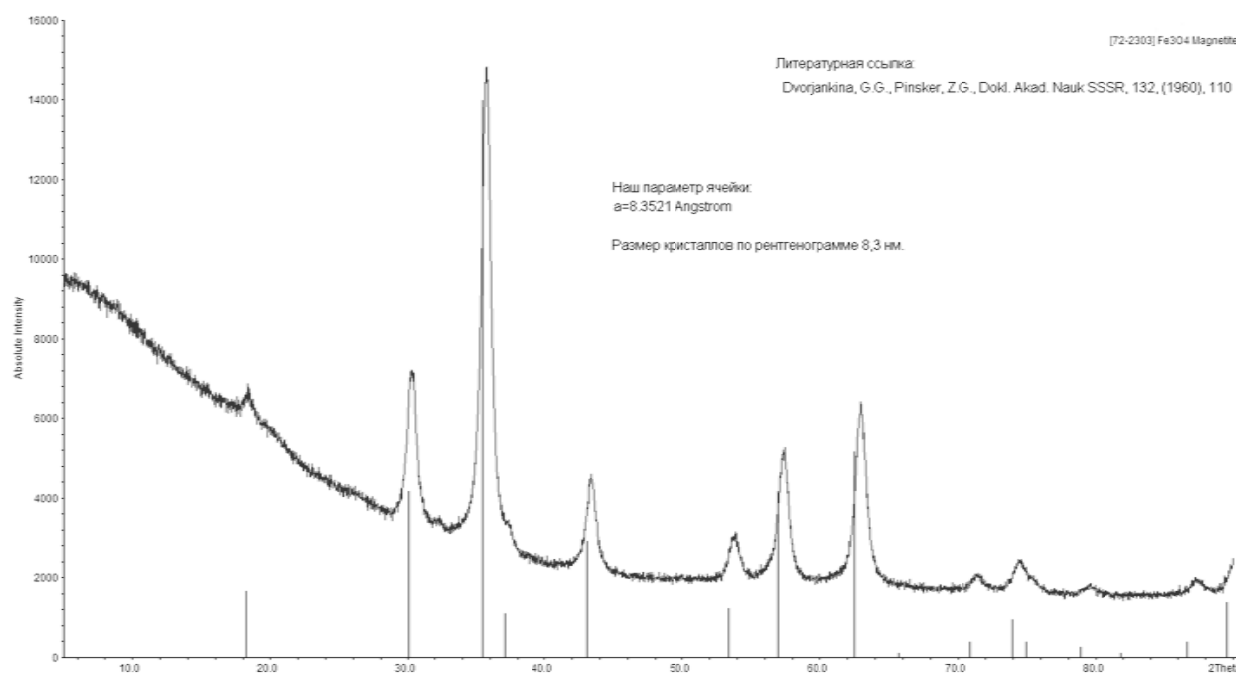


Рис. 1. Спектроскопия магнитных частиц

Для определения размера и формы частиц магнетика проведена сканирующая электронная микроскопия.

По данным сканирующей электронной микроскопии пробы магнитных частиц определен размер частиц магнетита, значение которого находится в интервале 10–50 нм, рис. 2–5 (изображения получены после прокаливании исследуемой пробы при 1000 °С).

Основной реологической характеристикой рабочей среды является вязкость, следовательно, для расчета управляющего поля необходимо определять значения начальной вязкости магнитореологических жидкостей. Для этого желательно проводить измерения вязкости магнитореологической жидкости при заданной рабочей температуре, так как для многокомпонентных неньютоновских жидкостей зависимость вязкостных свойств от температуры не всегда линейна, что связано с зависимостью температуропроводности веществ от их температуры.



Рис. 2. Изображение получено при сканирующей электронной микроскопии магнитных частиц (× 50.000; 20.0kV COMPO)



Рис. 3. Изображение получено при сканирующей электронной микроскопии магнитных частиц (× 100.000; 20.0kV COMPO)

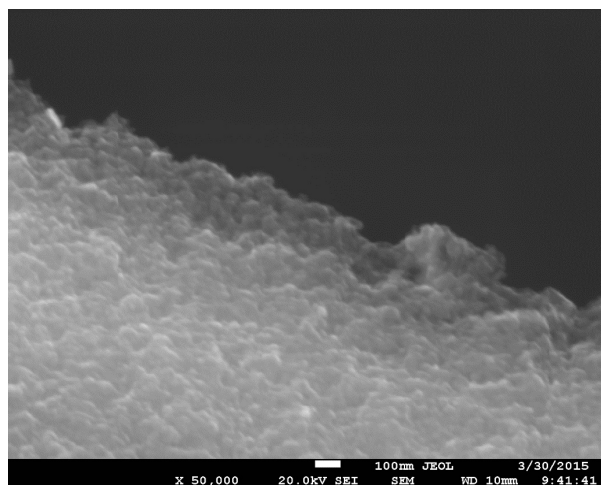


Рис. 4. Изображение получено при сканирующей электронной микроскопии магнитных частиц (× 50.000; 20.0kV SEI)

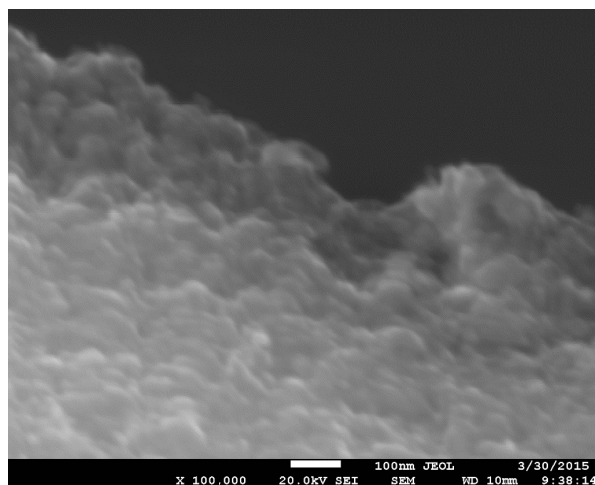


Рис. 5. Изображение получено при сканирующей электронной микроскопии магнитных частиц (× 100.000; 20.0kV SEI)

Учитывая, что вязкость рабочей среды зависит от ее температуры (так как термодинамические факторы существенно влияют на кинетическую энергию потока) управление реологическими свойствами рабочей жидкости возможно также за счет осуществления термостатирования рабочей среды. Увеличение кинетической энергии потока происходит в результате воздействия различных факторов: отвода жидкостью тепла от пар трения, трения жидкости о стенки проточной части и гидродинамического трения внутри объема – все это приводит к значительному нагреву рабочей среды. Очевидно и то, что при воздействии на электрореологическую или магнитореологическую жидкости внешних электрических или магнитных полей, а также динамических нагрузок и сил трения, происходит повышение температуры рабочей среды. Конструктивно реализовать данный метод управления реологическими свойствами рабочей среды можно путем установки теплообменника на входе в проточную часть магнитореологического или электрореологического регулирующего устройства.

Возможно также дополнительное управление реологическими свойствами рабочей среды.

Одним из подобных вариантов управления реологическими свойствами рабочей среды может являться придание рабочей среде определенных неньютоновских свойств [16–17]. Данное дополнительное комбинированное управление реологическими свойствами рабочей среды реализуемо посредством введения в нее добавок, придающих жидкостям дилатантные свойства.

Расчет и конструирование

Вязкость подобных реологических систем будет возрастать при увеличении скорости деформации сдвига, повышая гидродинамическое сопротивление потока рабочей среды (рис. 6).

Применение дилатантных жидкостей носителей в сочетании с магнитными частицами позволяет получать рабочие магнитореологические среды с оригинальными физическими свойствами. Так как дилатантные свойства жидкости носителя потенцируют повышение вязкости магнитореологической среды во внешнем магнитном поле.

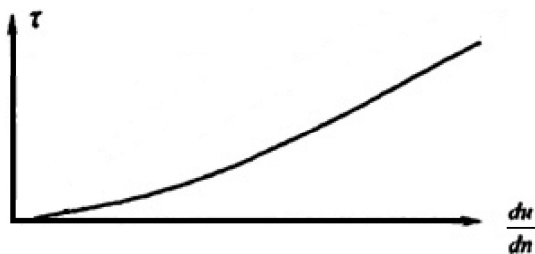


Рис. 6. Кривая течения дилатантной жидкости

При повышении вязкости электрореологических или магнитореологических сред в управляющем поле, происходит усиление межмолекулярного взаимодействия, что приводит к росту напряжений внутри объема рабочей жидкости и увеличивает деформацию молекул дилатантного вещества, потенцируя дополнительный рост вязкости рабочей среды.

Еще одним комбинированным методом управления магнитореологической средой может являться метод создания вращающегося управляющего поля. Вращающееся управляющее поле позволяет создавать эффект гидродинамического запираания потока магнитореологической среды за счет придания частицам магнетика окружной составляющей вектора скорости, что инициирует вихревое движение частиц. Следовательно, вращающееся магнитное поле ориентирует частицы магнетика в пространстве и задает им угловую скорость.

3. Расчетные зависимости. Установлено, что в объеме магнитореологической жидкости наблюдается асимметрия в тензоре напряжения, обусловленная вращательными движениями магнитных частиц, находящихся в данном объеме, влияние которых на тензор напряжения можно выразить через член [22]:

$$S - I\omega.$$

Аналог уравнения Навье–Стокса для магнитореологической жидкости:

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla \left[p + \frac{S(S - I\omega)}{I} \right] + \eta \nabla^2 v + \left(\xi + \frac{\eta}{3} \right) \nabla (\nabla \cdot v) + (M \nabla) H + \frac{1}{2\tau_S} \nabla \times (S - I\omega), \quad (4)$$

где S – объемная плотность внутреннего момента импульса; I – суммарный момент инерций частиц; Ω – вектор средней угловой скорости собственного вращения частиц; ∇ – оператор набла; η – коэффициент сдвиговой вязкости, ξ – коэффициент объемной вязкости.

Угловая скорость вращения элементарного объема магнитореологической жидкости в потоке:

$$\omega = \frac{\text{rot} v}{2}. \quad (5)$$

Полный тензор напряжений в магнитореологической жидкости:

$$\sigma_{ij} = \left[p + \frac{S(S - I\omega)}{I} + \left(\frac{2}{3} \eta - \xi \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right] \delta_{ij} + \eta \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{2\tau_S} (S_{ij} - I\omega_{ij}) + \left[H_i B_j - \frac{1}{2} (HB) \delta_{ij} \right], \quad (6)$$

где δ_{ij} – число Кронекера.

Таким образом, применение вращающегося управляющего поля усиливает асимметрию в тензоре напряжения объема магнитореологической жидкости. Поэтому использование вращающегося управляющего поля даже при применении стандартной магнитореологической жидкости позволяет значительно расширить диапазон регулирования ее вязкости. А сочетание добавления дилатантных присадок к магнитореологическим средам с применением вращающегося управляющего поля более эффективно повышает вязкость рабочей среды, чем приложение к объему дилатантного вещества внешней деформирующей силы. Возникновение вихря увеличивает асимметрию в тензоре напряжения, поэтому придавая угловую скорость и организуя вращение объема магнитореологической жидкости в потоке, создаются сдвиговые межмолекулярные деформации в объеме рабочей среды, которые приводят к росту вязкости дилатантной жидкости носителя.

Заключение. Существуют различные методы реализации управления расходными характеристиками потока посредством изменения реологических свойств рабочих сред, некоторые из которых уже широко применяются и успели себя хорошо зарекомендовать. Использование сис-

тем, осуществляющих регулируемое изменение гидродинамического сопротивления рабочей среды, позволяет значительно упростить геометрию проточной части запорно-регулирующих элементов, следовательно, упростить и их конструкции. Также подобные системы исключают промежуточную трансформацию энергии.

Все это позволяет существенно повысить надежность, прецизионность и быстродействие запорно-регулирующей аппаратуры и снизить затраты на ее производство и сервисное обслуживание.

Литература

1. Попов, Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем / Д.Н. Попов. – М.: Машиностроение, 1976. – 424 с.
2. Свешиников, В.К. Станочные гидроприводы / В.К. Свешиников, А.А. Усов. – М.: Машиностроение, 1988. – 512 с.
3. Чупраков, Ю.И. Гидропривод и средства гидроавтоматики / Ю.И. Чупраков. – М.: Машиностроение, 1979. – 232 с.
4. Смык, А.Ф. Физика. Электромагнетизм. Курс лекций / А.Ф. Смык. – М.: МГУП, 2007. – 160 с.
5. Steven, R.A. A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials / R.A. Steven, A.S. Henry // *Smart Mater. Struct.* – 2007 – Vol. 16, № 1. – P. 43–50. DOI: 10.1088/0964-1726/16/3/R01
6. Денисов, А.А. Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматики / А.А. Денисов, В.С. Нагорный. – Л.: Машиностроение, 1979. – 257 с.
7. *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, № 4. – P. 336–341. DOI: 10.1002/mame.200900301
8. *Magnetization reversal of Ferromagnetic Nanoparticles Induced by a Stream of Polarized Electrons* / M.A. Kozhushner, A.K. Gatin, M.V. Grishin et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2016. – Vol. 414. – P. 38–44. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.04.045
9. *Martinez, B. Magnetic Properties of Gamma-Fe₂O₃ Nanoparticles Obtained by Vaporization Condensation in a Solar Furnace* / B. Martinez, A. Roig, X. Obradors // *J. Appl. Phys.* – 1996. – Vol. 79. – P. 2580–2586. DOI: 10.1063/1.361125
10. *Magnetic and Mössbauer Spectroscopy Studies of Hollow Microcapsules Made of Silica-Coated CoFe₂O₄ Nanoparticles* / I.S. Lyubutin, N.E. Gervits, S.S. Starchikov et al. // *Smart Materials and Structures*. – 2015. – Vol. 25, № 1. – P. 015022. DOI: 10.1088/0964-1726/25/1/015022
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. *Multifunctional Properties Related to Magnetostructural Transitions in Ternary and Quaternary Heusler Alloys* / I. Dubenko, A. Quetz, S. Pandey et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2015. – Vol. 383. – P. 186–189. DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.10.083
13. Фройштетер, Г.Б. Течение и теплообмен неньютоновских жидкостей в трубах / Г.Б. Фройштетер, С.Ю. Данилевич, Н.В. Радионова. – Киев: Наукова думка, 1990. – 216 с.
14. *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
15. *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
16. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 216 с.
17. *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
18. *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
19. *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

20. *Refractive Index Sensor Based on Magnetoplasmonic Crystals* / A.A. Grunin, I.R. Mukha, A.V. Chetvertukhin, A.A. Fedyanin // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2016. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.03.069

21. *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

22. *Такетоми, С. Магнитные жидкости* / С. Такетоми, С. Такадзуми. – М.: Мир, 1993. – 272 с.

23. *New Manganite-Based Mediators for Self-Controlled Magnetic Heating* / O.A. Shlyakhtin, V.G. Leontiev, O. Young-Jei, A.A. Kuznetsov // *Smart Materials and Structures*. – 2007. – Vol. 16, № 5. – P. 35–39. DOI: 10.1088/0964-1726/16/5/N02

24. *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

25. *Carlson, J.D. MR Fluid, Foam and Elastomer Devices* / J.D. Carlson, M.R. Jolly // *Mechanics*. – 2000. – Vol. 10. – P. 555–569. DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00064-1

26. *Magneto Caloric Properties of Manganese (III) Porphyrins Bearing 2,6-Di-Tert-Butylphenol-groups* / V.V. Korolev, T.N. Lomova, A.N. Maslennikova et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2016. – Vol. 401. – P. 86–90. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.10.014

Найгерт Катарина Валерьевна, соискатель кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, kathy_naigert@mail.ru.

Редников Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, srednikov@mail.ru.

Поступила в редакцию 28 апреля 2016 г.

DOI: 10.14529/engin160206

THE TECHNOLOGIES OF THE MANAGEMENT OF FLOW CHARACTERISTICS BY MODIFYING THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF THE WORKING ENVIRONMENT

K.V. Naigert, kathy_naigert@mail.ru,

S.N. Rednikov, srednikov@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper analyzes the disadvantages of inherent to the classic hydraulic throttling devices which is used in various high-precision systems. The authors examine the existing methods of fluid flow control by changing the flow resistance of hydraulic fluid. It describes the physical basis of the implementation for management of hydrodynamic resistance by magnetorheological and electrorheological environments. It is analyzed the benefits of using these systems in comparison with conventional hydraulic throttling equipment. It is estimated the advantages of using the magnetorheological control devices compared to the electrorheological control devices.

In the example of magnetorheological systems it is provided the method for calculating the static characteristics of throttling devices which are operated by changing the flow resistance of the working fluid in the hydraulic system. It presents the investigations of important physical and chemical properties of the magnetic particles. These properties are required in determining the essential parameters for the calculation of the control signal. The results are obtained by carrying out of scanning electron microscopy of magnetic particles and spectroscopy of magnetic particles.

The authors describe the combined methods of management of flow characteristics by modifying the rheological properties of the working environments.

It is provided the practical importance of the investigations of non-Newtonian properties of the working fluids.

The authors cite the example of the required simulation of non-Newtonian properties of the magnetorheological fluid. It gets possible due to use a dilatant fluid as carrier liquid. It is indicated the advantages achieved by the using such combined control methods of flow characteristics by modifying the rheological properties of the working media and described easy way to implement of these methods.

It is proposed the more efficient combined method of management of the flow characteristics by the rotating control field and the substantiation of the physical effects arising.

Keywords: magnetorheological control devices, electrorheological control devices, dilatant medium, rheological properties.

References

1. Popov D.N. *Dinamika i regulirovaniye gidro- i pnevmosistem* [Dynamics and Regulation of Hydraulic and Pneumatic Systems]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1976. 424 p.
2. Sveshnikov V.K., Usov A.A. *Stanochnyye gidroprivody* [Machine Tool Hydraulic Drives]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1988. 512 p.
3. Chuprakov Yu. I. *Gidroprivod i sredstva gidroavtomatiki* [Hydraulic Drive and Hydro Automation]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1979. 232 p.
4. Smyk A.F. *Fizika. Elektromagnetizm. Kurs lektsiy* [Physics. Electromagnetism. Lectures]. Moscow, MGUP, 2007. 160 p.
5. Steven R.A., Henry A.S. A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials. *Smart Mater. Struct.*, 2007, vol. 16, no. 1, pp. 43–50. DOI: 10.1088/0964-1726/16/3/R01
6. Denisov A.A., Nagornyy V.S. *Elektro Gidro- i elektrogazodinamicheskiye ustroystva avtomatiki* [Electro Hydro- and Electro Gas Dynamic Automation]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1979. 257 p.
7. 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
8. Kozhushner M.A., Gatin A.K., Grishin M.V. Magnetization reversal of Ferromagnetic Nanoparticles Induced by a Stream of Polarized Electrons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 414, pp. 38–44. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.04.045
9. Martinez B., Roig A., Obradors X. Magnetic Properties of Gamma-Fe₂O₃ Nanoparticles Obtained by Vaporization Condensation in a Solar Furnace. *J. Appl. Phys.*, 1996, vol. 79, pp. 2580–2586. DOI: 10.1063/1.361125
10. Lyubutin I.S., Gervits N.E., Starchikov S.S. 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. DOI: 10.1088/0964-1726/25/1/015022
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. Dubenko I., Quetz A., Pandey S. Multifunctional Properties Related to Magnetostructural Transitions in Ternary and Quaternary Heusler Alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, vol. 383, pp. 186–189. DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.10.083
13. Frayshteter G.B., Danilevich S.Y., Rodionova N.V. *Techeniye i teploobmen nen'yutonovskikh zhidkostey v trubakh*. [Flow and Heat Transfer of Non-Newtonian Fluids in the Pipes]. Kiev, Naukova dumka, 1990. 216 p.
14. Kramarenko E.Y., Chertovich A.V., Stepanov G.V. Magnetic and Viscoelastic Response of Elastomers with Hard Magnetic Filler. *Smart Materials and Structures*, 2015, vol. 24, pp. 035002. DOI: 10.1088/0964-1726/24/3/035002
15. 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
16. Wilkinson W.L. *Nen'yutonovskiy zhidkosti* [Non-Newtonian Fluids]. Moscow, Mir, 1964. 216 p.

17. 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
18. 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
19. Bustamante R., Dorfmann A., Ogden R.W. On Variational Formulations in Nonlinear Magnetoelastostatics. *Math. Mech. Solids*, 2008, vol. 13, pp. 725. DOI: 10.1177/1081286507079832v1
20. 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. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.03.069
21. Filipcsei G., Zrínyi M. Magnetodeformation Effects and the Swelling of Ferrogels in a Uniform Magnetic Field. *J. Phys. Condens.*, 2010, Matter 22, pp. 276001. DOI: 10.1088/0953-8984/22/27/276001
22. Taketomi S., Tikadzumi S. *Magnitnyye zhidkosti* [The Magnetic Fluids]. Moscow, Mir, 1993. 272 p.
23. Shlyakhtin O.A., Leontiev V.G., Young-Jei O., Kuznetsov A.A. New Manganite-Based Mediators for Self-Controlled Magnetic Heating. *Smart Materials and Structures*, 2007, vol. 16, no. 5, pp. 35–39. DOI: 10.1088/0964-1726/16/5/N02
24. Bohm V., Naletova V.A., Popp J. 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
25. 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
26. Korolev V.V., Lomova T.N., Maslennikova A.N. Magneto Caloric Properties of Manganese (III) Porphyrins Bearing 2,6-Di-Tert-Butylphenolgroups. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 401, pp. 86–90. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.10.014

Received 28 April 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Найгерт, К.В. Технологии управления расходными характеристиками потока посредством изменения реологических свойств рабочих сред / К.В. Найгерт, С.Н. Редников // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 52–60. DOI: 10.14529/engin160206

FOR CITATION

Naigert K.V., Rednikov S.N. The Technologies of the Management of Flow Characteristics by Modifying the Rheological Properties of the Working Environment. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 52–60. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin160206
