

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЗНАЧЕНИЕ ГРАДИЕНТА СКОРОСТИ СДВИГА СЛОЕВ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

К.В. Найгерт¹, В.А. Целищев²

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

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

Потребность в совершенствовании приводов машин и механизмов требует постоянно-го развития альтернативных приводных технологий, в ряду которых находятся магнито-реологические, магнитодинамические и магнитожидкостные технологии. Магнито-реологические, магнитодинамические и магнитожидкостные устройства за последние годы успе-ли хорошо себя зарекомендовать, поэтому их дальнейшее развитие оценивается, как вполне рациональное решение. Перспективным инновационным направлением в привод-ных системах являются магнито-реологические приводы комбинированного типа. В подоб-ных приводных системах управление расходом магнито-реологической рабочей среды осуществляется не только за счет изменения ее вязкости, но и посредством генерации рео-логических эффектов. Очевидно, что в комбинированных магнито-реологических системах на магнито-реологическую рабочую жидкость оказывается дополнительное стороннее сдвиговое воздействие. Это вызывает потребность пересмотра подхода к оценке вязкости рабочей среды в магнито-реологических приводах комбинированного типа.

При расчете и моделировании традиционных магнито-реологических систем или маг-нито-реологических систем комбинированного типа важной задачей является оценка вяз-костных характеристик рабочей среды и прогнозирование возникновения в ней возмож-ных реологических аномалий. В статье описывается методика моделирования вязкостных свойств магнито-реологической рабочей среды. Отличительной особенностью предложен-ного метода является то, что он позволяет учитывать влияние внешних электромагнитных полей на градиент скорости сдвига слоев магнито-реологической жидкости. В тексте пред-ставлены результаты численного моделирования, выполненные в пакете прикладных про-грамм Matlab. Результаты компьютерного эксперимента показывают возможность пред-ложенного метода оценивать влияние внешних полей на значение смещения слоев под действием сдвиговых напряжений и электромагнитной составляющей. Это позволяет оп-ределять вероятное возникновение вязкопластичных, псевдопластичных и дилатантных свойств магнито-реологической рабочей среды и появление реологических эффектов, свой-ственных магнито-реологическим рабочим средам.

Ключевые слова: магнито-реологические регулирующие устройства, вязкопластичные среды, псевдопластичные среды, дилатантные среды, реологические свойства.

Введение

Гидравлические системы давно себя зарекомендовали как универсальные и надежные приво-ды исполнительных механизмов различного назначения [1–4]. В последние десятилетия в маши-ностроении и космической технике широкое распространение получили магнито-реологические приводные системы и системы охлаждения, использующие в качестве источников давления маг-нитодинамические насосные установки. Это обуславливает значительный рост интереса к иссле-дованиям, выполненным в направлении магнитодинамических или магнито-реологических уст-ройств и систем [5–6].

1. Постановка проблемы

При моделировании приводных систем, использующих в качестве кинематического звена рабочую жидкость, необходимо, прежде всего, оценивать реологические и энергетические процес-сы, протекающих в рабочей среде. Как известно именно в рабочей жидкости происходят про-цессы трансформации энергии и передача ее от источника давления к выходным звеньям. Осо-бенно важное значение оценка процессов трансформации энергии имеет для магнито-реологиче-ских приводных систем [7–24].

2. Методика прогнозирования реологических аномалий

Основными процессами трансформации энергии в рабочей среде являются изменения значений кинетической энергии и переходы ее в потенциальную энергию. Очевидно, что кинетическая энергия потока жидкой среды, прежде всего, зависит от его скоростных параметров. Для описания распределения скорости сдвига слоев принято использовать градиент скорости сдвига:

$$\gamma = \frac{dv}{dz}, \quad (1)$$

где v – скорость; z – смещение.

Также градиент скорости сдвига является основным параметром при расчете вязкостных характеристик жидких сред и их классификации: ньютоновские жидкости и неньютоновские.

Именно численная зависимость значений скорости деформации слоев жидкой среды и их смещения позволяет оценивать реологические свойства рабочей жидкости.

Для ньютоновских сред характерна линейная зависимость этих параметров, что иллюстрирует отсутствие в подобных средах реологических аномалий при их течении. Указанные зависимости принято описывать при помощи реологических моделей: степенного закона и Шведова–Бингама, в основе которых лежит определение значений градиента скорости сдвига. Для вязкопластичных, псевдопластичных и дилатантных сред зависимости скорости деформации и смещения имеют нелинейный характер, и их численные соотношения позволяют прогнозировать возможные реологические эффекты, свойственные указанным типам жидких сред [25].

Поэтому при описании течения магнито-реологических сред во внешних электромагнитных полях целесообразно оценивать влияние поля на градиент скорости сдвига слоев магнито-реологической жидкости.

Изменение скорости запишем в виде

$$v = e^{az+i} - 1, \quad (2)$$

где a – коэффициент, зависящий от реологических свойств исследуемой среды (степени проявления неньютоновских свойств), i – электромагнитная составляющая сдвига.

Тогда

$$\gamma = \frac{dv}{d(z+i)}, \quad (3)$$

где $z + i$ – смещение с учетом электромагнитной составляющей.

Силу электромагнитного давления представим как

$$P = \int_V \frac{qvB \sin \alpha}{S} dV, \quad (4)$$

где S – площадь; q – заряд; B – магнитная индукция; V – объем; α – угол между скоростью и магнитной индукцией.

Электромагнитное давление в расчете на количество молекул:

$$P_i = PnN_A, \quad (5)$$

где n – количество вещества; N_A – число Авогадро.

Электромагнитная составляющая сдвига:

$$i = \frac{Nt}{\beta P_i}, \quad (6)$$

где N – мощность; t – время; β – коэффициент жидкостного трения.

Подставив полученные значения градиент скорости, полученный для смещения с учетом электромагнитной составляющей в выражение, описывающее изменение вязкости во внешних магнитных полях [26],

$$\eta^* = \left(\frac{\tau_{сдв.}}{\dot{\gamma}} \right) + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s M(H))/J}, \quad (7)$$

где J – суммарный момент инерции частиц; τ_s – времена релаксации (немагнитных и магнитных частиц); M – напряженность магнитного поля; $\dot{\gamma}$ – градиент скорости, нормален к направлению движения; становится возможно произвести оценку вклада воздействия электромагнитного поля в генерацию реологических аномалий.

3. Результаты численного эксперимента

На рис. 1–6 представлены результаты численного эксперимента, проведенного в пакете прикладных программ Matlab, показывающие влияние внешнего электромагнитного поля на значения градиента скорости сдвига. Графические зависимости получены путем совместного решения уравнений (2)–(6), при дифференцировании уравнения (3) для заданного интервала значений

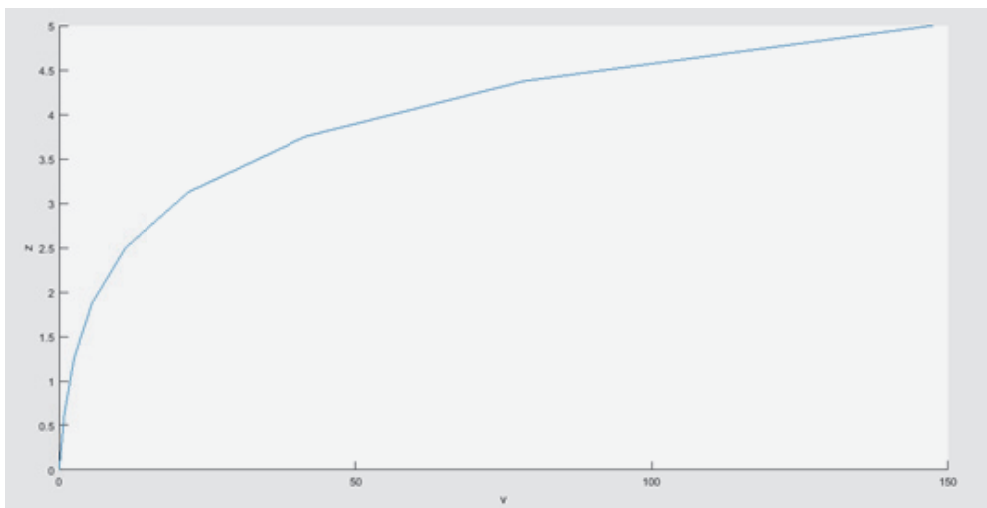


Рис. 1. Графическая зависимость скорости сдвига от смещения при степени проявления неньютоновских свойств $a = 1$ без учета электромагнитной составляющей сдвига i

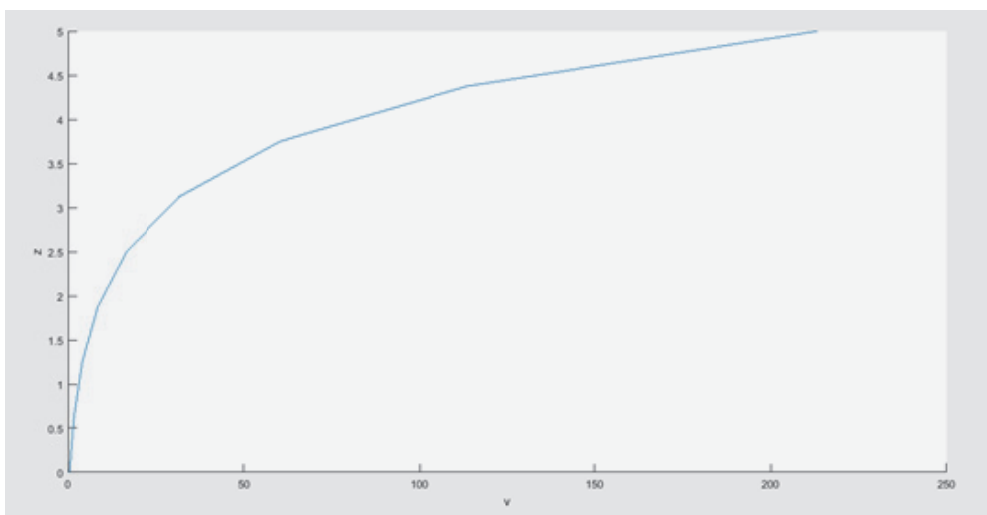


Рис. 2. Графическая зависимость скорости сдвига от смещения при степени проявления неньютоновских свойств $a = 1$ с учетом электромагнитной составляющей сдвига i

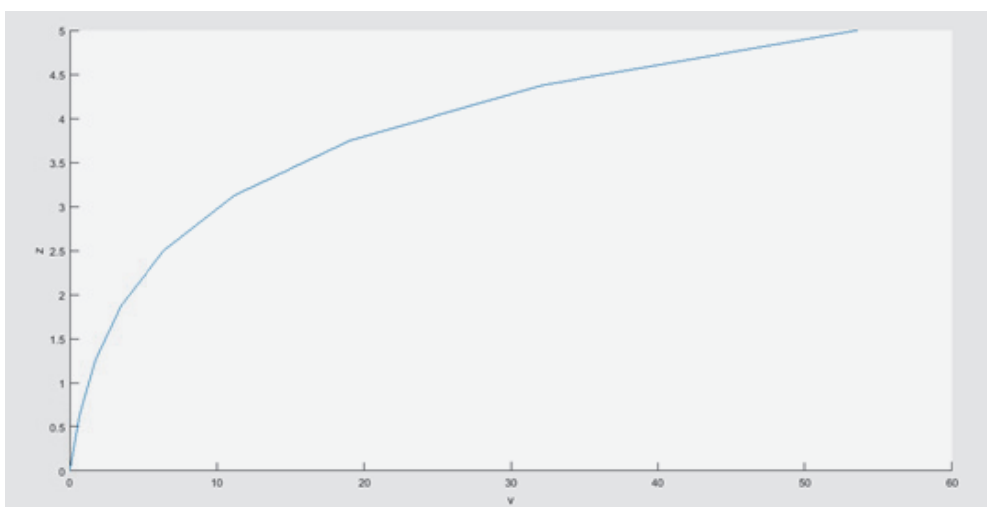


Рис. 3. Графическая зависимость скорости сдвига от смещения при степени проявления неньютоновских свойств $a = 0,8$ без учета электромагнитной составляющей сдвига i

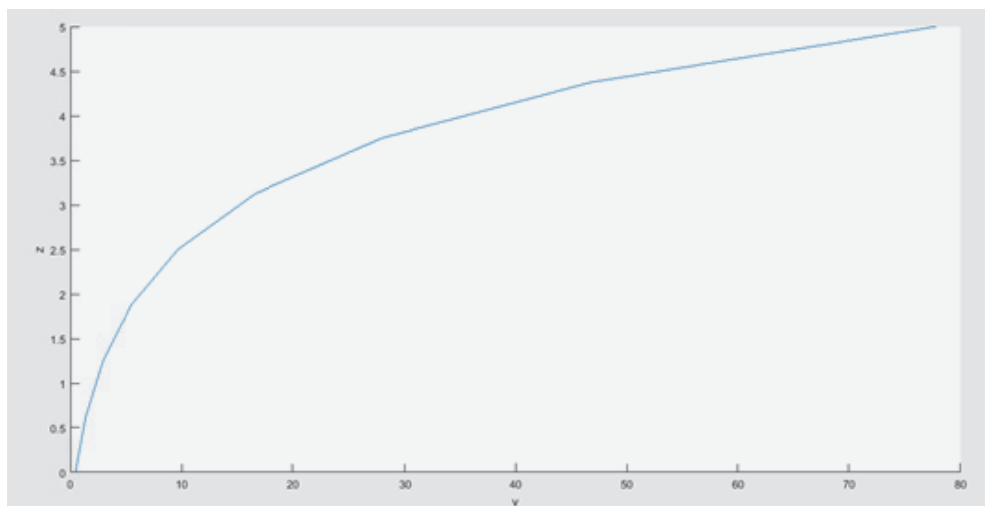


Рис. 4. Графическая зависимость скорости сдвига от смещения при степени проявления неньютоновских свойств $a = 0,8$ с учетом электромагнитной составляющей сдвига i

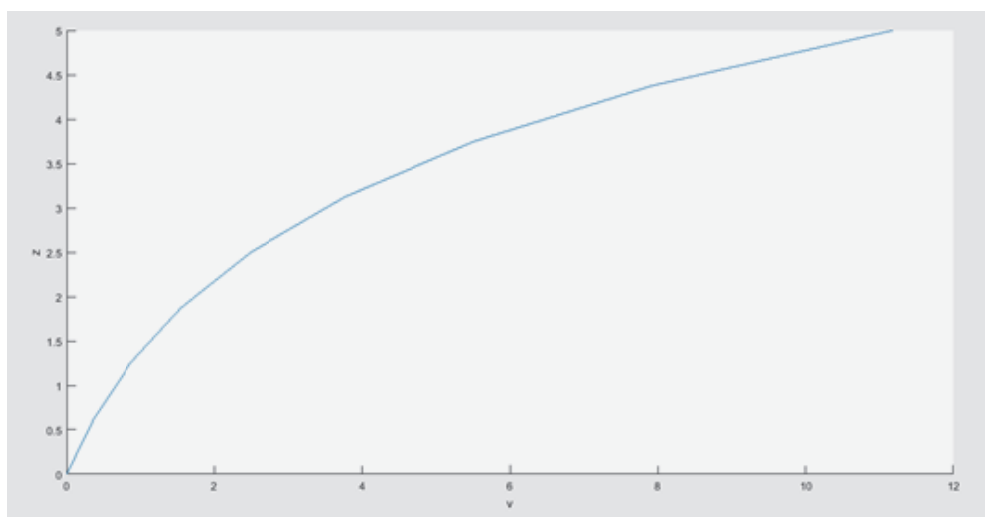


Рис. 5. Графическая зависимость скорости сдвига от смещения при степени проявления неньютоновских свойств $a = 0,5$ без учета электромагнитной составляющей сдвига i

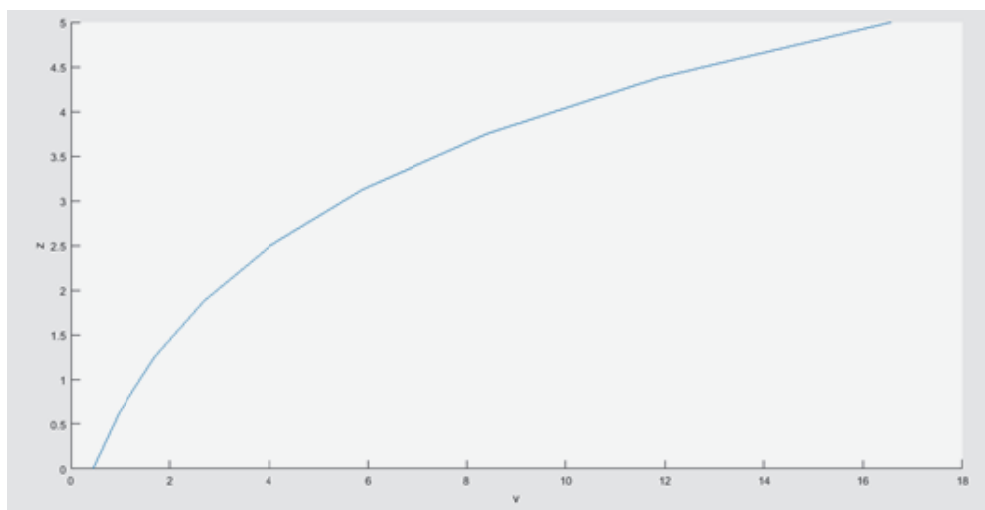


Рис. 6. Графическая зависимость скорости сдвига от смещения при степени проявления неньютоновских свойств $a = 0,5$ с учетом электромагнитной составляющей сдвига i

смещения z , путем вызова команды `diff` для функций, находящихся в числителе и знаменателе, с учетом закона изменения скорости сдвига v , описываемого уравнением (2). Численное значение степени проявления неньютоновских свойств a зависит от физико-химических свойств среды. В рамках численного эксперимента использованы магнитореологические жидкости со значениями степеней проявления неньютоновских свойств $a = [0,5; 0,8; 1]$.

Результаты проведенного численного моделирования влияния внешних электромагнитных полей на значения градиента скорости сдвига слоев магнитореологической рабочей среды показывают существенное отличие графических зависимостей, полученных без учета электромагнитной составляющей для смещения и с учетом электромагнитной составляющей для смещения, что выражается:

- в различии численных значений (см. рис. 1–6);
- в некотором различии угла наклона графической зависимости (см. рис. 1–6);
- и в различии численных значений начала течения среды под сдвиговым деформирующим напряжением (см. рис. 3–6).

Это свидетельствует о необходимости оценки данного параметра при моделировании вязко-стных свойств магнитореологических рабочих при прогнозировании реологических аномалий сред, с целью повышения достоверности получаемых значений.

Выводы

Разработана методика оценки воздействия внешнего электромагнитного поля на изменение значений градиента скорости сдвига слоев магнитореологической рабочей среды и прогнозирования возникновения реологических аномалий в ее объеме.

Разработанная методика является частью комплекса методологических основ повышения эффективности процесса проектирования и расчета магнитореологических приводов, отличающаяся оценкой вязкопластичных, псевдопластичных и дилатантных характеристик за счет учета начальных неньютоновских свойств и термодинамических параметров рабочей среды, электромагнитной составляющей сдвига молекулярных структур, и позволяющая с использованием компьютерного моделирования прогнозировать параметры магнитореологических приводов с комбинированным управлением.

Литература

1. Попов, Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем / Д.Н. Попов. – М.: Машиностроение, 1976. – 424 с.
2. Свешников, В.К. Станочные гидроприводы / В.К. Свешников, 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, no. 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, no. 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. *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, no. 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. *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
17. *Bustamante, R. A Nonlinear Magnetoelastic Tube under Extension and Inflation in an Axial Magnetic Field: Numerical Solution* / R. Bustamante, A. Dorfmann, R.W. Ogden // *J. Eng. Math.* – 2007. – Vol. 59. – P. 139–153. DOI: 10.1007/s10665-006-9088-4
18. *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
19. *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
20. *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
21. *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, no. 5. – P. 35–39. DOI: 10.1088/0964-1726/16/5/N02
22. *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
23. *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
24. *Magneto Caloric Properties of Manganese (III) Porphyrins Bearing 2,6-Di-Tert-Butylphenolgroups* / 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
25. Уилкинсон, У.Л. *Неньютоновские жидкости* / У.Л. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 216 с.
26. Такетоми, С. *Магнитные жидкости* / С. Такетоми, С. Такадзуми. – М.: Мир, 1993. – 272 с.

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

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

Поступила в редакцию 16 января 2018 г.

THE EFFECT OF EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELDS ON THE SHEAR RATE GRADIENT OF MAGNETORHEOLOGICAL WORKING MEDIUM LAYERS

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

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

²Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

The importance of improving machine drives requires constant development of alternative drive technologies which include magnetorheological, magnetodynamic and magneto-liquid technologies. In the recent years, magnetorheological, magnetodynamic, and magneto-liquid devices have proved to be effective; therefore their further development is considered relevant. Combined magnetorheological drives are promising innovation in drive systems. Such drive systems control the flow of magnetorheological working medium by changing its viscosity and generating rheological effects. It is obvious that in combined magnetorheological systems there is additional external shear force in working fluids. This requires revision of the main theoretical approaches to estimating the viscosity of the working medium in combined magnetorheological systems. When calculating and modeling combined or regular magnetorheological systems, it is important to estimate the viscosity characteristics of the working medium and forecast its possible rheological anomalies. The article describes a method for modeling the viscosity properties of magnetorheological working medium. A distinctive feature of the proposed method is that it allows us to take into account the effect of external electromagnetic fields on the shear rate gradient of magnetorheological liquid layers. The paper presents the results of numerical modeling obtained with the Matlab application package. The results of the computer experiment show that the proposed method can assess the effect of external electromagnetic fields on the shear rate gradient of layers under shear stresses and the electromagnetic component. This makes it possible to determine the probability of development of viscoplastic, pseudoplastic, and dilatant properties in the magnetorheological working medium and of appearance of rheological effects which are characteristic of magnetorheological working media.

Keywords: magnetorheological control devices, viscoplastic media, pseudoplastic media, dilatant media, rheological properties.

References

1. Popov D.N. *Dinamika i regulirovaniye gidro- i pnevmosistem*. [Dynamics and Regulation of Hydraulic and Pneumatic Systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1976. 424 p.
2. Sveshnikov V.K., Usov A.A. *Stanochnyye gidroprivody* [Machine Tool Hydraulic Drives]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1988. 512 p.
3. Chuprakov Yu.I. *Gidroprivod i sredstva gidroavtomatiki* [Hydraulic Drive and Hydro Automation]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1979. 232 p.
4. Smyk A.F. *Fizika. Elektromagnetizm. Kurs lektsiy*. [Physics. Electromagnetism. Lectures]. Moscow, 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 Publ., 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. 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. 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. 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, p. 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. 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. DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.10.083
13. Frayshteter G.B., Danilevich S.Y., Radionova 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. et al. Magnetic and Viscoelastic Response of Elastomers with Hard Magnetic Filler. *Smart Materials and Structures*, 2015, vol. 24, p. 035002. DOI: 10.1088/0964-1726/24/3/035002
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. Dorfmann A., Ogden R.W. Nonlinear Magnetoelastic Deformations. *Q. J. Mech. Appl. Math.*, 2004, vol. 57 (4), pp. 599–622. DOI: 10.1093/qjmath/57.4.599
17. Bustamante R., Dorfmann A., Ogden R.W. A Nonlinear Magnetoelastic Tube under Extension and Inflation in an Axial Magnetic Field: Numerical Solution. *J. Eng. Math.*, 2007, vol. 59, pp. 139–153. DOI: 10.1007/s10665-006-9088-4
18. Bustamante R., Dorfmann A., Ogden R.W. On Variational Formulations in Nonlinear Magnetoelastostatics. *Math. Mech. Solids*, 2008, vol. 13, p. 725. DOI: 10.1177/1081286507079832v1
19. 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
20. Filipcsei G., Zrinyi M. Magnetodeformation Effects and the Swelling of Ferrogels in a Uniform Magnetic Field. *J. Phys. Condens.*, 2010, matter 22, p. 276001. DOI: 10.1088/0953-8984/22/27/276001
21. 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
22. Bohm V., Naletova V.A., Popp J. et al. Material Transport of a Magnetizable Fluid by Surface Perturbation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, vol. 395, pp. 67–72. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.07.036
23. 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
24. Korolev V.V., Lomova T.N., Maslennikova A.N. et al. 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
25. Wilkinson W.L. *Nen'yutonovskiye zhidkosti* [Non-Newtonian Fluids]. Moscow: Mir Publ., 1964. 216 p.
26. Taketomi S., Tikadzumi S. *Magnitnyye zhidkosti* [The Magnetic Fluids], Moscow: Mir Publ., 1993. 272 p.

Received 16 January 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Найгерг, К.В. Влияние внешних электромагнитных полей на значение градиента скорости сдвига слоев магнитореологической рабочей среды / К.В. Найгерг, В.А. Целищев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 15–22. DOI: 10.14529/engin180202

FOR CITATION

Naigert K.V., Tselischev V.A. The Effect of External Electromagnetic Fields on the Shear Rate Gradient of Magnetorheological Working Medium Layers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 15–22. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin180202