

УДК 621.321

## Исследование взаимосвязанных процессов в магнитожидкостном демпфирующем устройстве

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

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Магнитожидкостные демпферы с регулируемой жесткостью начинают находить практическое применение, однако пока нет достаточно полных исследований взаимосвязанных тепло-магнито-гидродинамических процессов в них и влияния этих процессов на силовые и диссипативные параметры демпферов.

**Материалы и методы:** Использовано взаимосвязанное конечно-элементное моделирование электромагнитного, гидродинамического и температурного полей магнитожидкостного демпфера.

**Результаты:** Проведено исследование взаимосвязанных процессов в магнитожидкостном демпфирующем устройстве. Установлено, что демпфирующие свойства и силовая характеристика устройства определяются свойствами магнито-реологической жидкости и интенсивностью магнитного поля, создаваемого поршнем. Показано влияние магнитного поля на процессы, происходящие в демпфере, и на его силовую характеристику. Оценены тепловые режимы работы демпферов.

**Выводы:** Предложенная модель и полученные результаты исследований могут быть использованы для оценки тепло-магнито-гидродинамических параметров демпфирующих устройств с магнито-реологической жидкостью и поршневой магнитной системой.

**Ключевые слова:** нанодисперсная магнито-реологическая жидкость, магнитное поле, конечно-элементное моделирование, демпфирующее устройство, магнитная жидкость, вязкость.

## A study of interrelated processes in magnetic-fluid-based damping devices

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

### Abstract

**Background:** Magnetic-fluid-based damping devices with adjustable rigidity are already used in practice, but the interrelated heat magneto-hydrodynamic processes in such devices as well as the impact of these processes on the power and dissipative parameters of dampers have not yet been studied thoroughly enough.

**Materials and Methods:** Interrelated finite-element modeling of electromagnetic, hydrodynamic and temperature fields of the magnetic fluid damper was used.

**Results:** A study of interrelated processes in magnetic fluid damping devices has been conducted. It was found that damping properties and power characteristics of the device are determined by the properties of the magneto-rheological fluid and the intensity of the magnetic field generated by the piston. The influence of magnetic field on the processes in the damper and its power characteristic was shown. Thermal states of the damper were estimated.

**Conclusions:** The proposed model and the data obtained can be used to evaluate heat-magneto-hydrodynamic parameters of damping devices with magneto-rheological fluid and a piston magnet system.

**Key words:** nanodispersed magneto-rheological fluid, magnetic field, finite-element modeling, damping device, magnetic fluid, viscosity.

Магнитожидкостные демпферы с жесткостью, регулируемой за счет изменения воздействующего на магнитную жидкость магнитного поля, вызывающего изменение ее вязкости, обладают высокими адаптирующими свойствами и начинают находить широкое практическое применение [1], однако пока нет достаточно полных исследований взаимосвязанных тепло-магнито-гидродинамических процессов в магнитожидкостных

демпферах и влияния этих процессов на силовые и диссипативные параметры демпферов.

При исследовании магнитожидкостных устройств необходим взаимосвязанный анализ нескольких физических полей, поэтому использовалось взаимосвязанное конечно-элементное моделирование электромагнитного, гидродинамического и температурного полей магнитожидкостного демпфера.

**Описание модели и граничные условия.**

Комплексная модель, включающая в себя электромагнитную, гидродинамическую, термодинамическую составляющие при использовании перестраиваемых в процессе моделирования сеток, позволяет оценивать работу устройства в режиме реального времени.

Геометрия разработанной осесимметричной модели для расчета методом конечных элементов, представленная на рис. 1, состоит из ферромагнитного корпуса 1, заполненного магнитной жидкостью (МЖ) 2, штока 3 с поршнем 4, состоящим из катушки управления 5 и двух ферромагнитных полюсов 6 [2].

Магнитная составляющая модели рассчитывалась как магнитоэлектростатическая задача, без учета наведенных электрических токов. При этом можно сформулировать задачу с помощью скалярного магнитного потенциала. В бестоковой области  $\nabla \times H = 0$ . Из этого следует, что магнитный скалярный потенциал  $V_m$  определяется соотношением  $H = -\nabla V_m$ .

При использовании соотношения  $B = \mu_0 (H + M)$

уравнение  $\nabla B = 0$  записывается в виде  $-\nabla(\mu_0 \cdot \nabla \cdot V_m + \mu_0 M) = 0$ .

При моделировании электромагнитной составляющей было принято:

- относительная магнитная проницаемость ферромагнитных участков  $\mu_{ст} = 1000$ , что соответствует магнитной проницаемости конструкционной стали на начальном участке кривой намагничивания. Модель построена таким образом, что отказ от учета насыщения стали не вносит каких-либо отклонений в результаты моделирования, но позволяет существенно сократить время расчета. При необходимости модель позволяет учесть кривую насыщения;

- относительная магнитная проницаемость магнитной жидкости  $\mu_{жид} = 1,15$ ;

- задавалась величина нормальной составляющей магнитной индукции  $B_n$  на границе ферромагнитных полюсов 6 поршня 4 (рис. 1). Расчет производился для разных значений  $B_n$ , заданных в диапазоне 0–1,5 Тл.



Рис. 1. Геометрия модели для расчета демфера

Гидродинамическая составляющая модели основывалась на уравнении Навье–Стокса. В качестве допущения принято положение о несжимаемости жидкости.

На рис. 2 приведены реологические кривые МЖ при разных индукциях магнитного поля [3].

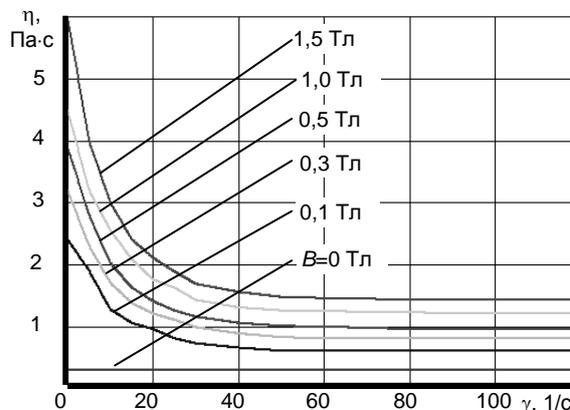


Рис. 2. Зависимость вязкости МЖ от градиента скорости при разных индукциях магнитного поля

Нелинейность вязкости МЖ описывалась моделью Carreau [4], рекомендуемой для жидкостей с большими различиями скоростей сдвига:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left[ 1 + (K_1 \dot{\gamma})^2 \right]^{(n-1)/2}, \quad (1)$$

где  $\eta_{\infty}$  – динамическая вязкость жидкости при бесконечно большой скорости сдвиговой деформации, т.е. минимальная динамическая вязкость;  $\eta_0$  – динамическая вязкость жидкости при нулевой скорости сдвиговой деформации, т.е. максимальная динамическая вязкость;  $K_1$  – временная постоянная,  $n$  – коэффициент степенного закона.

Модель (1) адекватно описывает характеристики МЖ (рис. 3).

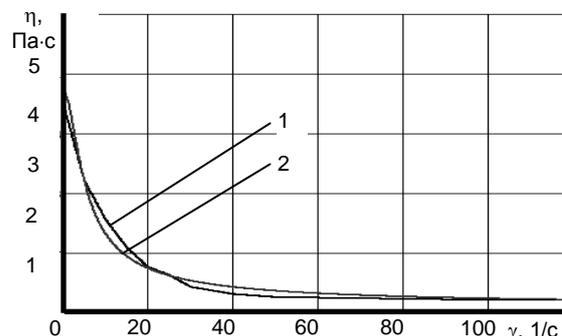


Рис. 3. Реальная реологическая характеристика вязкости МЖ (1) и ее аппроксимация (2) при индукции магнитного поля  $B = 1$  Тл

При моделировании гидродинамической составляющей было принято:

- плотность жидкости  $950 \text{ кг/м}^3$ ;

- скольжение жидкости по стенкам отсутствует;
- зависимость движения поршня от времени гармоническая;
- временная постоянная  $K_1 = 0,28$ ;
- коэффициент степенного закона  $n = 10^{-9}$ ;
- динамическая вязкость жидкости при бесконечно большой скорости сдвиговой деформации  $\eta_\infty$  и при нулевой скорости сдвиговой деформации  $\eta_0$  зависит от индукции магнитного поля (рис. 4).

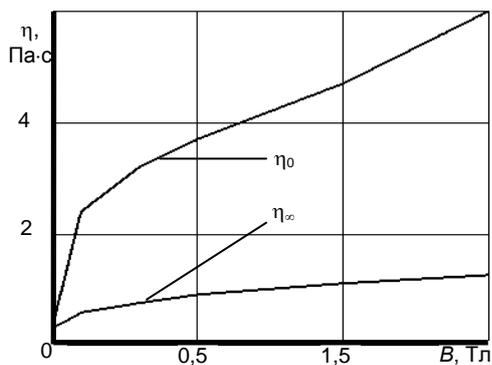


Рис. 4. Зависимости динамической вязкости МЖ при бесконечно большой и нулевой скоростях сдвиговой деформации от величины магнитной индукции

Термодинамическая составляющая основывалась на первом законе термодинамики. Уравнение теплопроводности принято в виде

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (u \nabla) T \right) = -(\nabla q) + \tau S - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \left( \frac{\partial p}{\partial t} + (u \nabla) p \right) + Q.$$

При этом:

- начальная температура  $T = 300$  К;
- теплопроводность стали  $k_{ст} = 44,5$  Вт/(м·К);
- теплопроводность МЖ  $k_{МЖ} = 22,5$  Вт/(м·К);
- теплоемкость стали  $C_{ст} = 475$  Дж/(кг·К);
- теплоемкость МЖ  $C_{МЖ} = 2000$  Дж/(кг·К);
- плотность стали  $\rho_{ст} = 7850$  кг/м<sup>3</sup>;
- плотность магнитной жидкости  $\rho_{МЖ} = 950$  кг/м<sup>3</sup>.

**Анализ полученных результатов.** Распределение магнитного поля в участке магнитожидкостного демпфера с поршнем при нормальной составляющей магнитной индукции  $B_n = 0,5$  Тл, полученная по результатам конечно-элементного моделирования, представлена на рис. 5.

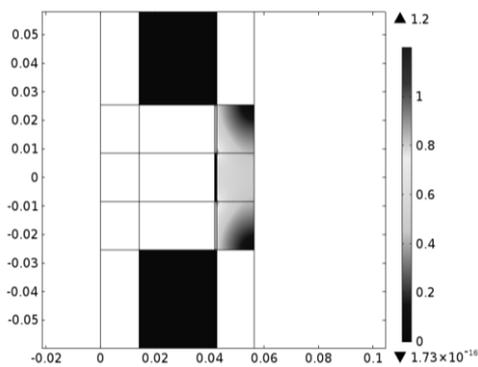


Рис. 5. Распределение магнитного поля при  $B_n = 0,5$  Тл

Неравномерное распределение магнитного поля в зазоре демпфера, а именно максимумы в области зазора между полюсами поршня и корпусом и резкое снижение магнитного поля в области зазора между катушкой управления и корпусом, объясняется большой разницей магнитных проницаемостей материала корпуса и МЖ.

Распределение магнитного поля по длине отрезка, проходящего посередине зазора между поршнем и корпусом, представлено на рис. 6. Очевидно равномерное распределение магнитного поля по высоте полюса и практически полное отсутствие поля в области зазора около катушки управления [5]. Очевиден рост магнитного поля в зазоре при увеличении нормальной составляющей магнитной индукции.

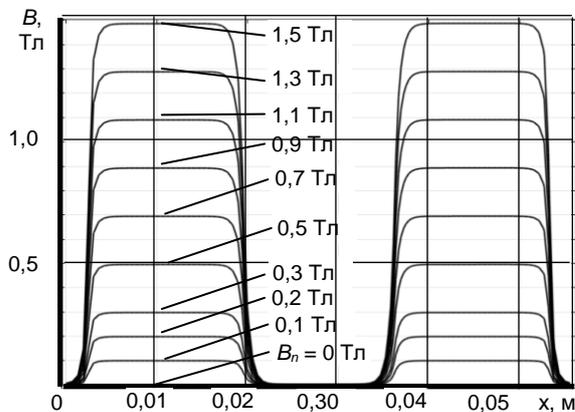


Рис. 6. Зависимость магнитной индукции в зазоре демпфера при разных  $B_n$

На рис. 7 показано распределение вязкости МЖ по объему демпфера. Наблюдается рост вязкости жидкости в области под полюсами и одинаковая вязкость жидкости по остальному объему демпфера. Увеличение вязкости МЖ под полюсами поршня вызвано воздействием на нее магнитного поля [6].

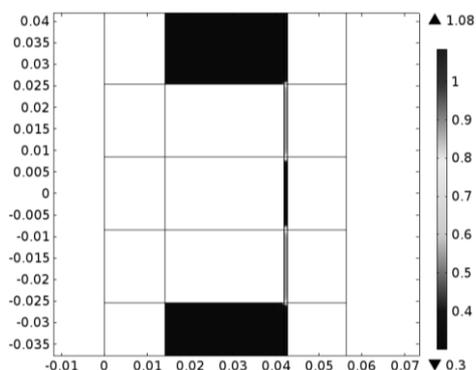


Рис. 7. Распределение вязкости МЖ при  $B_n = 0,5$

Распределение вязкости МЖ по длине поршня представлено на рис. 8. Наблюдается значительный рост вязкости МЖ в зависимости от возрастания магнитного поля.

Таким образом, показано существенное взаимодействие магнитной и гидродинамической составляющих в магнитоожидкостном демпфере.

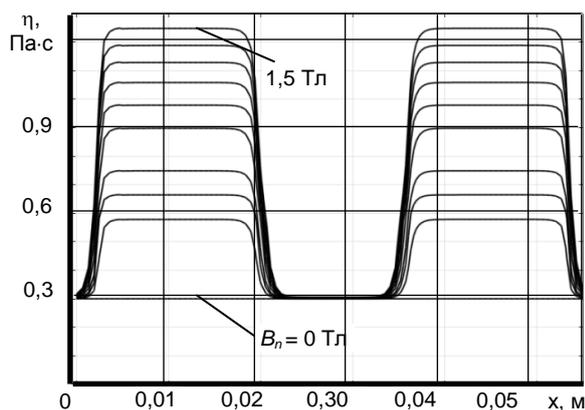


Рис. 8. Зависимость вязкости МЖ по длине поршня при разных значениях магнитной индукции

На рис. 9 показаны графики перепада давления по длине поршня в зависимости от магнитного поля. При отсутствии магнитного поля ( $B_n = 0$ ) наблюдается линейное распределение давления по длине поршня. Для всех зависимостей при наличии магнитного поля в зазоре график перепада давления можно разбить на 3 участка. Участки, соответствующие перепаду давления под полюсами, имеют больший наклон по сравнению с перепадом давления в области катушки. Это связано с неравномерным распределением вязкости МЖ в зазоре по высоте поршня.

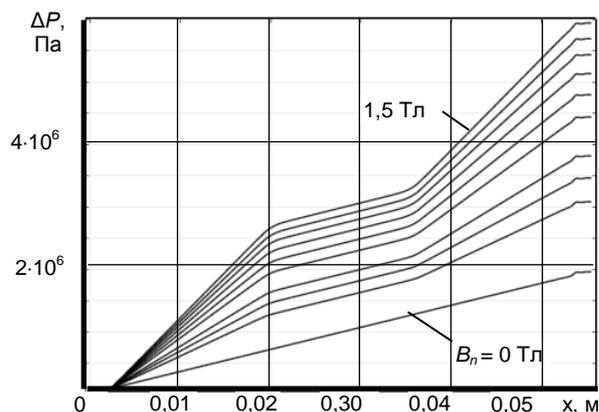


Рис. 9. Зависимость перепада давления по длине поршня при разных значениях магнитной индукции

На рис. 10 представлена силовая характеристика демпфера, полученная умножением перепада давления по длине поршня на площадь поршня [7]. Очевидно существенное влияние магнитного поля на силовую характеристику демпфера.

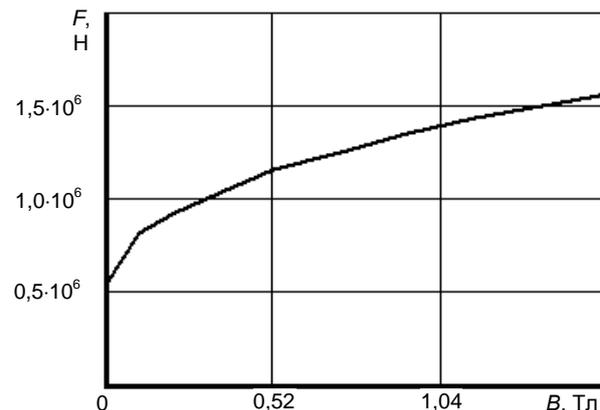


Рис. 10. Зависимость силовой характеристики демпфера от значения магнитной индукции

В процессе диссипации энергии при движениях и колебаниях поршня неизбежно повышение температуры МЖ и конструктивных элементов демпфера, что может оказать влияние на стабильность характеристик демпфирующего устройства. На рис. 11 приведена картина распределения температуры по объему демпфера после 15 секунд работы при магнитной индукции в зазоре  $B = 1,5$  Тл. Анализ полученного распределения показывает, что область максимальных температур находится в зазоре между поршнем и корпусом.

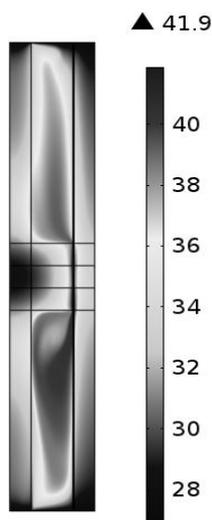


Рис. 11. Распределение температуры по объему демпфера

Для оценки термодинамического состояния демпфера получены значения температур МЖ в точке, лежащей посередине зазора между поршнем и корпусом (рис. 12). Очевиден рост температуры МЖ во время работы демпфера. Для жидкости с данной вязкостью рост температуры находится в пределах 15 °С.

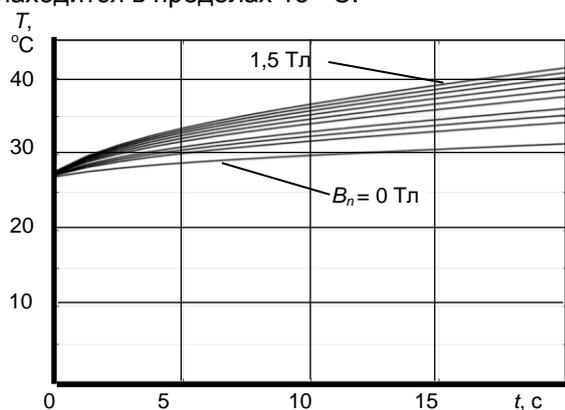


Рис. 12. Температура МЖ в зазоре между поршнем и корпусом во время работы демпфера

Такое повышение температуры может влиять на магнитные и реологические свойства МЖ, что, безусловно, следует учитывать при взаимосвязанном исследовании характеристик демпфера [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №12-08-97516).

## Список литературы

1. Yichuan Wang Magnetic Particles Study and Their Applications // University of York. – 2014. – 127 p.
2. Морозов Н.А., Нестеров С.А. Типовые конструкции демпферов на основе нанодисперсных магнитных жидкостей // XV Междунар. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. 4–7 сентября, Плес, Россия: сб. науч. тр. – Иваново, 2012. – С. 307–314.
3. Gudmundsson K.H. Design of a Magnetorheological Fluid for an MR Prosthetic Knee Actuator with an Optimal Geometry / School of Engineering and Natural Sciences University of Iceland. – Prentun: Háskólaprent Reykjavík, May 2011. – 88 p.
4. Алямовский А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: БВХ Петербург, 2010. – 1028 с.
5. Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Нестеров С.А. Магнитореологический демпфер с поршневой магнитной системой // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 23–28.
6. Gudmundsson I. A Feasibility Study of Magnetorheological Elastomers for a Potential Application in Prosthetic Devices / School of Engineering and Natural Sciences University of Iceland. – Prentun: Háskólaprent Reykjavík, September 2011. – 108 p.
7. Kazakov Yu.B., Morozov N.A., Nesterov S.A. The Flowing of Magnetic Fluid in the Gap with the Magnetic Fields with different Values of Strength // 13th International Conference on Magnetic Fluids (ICMF-13). 7th–11th January 2013. Abstract Book / CSIR-National Physical Laboratory Dr. K.S. Krishnan Marg. – New Delhi, India. – P. 318–319.
8. Strek T., Jopek H., Computer simulation of heat transfer through a ferrofluid // Physica Status Solidi (B). – 2007. No. 3. S. 1027–1037.

## References

1. Yichuan Wang Magnetic Particles Study and Their Applications. University of York, 2014. 127 p.
2. Morozov, N.A., Nesterov, S.A. Tipovye konstruksii dempferov na osnove nanodispersnykh magnitnykh zhidkostey [Typical Damper Constructions based on Nanodispersed Magnetic Liquids]. *Sbornik nauchnykh trudov XV Mezhdunarodnoy Plesckoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam* [Collected Scientific Works of the XVth International Plyos Conference on Nanodispersed Magnetic Liquids]. Ivanovo, 2012, pp. 307–314.
3. Gudmundsson, K.H. Design of a Magnetorheological Fluid for an MR Prosthetic Knee Actuator with an Optimal Geometry. School of Engineering and Natural Sciences University of Iceland. Prentun, Háskólaprent Reykjavík, May 2011. 88 p.
4. Alyamovskiy, A.A. *SolidWorks 2007/2008. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike* [SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering practice]. Saint-Petersburg, 2010. 1028 p.
5. Kazakov, Yu.B., Morozov, N.A., Nesterov, S.A. Magnitoreologicheskii dempfer s porshnevoy magnitnoy sistemoy [Magnetorheological Damper with Piston Magnetic System]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 23–28.
6. Gudmundsson, I. A Feasibility Study of Magnetorheological Elastomers for a Potential Application in Prosthetic Devices. School of Engineering and Natural Sciences University of Iceland. Prentun, Háskólaprent Reykjavík, September 2011. 108 p.
7. Kazakov, Yu.B., Morozov, N.A., Nesterov, S.A. The Flowing of Magnetic Fluid in the Gap with the Magnetic Fields with different Values of Strength. 13th International Conference on Magnetic Fluids (ICMF-13). CSIR-National Physical Laboratory Dr. K.S. Krishnan Marg, New Delhi. India. P. 318–319.
8. Strek, T., Jopek, H. Computer simulation of heat transfer through a ferrofluid. *Physica Status Solidi (B)*. 2007, no. 3, pp. 1027–1037.

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

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

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