

УДК 621.321

Магнито-реологический демпфер с поршневой магнитной системой

Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, С.А. Нестеров

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Магнито-жидкостные демпферы уже находят практическое применение, но отсутствует достаточно полная теория влияния магнитных полей и гидродинамических процессов на их силовые и диссипативные параметры.

Материалы и методы: Использовались результаты моделирования электромагнитного поля магнито-жидкостного демпфера в системе ANSYS и решения уравнения гидродинамики С.М. Тарга.

Результаты: Рассмотрено моделирование демпфера с нанодисперсной магнито-реологической жидкостью и поршневой магнитной системой с чередующимися полюсами и катушками намагничивания. Установлено, что демпфирующие свойства и силовая характеристика устройства определяются свойствами магнито-реологической жидкости, интенсивностью магнитного поля поршня и скоростью сдвига. Показаны различия силовой характеристики демпфера при использовании обычных жидких сред и нанодисперсной магнито-реологической жидкости.

Выводы: Предложенные формулы могут быть использованы для оценки гидравлических параметров демпфирующих устройств с магнито-реологической жидкостью и поршневой магнитной системой.

Ключевые слова: нанодисперсная магнито-реологическая жидкость, магнитное поле, моделирование, демпфирующее устройство, магнитная жидкость, поршневая магнитная система, напряжение сдвига, вязкость.

Magnetorheological Damper with Piston Magnetic System

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 liquid dampers have already been used in practice, but there is no fairly complete theory of the influence of magnetic fields and hydrodynamic processes on their power and dissipation parameters.

Materials and Methods: Simulation results of the electromagnetic field of the magnetic liquid damper in the ANSYS system and S.M. Targa's hydrodynamic solutions are applied in the article.

Results: The authors consider the damper simulation with nanodispersed magnetic rheological liquids and piston magnetic system with the alternating poles and the magnetization reels. The authors find out that the damper properties and power characteristics of the device are defined by characteristics of the magnetic rheological liquids, intensity of the piston magnetic field, and the shift speed.

Conclusions: The proposed formulas can be used to estimate hydraulic parameters of dampers with magnetorheological liquid and the piston magnet system.

Keywords: nanodispersed magnetorheological liquids, magnetic field, simulation, damper, magnetic liquid, piston magnetic system, shift speed, viscosity.

Широкое распространение получили гидравлические демпферы, диссипация энергии в которых происходит при движении жидкости через различные каналы и перепускные клапаны. Потери напора при течении жидкой среды в каналах и перепускных клапанах определяют вид силовой характеристики амортизатора. Течение жидкости происходит за счет давления, создаваемого при возвратно-поступательном движении поршня в цилиндрическом корпусе. При этом компрессионные кольца, перекрывающие зазор между поршнем и корпусом, должны удерживать большой перепад давления. Компрессионные кольца за время эксплуатации изнашиваются и теряют свои рабочие свойства, что приводит к выходу амортизатора из строя. Управление си-

ловой характеристикой гидравлических демпферов производится сложной механической системой, изменяющей размер дросселирующих отверстий и значения давления в жидкости, необходимого для открытия перепускных клапанов.

Нанодисперсная магнито-реологическая жидкость (НМРЖ), обладающая текучестью и магнитными свойствами, позволяет создавать управляемые демпфирующие устройства. НМРЖ – это коллоидный раствор, способный менять свою структуру и вязкость под воздействием магнитного поля. Создание динамических виброгасителей с возможностью дистанционного регулирования их силовых характеристик и эффективности демпфирования в процессе гашения колебаний при помощи связи с автоматическими системами

и следящими устройствами является основным преимуществом магнитожидкостного демпфера [1–4]. Получение стабильных рабочих характеристик демпфирующего устройства возможно при высокой седиментационной устойчивости в гравитационных и градиентных магнитных полях жидкой среды, что определяет выбор НМРЖ.

Моделирование распределения магнитного поля. Управление силовой характеристикой демпфера осуществляется изменением в рабочих зазорах напряженности магнитного поля, воздействующего на протекающую в этих зазорах НМРЖ. Объектом моделирования выбран цилиндрический магнитожидкостный демпфер, в поршне которого помещены катушки управления. Моделирование проведено в системе ANSYS при выполнении корпуса из магнитного и немагнитного материала (рис. 1).

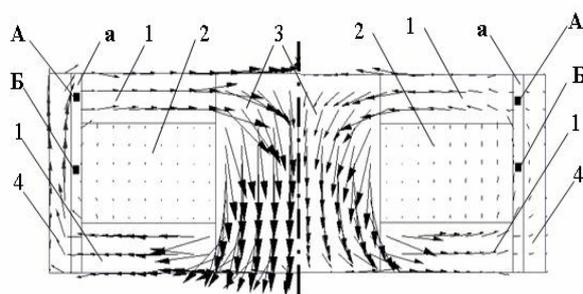


Рис. 1. Распределение магнитного потока в системе с магнитным (слева) и немагнитным (справа) материалом корпуса: 1 – диски; 2 – катушка; 3 – шток; 4 – корпус

На рис. 1 показана исследуемая модель демпфера. Дисковые полюсы 1 и катушки управления 2 помещены на штоке 3 поршня. Заполненный НМРЖ рабочий зазор *a* разделяет поршень и корпус 4 демпфера. На левой стороне рис. 1 показано распределение магнитного потока в системе с магнитопроводящим материалом корпуса, а на правой стороне – с немагнитным материалом.

Распределение магнитного потока показывает, что в системе с магнитным корпусом (рис. 1, слева) основной магнитный поток замыкается по зазору между полюсами и корпусом (область А) и практически не заходит в зазор между катушкой и корпусом (область Б). Это объясняется относительно низкой магнитной проницаемостью НМРЖ по сравнению со сталью.

Характер распределения магнитной индукции в зазоре в системе с разными материалами корпуса представлен на рис. 2, 3.

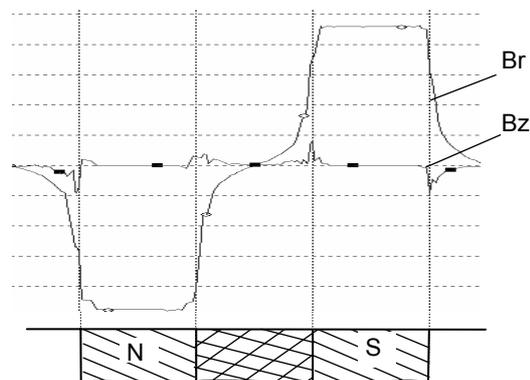


Рис. 2. Распределение осевой B_z и нормальной B_r магнитной индукции для ферромагнитного корпуса

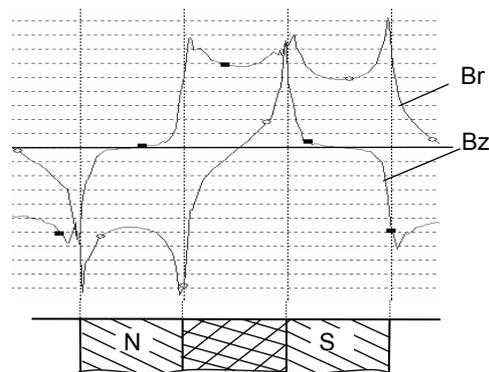


Рис. 3. Распределение осевой B_z и нормальной B_r магнитной индукции для немагнитного корпуса

В системе с немагнитным корпусом наблюдается увеличение концентрации магнитного потока в зазоре между полюсами (область Б) за счет роста осевой составляющей магнитного поля. Интенсивность магнитного поля имеет тот же порядок, что и в системе с немагнитным корпусом, и заметно меньше значений, достигаемых под полюсами при магнитном корпусе. Одинаковые намагничивающие силы катушек управления обеспечивают в зазорах 0,5–1,0 мм значения магнитной индукции под полюсами (область А) 0,40–0,55 Тл при магнитном и 0,115–0,120 Тл при немагнитном корпусе. Значение магнитной индукции в области Б, между полюсами над катушкой, при немагнитном корпусе возрастает в 3 раза по сравнению с аналогичными значениями при магнитном корпусе (с 0,025 до 0,075 Тл), но интенсивность магнитного поля остается очень малой. Объем НМРЖ под полюсами (область А) и между полюсами (область Б) практически одинаков, а воздействие на жидкость сильнее под полюсами при магнитном корпусе.

Любое смещение относительно магнитного корпуса оси поршня ведет к возникновению значительных сил одностороннего тяжения [5], что требует создания специальных центрирующих устройств и усложняет конструкцию демпфера. В системе с немагнитным материалом корпуса НМРЖ создает опорный эффект на поверхности полюсов поршня и центрирует его [6, 7]. Значе-

ние центрирующей силы можно рассчитать по формуле

$$F_H = \mu_0 M_S H_m S, \quad (1)$$

где F_H – несущая сила опоры; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; M_S – намагниченность насыщения НМРЖ; H_m – максимальная напряженность магнитного поля; S – площадь опоры, равная площади полюсов.

Движение поршня в немагнитной жидкости. В первом приближении, считая течение в зазоре между поршнем и корпусом ламинарным, можно показать [8, 9], что поле скоростей имеет параболический характер:

$$v = -U \frac{\ln \frac{r}{R_2}}{\ln \frac{R_1}{R_2}} + \frac{1}{4\eta} \frac{dp}{dz} \left(r^2 - \frac{R_1^2 \ln \frac{r}{R_2} - R_2^2 \ln \frac{r}{R_1}}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \right). \quad (2)$$

Здесь v – скорость течения жидкой среды в зазоре между поршнем и корпусом; U – скорость движения поршня относительно корпуса; r – текущее значение радиуса, меняющееся от радиуса поршня R_1 до радиуса корпуса R_2 ; η – динамическая вязкость жидкости; p – давление в щелевом зазоре между поршнем и корпусом, которое создается движением поршня относительно корпуса; z – координата по оси системы.

В данном случае градиент давления при течении в щелевом зазоре является постоянным и может быть определен по формуле

$$\frac{dp}{dz} = \frac{-4\eta U}{(R_1^2 + R_2^2) \ln \frac{R_1}{R_2} - (R_1^2 - R_2^2)}. \quad (3)$$

Формулы (2), (3) полностью определяют характер течения жидкой среды в щелевом зазоре при движении поршня относительно корпуса. Можно найти силы сопротивления движению цилиндрического поршня в корпусе с жидкой средой по боковой F_B и лобовой F_L поверхностям:

$$F_B = 2\pi\eta U h \frac{R_2^2 - R_1^2}{(R_2^2 + R_1^2) \ln \frac{R_1}{R_2} + (R_2^2 - R_1^2)}; \quad (4)$$

$$F_L = \frac{3}{2}\pi\eta U \frac{R_1^4}{L^3} + 4\pi\eta U R_1^2 h \frac{1}{(R_2^2 + R_1^2) \ln \frac{R_1}{R_2} + (R_2^2 - R_1^2)}. \quad (5)$$

Здесь h – высота поршня по оси; L – расстояние от дна корпуса до движущейся к нему торцевой поверхности поршня.

Анализ выражений (4), (5) показывает, что основную роль в силовой характеристике демпфера играет сила лобового сопротивления при движении поршня. Это учитывается при создании трубных демпферов. Движение жидкости организуют в дросселирующих каналах, а в зазоре между поршнем и корпусом жидкость не протекает.

Движение поршня в магнитной жидкости. В магнитожидкостных демпфирующих устройствах можно упростить и разнообразить конструктивные исполнения, активнее влияя на формирование силовой характеристики и вязко-

стную диссипацию энергии колебания за счет использования зазора между поршнем и корпусом демпфера. Обычно применяют магнитную жидкость на основе твердой фазы большого размера. Чаще всего это карбонильное железо с диаметром частиц до 50 мкм. Такая магнитореологическая суспензия позволяет получить значительные изменения вязкости суспензии в слабых магнитных полях. Недостатком таких магнитных суспензий является объединение частиц твердой фазы в крупные агрегаты, особенно в градиентных магнитных полях, и изменение свойств рабочей среды. Рабочие характеристики таких магнитожидкостных демпферов нестабильны.

Устойчивость НМРЖ очень высока, что обеспечивается дисперсностью твердой фазы до наноразмеров 10–20 нм. Магнитные свойства и диапазон изменения вязкости снижаются, но при этом можно гарантировать стабильность рабочих характеристик демпфера, что часто является важным требованием при эксплуатации.

Для НМРЖ вязкость η увеличивается по мере роста значений индукции магнитного поля и градиента сдвигового течения до 1,2–1,3 от вязкости жидкой среды при отсутствии магнитного поля. Эти измененные значения вязкости должны быть подставлены в формулу (4) и во второе слагаемое формулы (5). Изменяя значение напряженности магнитного поля в зазоре системы, можно пропорционально влиять на падение напора в зазоре, на лобовое давление жидкой среды при движении поршня относительно корпуса и формировать силовую характеристику демпфера. Зная зависимость вязкости НМРЖ от силы магнитного поля, можно рассчитать и вязкостные потери при движении поршня.

Однако расчет вязкостных потерь сопряжен со значительными трудностями, так как значения напряженности магнитного поля в разных областях зазора отличаются в несколько раз (рис. 2, 3), что вызывает изменение вязкости НМРЖ при ее течении в рабочем зазоре. Можно локализовать три области зазора: под полюсом – с практически постоянным значением напряженности магнитного поля; у границы полюса – с резким изменением ее и между полюсами над катушкой, где значение напряженности магнитного поля постоянно. Для каждой области следует определить средние значения напряженности магнитного поля по специальным расчетным коэффициентам, зависящим от силы магнитного поля и геометрии системы. Такой подход позволяет получить оценку силовой характеристики демпфера, вязкостных потерь в нем и средней скорости течения НМРЖ в зазоре системы.

Кривая распределения скорости течения жидкости в зазоре будет одинакова во всех областях зазора независимо от значения магнитного поля в них. При этом максимальная и средняя скорости течения определяются скоростью движения поршня относительно корпуса и эквивалентным сопротивлением течению жидкой среды

всего рабочего зазора, являющимся совместным сопротивлением всех локальных областей зазора. Значения падения напора в областях зазора с разными значениями индукции магнитного поля будут отличаться друг от друга пропорционально средним значениям вязкости НМРЖ на этих участках. В свою очередь, вязкость НМРЖ зависит не только от свойств жидкости носителя, но и от концентрации нанодисперсной твердой фазы, значения магнитной индукции поля в зазоре и градиента сдвига поверхностей зазора. Характеристики зависимости вязкости НМРЖ с нанодисперсной твердой фазой в керосине (объемная концентрация 18 %) от значений магнитной индукции для разных градиентов сдвига показаны на рис. 4.

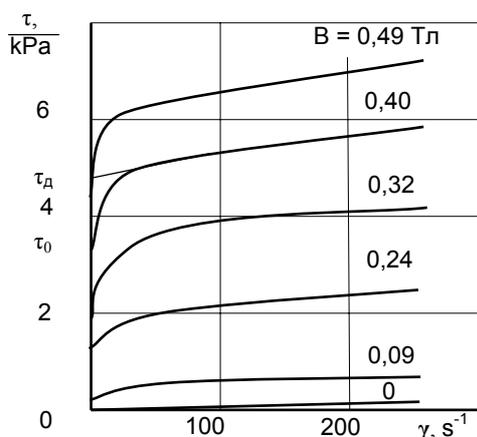


Рис. 4. Реологические характеристики НМРЖ

Если обозначить ширину полюса b_n и ширину межполюсного пространства $b_{мп}$, то в первом приближении эффективную вязкость $\eta_{эф}$ в щелевом зазоре элементарного сочетания полюса и межполюсного пространства можно определить по формуле [10]

$$\eta_{эф} = \frac{\eta_n b_n + \eta_{мп} b_{мп}}{b_n + b_{мп}}, \quad (6)$$

где величины η_n и $\eta_{мп}$ есть функции от значений магнитной индукции под полюсом и в межполюсном зазоре системы. Это значение эффективной вязкости и должно фигурировать в формуле (3) при определении результирующего градиента давления по всей высоте поршня с учетом количества полюсов и межполюсных пространств. Более точные значения рассчитываемых величин могут быть найдены только путем моделирования распределения магнитного поля в исследуемом зазоре с учетом магнитных свойств НМРЖ.

Дополнительные трудности создает обратно-поступательное движение поршня, его колебательный характер, что вызывает изменение градиента сдвига и реологических свойств НМРЖ за время одного хода поршня. На рис. 5 показаны зависимости касательного напряжения в слоях НМРЖ от градиента сдвига для разных значений индукции магнитного поля в зазоре.

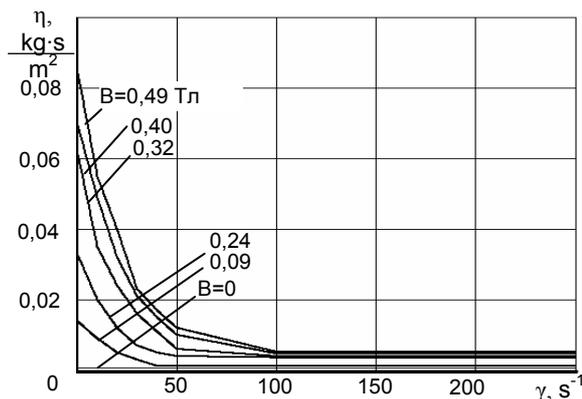


Рис. 5. Зависимости вязкости НМРЖ от градиента сдвига

Анализ полученных зависимостей (рис. 5) показывает, что по мере усиления магнитного поля в зазоре начальное напряжение сдвига τ_0 растет, НМРЖ структурируется. Следовательно, в первый момент движения поршня относительно корпуса возникает большая сила сопротивления сдвигу. В дальнейшем по мере увеличения скорости сдвига структура НМРЖ разрушается, образуются цепочечные агрегаты, которые по мере увеличения скорости течения дробятся на мелкие агрегаты и исчезают совсем. Тогда значение касательного напряжения τ может быть рассчитано по формуле

$$\tau = \tau_d + \eta_v \gamma, \quad (7)$$

где τ_d – начальное динамическое касательное напряжение (рис. 5, спрямленный участок реологической кривой); η_v – динамическая вязкость НМРЖ при данном значении магнитной индукции, практически постоянная величина при больших градиентах сдвига; γ – градиент скорости течения НМРЖ в зазоре у поверхности поршня.

Зависимость начального напряжения сдвига от магнитной индукции можно рассчитать по формуле $\tau_0 = K \cdot B^2$, а динамическое напряжение – $\tau_d = K \cdot B^{1.5}$. Здесь K зависит от свойств НМРЖ и находится в диапазоне 2–15.

Анализ реологических кривых (рис. 4) показывает, что энергия вязкостной диссипации в демфирующих устройствах с НМРЖ не может очень значительно отличаться от значений вязкостных потерь в демферах с традиционной жидкой средой. После первого сдвига поршня относительно корпуса и разрушения структуры, установившейся в НМРЖ до возникновения импульса колебаний, вязкость магнитной жидкости незначительно отличается от вязкости реологической жидкости с твердым немагнитным наполнителем такой же степени дисперсности и концентрации. Однако применение НМРЖ позволяет изменить конструкцию демфера, что часто очень выгодно, и использовать щелевой зазор между поршнем и корпусом демфера. Изменяя значение магнитного поля, можно влиять на эф-

фективную вязкость текущей в зазоре НМРЖ, изменять потери напора в щелевом зазоре, силу лобового сопротивления движению поршня, и тем самым влиять на силовую характеристику устройства. Кроме того, при наличии магнитного поля сила трения, действующая на боковую поверхность движущегося поршня (4), увеличивается и может быть рассчитана по формуле

$$F_B = 2\pi R_1 h \tau_{\theta} + 2\pi n_{\text{эф}} U h \frac{R_2^2 - R_1^2}{(R_2^2 + R_1^2) \ln \frac{R_1}{R_2} + (R_2^2 - R_1^2)} \quad (8)$$

Более точно мощность потерь в жидкости и силу сопротивления движению поршня можно определить последовательным моделированием демпфера. Сначала находится распределение магнитного поля поршня в зазоре, на основе которого уточняются значения вязкости магнитной жидкости в каждом элементарном объеме с учетом градиента сдвига в нем и напряженности магнитного поля. В дальнейшем ведется расчет вязкостных потерь и сил трения в каждом элементарном объеме и их суммарных значений во всем зазоре [3].

При разработке реальной конструкции демпфера следует учитывать высоту полюса, в пределах которой на НМРЖ будет действовать сильное магнитное поле, и высоту катушки управления, где в зазоре поле очень слабое. Кроме того, следует учитывать и возможность увеличения тока в катушке управления в случае кратковременного использования демпфера и ряд других противоречивых эксплуатационных факторов. Важным является решение вопроса о материале корпуса, принципиально влияющем на процессы, происходящие в НМРЖ, текущей в зазоре между поршнем и корпусом.

Заключение

Применение НМРЖ в качестве рабочей среды в демпфирующих устройствах позволяет разрабатывать конструкции, в которых возможно изменение силовой характеристики и энергии вязкостной диссипации без разбора устройства, без замены отдельных конструктивных узлов для конкретных условий эксплуатации.

Воздействие на силовую характеристику и эффективность демпфирования можно осуществлять в процессе гашения колебаний в системе, что значительно расширяет область возможного применения демпфера.

Использование нанодисперсной магнитной жидкости позволяет выполнить требование сохранения рабочих параметров демпфера в течение длительного времени, что возможно при отсутствии заметной гравитационной и магнитной седиментации, чего нельзя добиться в магнито-реологических суспензиях.

Характер течений НМРЖ в магнитном поле существенно отличается от течения немагнитных жидкостей. Возникает необходимость более точ-

ного учета факторов, влияющих на течение, что возможно только при зависимом моделировании магнитных и тепловых полей, гидродинамических течений и совместного их рассмотрения и анализа. [11, 12]

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

Список литературы

1. Радчук А.В., Сабанеев Н.А., Морозов Н.А. Применение нанодисперсной магнитной жидкости в прямоходовых демпфирующих устройствах // XXI Междунар. инновационно-ориентированная конф. молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения «МИКМУС-2009», 16–18 ноября 2009: избранные труды конференции. – М., Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова (ИМАШ) РАН, 2010. – С. 111–118.
2. Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Радчук А.В. Демпфирующие устройства на основе нанодисперсных магнито-реологических жидкостей // XIV Междунар. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям, 7–10 сентября, Плес, Россия: сб. науч. тр. – Иваново, 2010. – С. 328–336.
3. Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Нестеров С.А. Управляемые демпфирующие устройства на основе нанодисперсных магнитных жидкостей // Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: тр. XIV Междунар. конф., 23–29 сентября 2012 г., Крым. – Алушта, 2012. – С. 54–55.
4. 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.
5. Морозов Н.А., Нестеров С.А. Экссентриситет магнитопроводящего кольца в кольцевом зазоре // Повышение эффективности энергетического оборудования: мат-лы VI Междунар. науч.-практ. конф. 6–8 декабря 2011 г. / под ред. А.В. Мошкарина. – Иваново, 2011. – С. 479–484.
6. Морозов Н.А., Радчук А.В. Оценка использования в демпфирующих системах с нанодисперсной магнитной жидкостью немагнитных подвижных элементов // Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем: сб. науч. тр. II Всеросс. науч. конф. 14–17 сентября 2009 г. / Ставропольский гос. ун-т. – Ставрополь, 2009. – С. 253–255.
7. Морозов Н.А., Казаков Ю.Б. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – 264 с.
8. Тарг С.М. Основные задачи теории ламинарных течений. – М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теоретич. лит-ры, 1951. – 420 с.
9. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. – М.: Мир, 1989. – 356 с.
10. Морозов Н.А., Нестеров С.А. О течении магнитной жидкости в кольцевом зазоре магнитной системы // Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем: сб. науч. тр. III Всеросс. науч. конф., 15–18 сентября 2011 г. / Ставропольский гос. ун-т. – Ставрополь, 2011. – С. 129–135.
11. Казаков Ю.Б. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2010. – 184 с.
12. Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Нестеров С.А. Моделирование демпфера с нанодисперсной магнито-реологической жидкостью и поршневого магнитной системой // Функциональные наноматериалы и высококачественные вещества: сб. мат-лов IV Междунар. конф. с элементами научной школы для молодежи. Суздаль. 1–5 октября 2012 г. – М.: ИМЕТ РАН, 2012. – С. 109–110. <http://www.fnm.imetran.ru>

References

1. Radchuk, A.V., Sabaneev, N.A., Morozov, N.A. Primenenie nanodispersnoy magnitnoy zhidkosti v pryamokhodovykh dempfiyushchikh ustroystvakh [Application of

nanodispersed magnetic liquids in forward dampers]. *Izbrannyye trudy XXI Mezhdunarodnoy innovatsionno-orientirovannoy konferentsii molodykh uchenykh i studentov po sovremennym problemam mashinovedeniya «MIKMUS-2009»* [The XXIst Innovation-oriented Young Scientists and Students Conference devoted to the modern problems of machine science «MIKMUS-2009», November 16-18, 2009, Selected Works]. Moscow, Institut mashinovedeniya im. A.A. Blagonravova (IMASH) RAN, 2010, pp. 111–118.

2. Kazakov, Yu.B., Morozov, N.A., Radchuk, A.V. Dempiruyushchie ustroystva na osnove nanodispersnykh magnitnoreologicheskikh zhidkostey [Damper Devices based on Nanodispersed Magnetorheological Liquids]. *Sbornik nauchnykh trudov XIV Mezhdunarodnoy Plesskoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam* [The XIVth International Plyos Conference of Nanodispersed Magnetic Liquids, September 7–10, Plyos, Russia: Collected Scientific Works]. Ivanovo, 2010, pp. 328–336.

3. Kazakov, Yu.B., Morozov, N.A., Nesterov, S.A. Upravlyaemye dempiruyushchie ustroystva na osnove nanodispersnykh magnitnykh zhidkostey [Controlled Damper Devices based on Nanodispersed Magnetic Liquids]. *Trudy XIV Mezhdunarodnoy konferentsii «Elektromekhanika, Elektrotekhnologii, Elektrotekhnicheskie materialy i Komponenty»* [Electromechanics, Electrical Technologies, Electrical and Technical Materials and Components: Works of the XIVth International Conference, September 23–29, 2012, Krym]. Alushta, 2012, pp. 54–55.

4. Morozov, N.A., Nesterov, S.A. Tipovye konstruksii demperov na osnove nanodispersnykh magnitnykh zhidkostey [Typical Damper Constructions based on Nanodispersed Magnetic Liquids]. *Sbornik nauchnykh trudov XV Mezhdunarodnoy Plesskoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam* [The XVth International Plyos Conference of Nanodispersed Magnetic Liquids, September 4-7, Plyos, Russia: Collected Scientific Works]. Ivanovo, 2012, pp. 307–314.

5. Morozov, N.A., Nesterov, S.A. Eksstentsrisitet magnitoprovodyashchego kol'tsa v kol'tsevom zazore [Eccentricity of magnetically conductive ring in the annular clearance]. *Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Povyshenie effektivnosti energeticheskogo oborudovaniya»* [Increasing Efficiency of Power Engineering Equipment: Works of VI International Scientific and Practical Conference. December 6–8, 2011]. Ivanovo, 2011, pp. 479–484.

6. Morozov, N.A., Radchuk, A.V. Otsenka ispol'zovaniya v dempiruyushchikh sistemakh s nanodispersnoy magnitnoy

zhidkost'yu nemagnitnykh podvizhnykh elementov [Estimation of Nonmagnetic Movable Elements Usage in Damper Systems with Nanodispersed Magnetic Liquids]. *Sbornik nauchnykh trudov II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Fiziko-khimicheskie i prikladnye problemy magnitnykh dispersnykh nanosistem»* [Physical and Chemical and Applied Issues of Magnetic Dispersed: Collected Scientific Works. The IIrd All-Russian Scientific Conference. September 14–17, 2009]. Stavropol', 2009, pp. 253–255.

7. Morozov, N.A., Kazakov, Yu.B. *Nanodispersnye magnitnye zhidkosti v tekhnike i tekhnologiyakh* [Nanodispersed Magnetic Liquids in Techniques and Technologies]. Ivanovo, 2011. 264 p.

8. Targ, S.M. *Osnovnye zadachi teorii laminarnykh techeniy* [Main Tasks of the Laminar Flows Theory]. Moscow-Leningrad, Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1951. 420 p.

9. Rozentsveyg, R. *Ferrogidrodinamika* [Ferrohydrodynamics]. Moscow, Mir, 1989. 356 p.

10. Morozov, N.A., Nesterov, S.A. O techenii magnitnoy zhidkosti v kol'tsevom zazore magnitnoy sistem [About Magnetic Liquids Flow in Annular Clearance of Magnetic Systems]. *Sbornik nauchnykh trudov III Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Fiziko-khimicheskie i prikladnye problemy magnitnykh dispersnykh nanosistem»* [Physical and Chemical and Applied Issues of Magnetic Dispersed: Collected Scientific Works. The IIIrd All-Russian Scientific Conference. September 15–18, 2011]. Stavropol', 2011, pp. 129–135.

11. Kazakov, Yu.B. *Germetizatory na osnove nanodispersnykh magnitnykh zhidkostey i ikh modelirovanie* [Sealers based on Nanodispersed Magnetic Liquids and their Designing]. Ivanovo, 2010. 184 p.

12. Kazakov, Yu.B., Morozov, N.A., Nesterov, S.A. Modelirovanie dempera s nanodispersnoy magnitnoreologicheskoy zhidkost'yu i porshnevoy magnitnoy sistemoy [Damper Designing with Nanodispersed Magnetorheological Liquids and Piston Magnetic System]. *Sbornik materialov IV Mezhdunarodnoy konferentsii s elementami nauchnoy shkoly dlya molodezhi «Funktional'nye nanomaterialy i vysokochistye veshchestva»* [Functional Nanomaterials and High-Clean Substances: Collected Works of the IVth International Conference with Elements of Scientific School for the Youth. Suzdal. October 1–5, 2012]. Moscow: IMET RAN, 2012, pp. 109–110. Available at: <http://www.fnm.imetran.ru>

Казаков Юрий Борисович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электрических машин,
телефон (4932)26-97-06,
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,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Нестеров Сергей Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина»,
инженер кафедры электрических машин,
e-mail: elmash@em.ispu.ru