

Найгерт К.В., Целищев В.А. Конструктивные особенности систем демпфирования и виброгашения, базирующихся на принципе неоднородного распределения диссипативно-жесткостных свойств рабочей среды // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 40–46. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.05

Naigert K.V., Tselishev V.A. Design features of described magnetorheological damping and vibration damping systems which are based on distributed dissipative-rigidity properties in the working fluid // *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 40–46. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.05

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 2, 2019
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.05
УДК 532.13

К.В. Найгерт¹, В.А. Целищев²

¹ Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

² Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

**КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ДЕМПФИРОВАНИЯ И ВИБРОГАШЕНИЯ,
БАЗИРУЮЩИХСЯ НА ПРИНЦИПЕ НЕОДНОРОДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ДИССИПАТИВНО-ЖЕСТКОСТНЫХ СВОЙСТВ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ**

Важной задачей в машиностроении, авиастроении, энергетике является обеспечение целостности систем и узлов, которая может быть нарушена в результате ударных и вибрационных нагрузок, что требует развития имеющихся и поиска новых конструкций средств виброзащиты и демпфирования. Актуальным решением данной проблемы может стать применение магнитореологических систем, отличающихся высокой эффективностью и адаптивностью рабочих характеристик в ответ на изменяющиеся параметры нагрузки в реальном времени, с сохранением всех преимуществ гидравлических систем амортизации. Также существующие магнитореологические системы демпфирования во многом сохраняют принцип работы гидравлических опор, а именно управление жесткостью жидкостной камеры за счет регулирования расхода рабочей среды на магнитореологическом дросселе с игнорированием возможности реализации в магнитореологической среде различных реологических и динамических эффектов, позволяющих моделировать диссипативно-жесткостные свойства магнитореологической опоры. Представлена запатентованная конструкция, реализующая оригинальный способ регулирования диссипативно-жесткостных свойств магнитореологической опоры.

Моделирование неоднородных распределенных диссипативно-жесткостных свойств магнитореологической рабочей среды позволяет создавать магнитореологические опоры с качественно новыми динамическими характеристиками. Применение данного метода реализации управления виброзащиты и демпфирования требует создания новых конструкций магнитореологических устройств. Приводится конструкция магнитореологического устройства амортизации, способного одинаково эффективно работать в режиме как виброзащиты, так и демпфирования. Разработанная конструкция является универсальной и легко модифицируемой, что позволяет адаптировать ее не только под различные режимы работы, но и оптимизировать характеристики рабочих камер – магнитореологической и рессорно-реологической, расширяя диапазон рабочих параметров. Проведена оценка вклада вязкости рабочей среды в диссипативные процессы магнитореологических виброопор. Произведена компоновка универсального магнитореологического устройства амортизации.

Ключевые слова: устройства виброзащиты, магнитореологические демпферы, системы амортизации, диссипативно-жесткостные свойства, реологические эффекты, динамические эффекты, магнитореологические опоры, рессорно-реологическая камера, магнитореологические системы, ударные и вибрационные нагрузки.

K.V. Naigert¹, V.A. Tselishev²

¹ South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russian Federation

² Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

**DESIGN FEATURES OF DESCRIBED MAGNETORHEOLOGICAL DAMPING
AND VIBRATION DAMPING SYSTEMS WHICH ARE BASED ON DISTRIBUTED
DISSIPATIVE-RIGIDITY PROPERTIES IN THE WORKING FLUID**

Ensuring the integrity of systems and units is important problem of machine / aircraft building and power engineering because the integrity can be compromised by shock and vibration loads. It requires the development of existing and searching for new construction of damping and vibration damping devices. Magnetorheological systems can serve as the current solution of this problem, are characterized by high efficiency and adaptability of performance in response to changed load parameters in the real time and retain all the advantages of hydraulic damping systems. Existing damping systems preserve the working principle of hydraulic supports in many respects. This principle of hydraulic supports is management of rigidity of fluid chamber by working fluid flow control on magnetorheological device and the possibility of implementation of various rheological and dynamic effects is ignored but rheological and dynamic effects are allowed to modeling the dissipative-rigidity properties of magnetorheological supports. Presented and patented magnetorheological support construction realizes original method of dissipative-rigidity properties control.

The distributed heterogeneous dissipative-rigidity properties in the magnetorheological working environment can create magnetorheological support with qualitatively new dynamic characteristics. The using of this control method of damping and vibration damping requires the creation of new magnetorheological device constructions. In the article it is given the magnetorheological support construction which is capable to working equally effective at using it for damping and vibration damping. Proposed construction is universal and easily modifiable; it allows adaptation of structure for different modes of operation and characteristic optimization of working chambers (magnetorheological and spring-rheological chambers) and extends the range of operating parameters. The contribution of working fluid viscosity to dissipative process in magnetorheological support was conducted. The layout of universally magnetorheological support is made.

Keywords: vibration damping devices, magnetorheological dampers, damping systems, dissipative-rigidity properties, rheological effects, dynamic effects, magnetorheological supports, spring-rheological chamber, magnetorheological systems, shock and vibration loads.

Введение

Абсорбция вибрации и ударных волн в жидкостных системах амортизации осуществляется путем диссипации механической энергии в рабочей среде. Диссипация энергии в жидкости протекает посредством взаимодействия малых структурных единиц – молекул. В реальных жидкостях, как известно, преобладающей составляющей процесса диссипации энергии является вязкостное трение. Ввиду этого целесообразно производить контроль диссипативных параметров системы амортизации путем регулирования вязкостных характеристик рабочей среды.

В последние годы магнитореологические системы амортизации стремительно вытесняют их гидравлические аналоги. Это связано с рядом преимуществ, таких как адаптивность и высокая скорость отклика на сигнал управления. Повышение эффективности магнитореологической системы амортизации возможно за счет создания специализированных конструкций систем демпфирования и виброгашения, приспособленных для работы в определенных динамических режимах [1–9].

Актуальность

Рабочие режимы систем демпфирования и виброгашения обладают существенными различиями, основным из которых является интенсивность динамических нагрузок. Очевидно наличие у демпферов выраженных рабочих режимов сжатия и отбоя вследствие ударного нагружения, что требует конструктивного решения контроля скорости движения поршня. В системах виброгашения основной задачей является именно диссипация энергии механических колебаний, которая осуществима за счет оптимизации диссипативно-жесткостных свойств опоры. Также немаловажной задачей является универсальность создаваемых систем демпфирования и виброгашения, поэтому разработка рациональных и модифицируемых конструкций магнитореологических амортизаторов, способных работать в режимах демпфирования и виброгашения, является актуальным направлением исследовательской деятельности.

Целью работы является разработка универсальной базовой системы амортизации, при-

менимой для создания высокоэффективных магнитореологических систем демпфирования и виброгашения.

Конструктивное решение

Конструкции магнитореологического демпфера и магнитореологической вибропоры созданы на базе запатентованного технического решения (рис. 1) [10].

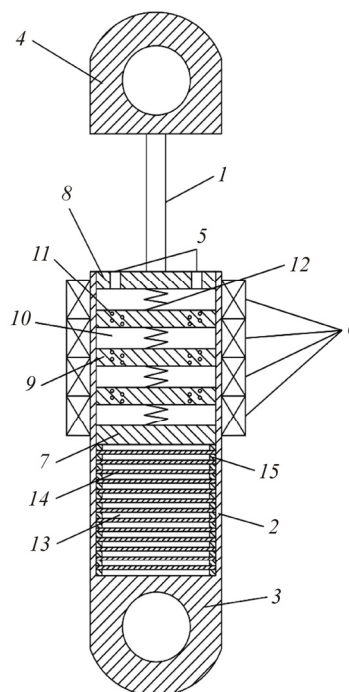


Рис. 1. Магнитореологический демпфер: 1 – шток, 2 – корпус, 3, 4 – узлы для посадки на объект демпфирования, 5 – отверстия для включения сливной и напорной линий, 6 – серия управляющих электромагнитов, 7 – подвижная межполостная перегородка, 8 – плунжер, 9 – цилиндрическая перегородка из немагнитного материала, 10 – субполость, 11 – спиральный канал, 12 – пружина, 13 – дилатантная жидкость, 14 – упругий жесткий диск, 15 – кольцо из упругого полимерного материала

Принцип работы адаптивного реологического амортизатора заключается в комбинации магнитореологических, реологических и механических эффектов демпфирования и виброгашения. Вольт-амперные характеристики задаются индивидуально для каждого электромагнита, регулирующего

реологические параметры рабочей среды в магнитореологических субполостях, что позволяет получать различные диссипативно-жесткостные свойства магнитореологической рабочей среды в каждой субполости с образованием магнитореологической рабочей камеры с неоднородно распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, оптимизирует процессы поглощения и рассеивания энергии магнитореологической рабочей полостью. Система спиральных каналов, выполненных в перегородках, способствует понижению инерционности жидкой среды. Основная силовая нагрузка передается в рессорно-реологическую камеру, заполненную дилатантной жидкостью. Рессорная система гасит часть механических колебаний, а дилатантная жидкость, находящаяся между упругими жесткими дисками передает нагрузку рессорной системе и равномерно распределяет ее по всей площади смачивания. Значительная часть диссипации энергии происходит в дилатантной жидкости. Жидкая среда также способствует гашению автоколебаний плунжеров и рессорной системы. Дорегулирование жесткости магнитореологической камеры реализовано за счет дроссельного управления расходом в подводящей и сливной линиях.

Как уже было отмечено, работа виброопоры заключается в диссипации энергии механических колебаний, а рост ее эффективности и повышение технических характеристик напрямую зависит от диссипативно-жесткостных свойств опоры.

Произвести оценку вклада вязкости рабочей среды в диссипативные процессы жидкостных виброопор можно на основе закона количества движения [11–20]:

$$A_{\tau} + A_s = dt \iiint_{\tau} \rho V \frac{dV}{dt} d\tau + dt \iiint_{\tau} D d\tau,$$

где V – объем, t – время, ρ – плотность, τ – напряжение деформации, A_{τ} – работа объемных сил, A_s – работа поверхностных сил, D – энергия рассеивания.

С учетом несжимаемости жидкости в интервале рабочих значений давления магнитореологической виброопоры

$$\begin{aligned} dt \iiint_{\tau} \rho V \frac{dV}{dt} d\tau &= \iiint_{\tau} \rho (V \cdot dV) d\tau = \\ &= \iiint_{\tau} \rho d \left(\frac{v^2}{2} \right) d\tau = d \iiint_{\tau} \frac{\rho v^2}{2} d\tau = dK, \end{aligned}$$

где v – скорость, K – кинетическая энергия. Следовательно,

$$A_{\tau} + A_s = dK + dt \iiint_{\tau} D d\tau.$$

Таким образом, чем больше энергии подвергается диссипации, тем меньше ее трансформируется в кинетическую энергию, следовательно, и незначительно смещение элементов жидкостной опоры:

$$D = \tau_x \frac{\partial V}{\partial x} + \tau_y \frac{\partial V}{\partial y} + \tau_z \frac{\partial V}{\partial z},$$

или

$$\begin{aligned} D = \mu &\left[2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \right. \\ &\left. + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right], \end{aligned}$$

где μ – вязкость

Из уравнения видно, что рост вязкости увеличивает диссипацию, но снижение значений компонент тензора скоростей деформации приводит к уменьшению диссипативных эффектов, поэтому с учетом вязкопластичных свойств магнитореологических сред, помещенных во внешние магнитные поля, нерационально высокие значения вязкости (когда жидкость движется как твердое тело) уменьшают D энергию рассеивания за единицу времени в единице объема.

Очевидно, что рационализация рабочего процесса магнитореологической опоры не требует внесения конструктивных дополнений в исходное техническое решение, а сводится к оптимизации схемы включения кольцевых электромагнитов с учетом амплитудных / частотных / фазных характеристик колебаний и профиля вибрационных волн в жидкой среде, а также к заданию вольт-амперных характеристик, требуемых для создания оптимальных реологических параметров рабочей среды.

Важной задачей в современном машиностроении является обеспечение универсальности проектируемых устройств.

Предложенная конструкция магнитореологической камеры опоры является модульной и легко модифицируемой, позволяет варьировать количество субкамер путем изменения количества цилиндрических перегородок из немагнитного материала и управляющих электромагнитов, блоки которых имеют резьбовые легкоъемные крепления на корпус (рис. 2, 3). Жесткость рессорно-реологической камеры регулируется за счет выбора количества рессор и полимерных колец, их физических свойств и реологических свойств жидкости, заполняющей камеру (рис. 4). Для гашения механических колебаний достаточно задействовать электромагниты, расположенные на уровне магнитореологических субкамер.

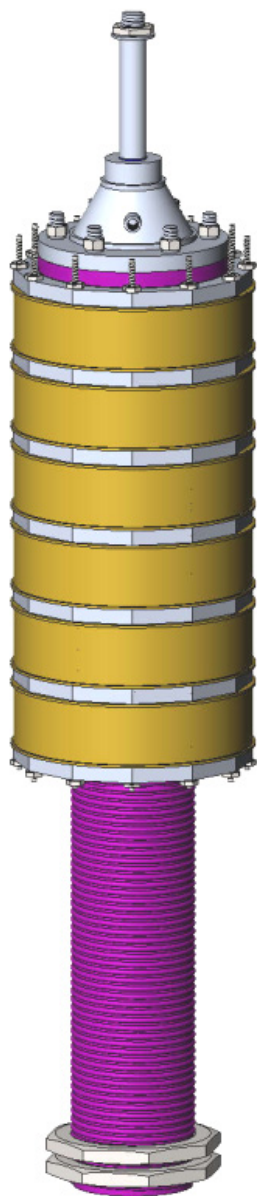


Рис. 2. Магнитореологическая опора

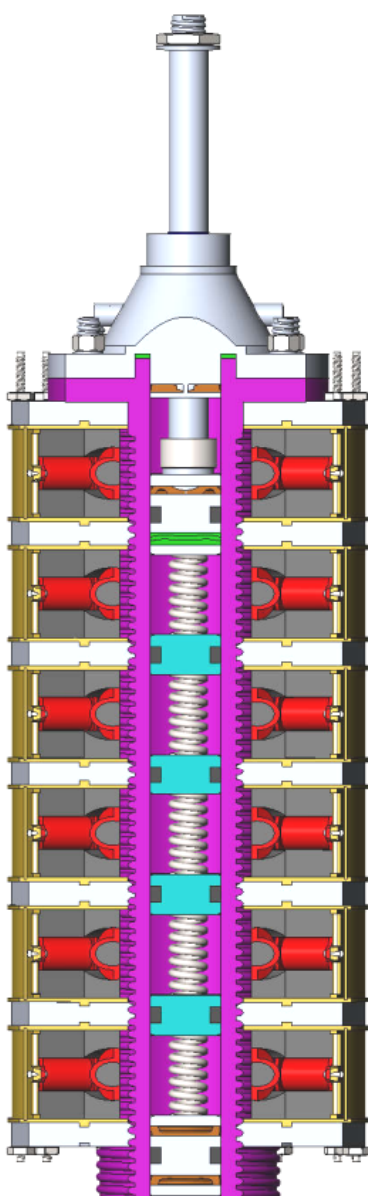


Рис. 3. Магнитореологическая камера опоры

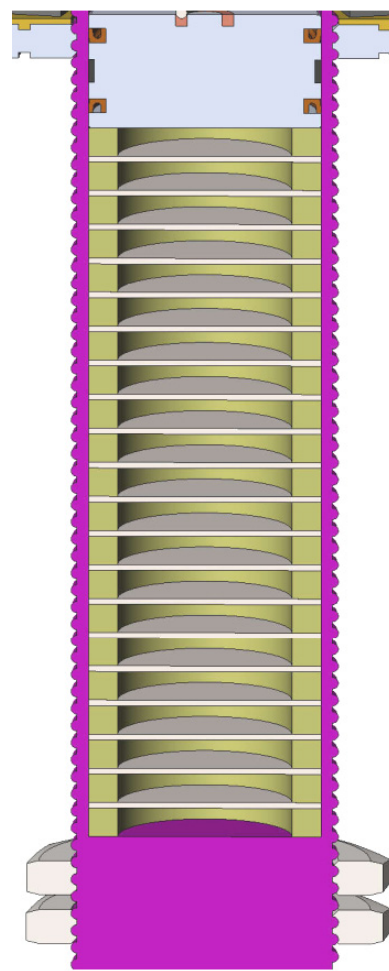


Рис. 4. Рессорно-реологическая камера опоры

Также представленная конструкция магнитореологической камеры позволяет создавать активные средства виброзащиты посредством подачи на электромагниты переменного электрического сигнала, что создает эффект осцилляции и способствует уходу колебаний объекта от резонанса.

Рабочий процесс демпфера состоит из режимов сжатия и отбоя, что требует отдельной оптимизации каждого из них. В режиме сжатия магнитореологический демпфер имеет схожие с магнитореологической виброопорой нагрузки, но со значительно большей интенсивностью. Ввиду этого необходимо улучшение динамики обработки сигнала управления, подаваемого на кольцевые индукторы. В режиме отбоя необходимо реализо-

вать управление скоростью перемещения поршня в исходное положение после снятия нагрузки.

Достижение плавного и высокоточного регулирования движения поршня возможно посредством выполнения штоковой полости и заполнения ее магнитореологической рабочей средой.

Управление расходными характеристиками магнитореологической жидкости через поршень осуществимо за счет выполнения в поршне магнитореологических дросселирующих устройств или путем изменения вязкостных характеристик магнитореологической рабочей среды в объеме штоковой полости, что требует установки кольцевого электромагнита на корпус штоковой полости (рис. 5). Это позволяет моделировать гидравличе-

ское сопротивление магнитореологической среды в объеме дросселя или штоковой полости, изменяя скорость перемещения поршня.

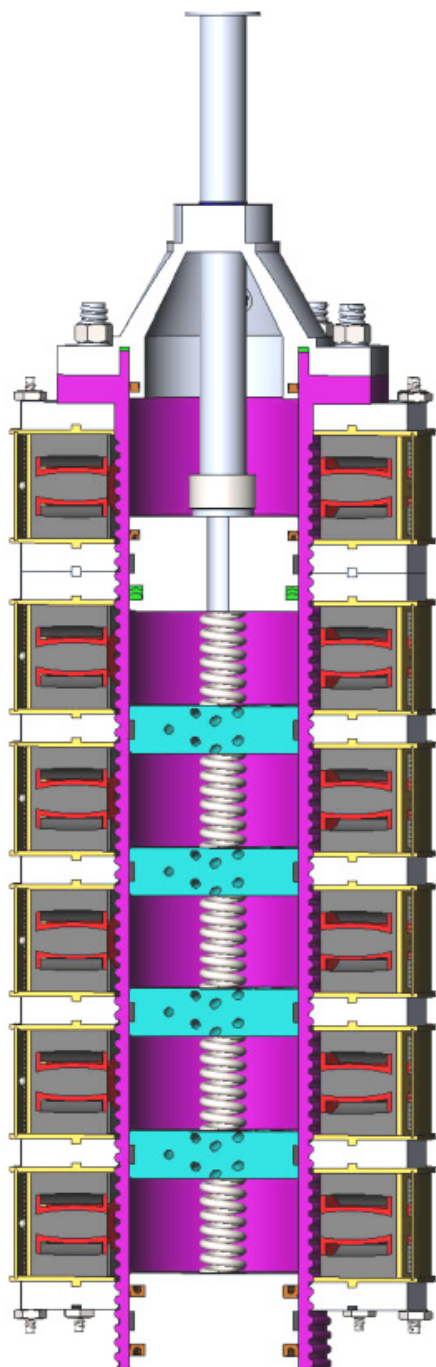


Рис. 5. Магнитореологическая камера демпфера

Реализация управления гидравлическим сопротивлением магнитореологической среды в объеме штоковой полости не требует существенных изменений в конструкции магнитореологической опоры, что делает разработанное устройство универсальным. Для организации управления параметрами магнитореологической среды, заполняющей штоковую полость, необходимо увеличить

расстояние между блоком электромагнитов, управляющих субкамерами, и блоком электромагнитов, предназначенных для штоковой полости. Это возможно сделать посредством добавления дополнительного штатного крепления и удаления одного полимерного кольца и одной рессоры, что не оказывает существенного влияния на жесткость рессорно-реологической камеры. Создание регулируемой штоковой полости требует лишь смещения плунжера относительно электромагнита, расположенного на корпусе, и включения его в процесс управления рабочими характеристиками магнитореологического демпфера.

Новизна

Предложенное техническое решение является универсальной базовой конструкцией адаптивной реологической системы амортизации, отличается от ранее известных возможностью создания магнитореологических рабочих камер с неоднородно распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, что позволяет разрабатывать высокоэффективные системы демпфирования и виброгашения. Разработанная конструкция является универсальной и легко модифицируемой.

Выводы

Разработанная конструкция магнитореологической опоры в совокупности с предложенной схемой включения кольцевых индукторов способна в значительной степени повысить эффективность процесса виброгашения.

Созданная конструкция магнитореологического демпфера рационализирует параметры рабочего процесса как в режиме сжатия, так и в режиме отбоя.

Список литературы

1. Магнитожидкостное устройство для гашения колебаний: пат. 2145394 Рос. Федерация / Бурченков В.Н. [и др.]. Оpubл. 10.02.2000, Бюл. № 4.
2. Регулируемый магнитореологический пневматический амортизатор: пат. 2449188 Рос. Федерация / Корчагин А.Б. [и др.]. Оpubл. 27.04.2012, Бюл. № 12.
3. Магнитореологический амортизатор: пат. 2232316 Рос. Федерация / Гусев Е.П., Плотников А.М., Воеводов С.Ю. Оpubл. 10.07.2004, Бюл. № 19.
4. Динамический гаситель: пат. 2354867 Рос. Федерация / Яманин И.А. [и др.]. Оpubл. 10.05.2009, Бюл. № 13.
5. Магнитореологический виброгаситель: пат. 2106551 Рос. Федерация / Кудряков Ю.Б. [и др.]. Оpubл. 10.03.1998.
6. Магнитореологическая позиционирующая и виброизолирующая система: пат. 2443911 Рос. Федерация / Михайлов В.П. [и др.]. Оpubл. 27.02.2012, Бюл. № 6.

7. Способ демпфирования колебаний подвижной системы и устройство для его осуществления: пат. 2426922 Рос. Федерация / Власов А.В. Оpubл. 20.08.2011, Бюл. № 23.

8. Fluid-filled cellular solids for controlled: US Patent / Deshmukh S.S., McKinley G.H. – 8091692. – 2012.

9. Магнитореологический амортизатор: пат. 2561610 Рос. Федерация / Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Охулков С.Н., Тумаков С.Ф. Оpubл. 27.08.2015, Бюл. № 24.

10. Адаптивный комбинированный реологический амортизатор: пат. 175044 Рос. Федерация / Найгерт К.В., Тутьнин В.Т. Оpubл. 20.11.2017, Бюл. № 32.

11. Мотавкин А.В., Покровский Е.М., Скородумов В.Ф. Определение реологических параметров полимерных композитов // Высокомолекулярные соединения. – 2005. – Т. А47, № 9. – С. 1728–1734.

12. Яхно О.М., Дубовицкий В.Ф. Основы реологии полимеров. – Киев: Виш. шк., 1976. – 185 с.

13. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. – М.: Мир, 1964. – 216 с.

14. Ronald G. Larson. The structure and rheology of complex fluids. – NY: Oxford University Press, 1999. – 682 p.

15. Фройштетер Г.Б., Данилевич С.Ю., Радионова Н.В. Течение и теплообмен неньютоновских жидкостей в трубах. – Киев: Наук. думка, 1990. – 216 с.

16. Shliomis M.I. Hydrodynamics of a liquid with intrinsic rotation // Sov. Phys., JETP. – 1967. – Vol. 24, no. 1. – P. 173–177.

17. Shliomis. M.I. Effective viscosity of magnetic suspensions // Sov. Phys., JETP. – 1972. – Vol. 34, no. 6. – P. 1291–1294.

18. Смык А.Ф. Физика: курс лекций / МАДИ. – М., 2016. – 293 с.

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

20. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2001. – 448 с.

References

1. Burchenkov V.N. et al. Magnitozhidkostnoe ustroistvo dlia gasheniia kolebaniia [Magnetofluid device for damping vibrations]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2145394 (2000).

2. Korchagin A.B. et al. Reguliruemyi magnitoreologicheskii pnevmaticheskii amortizator [Adjustable magnetorheological pneumatic shock absorber]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2449188 (2012).

3. Gusev E.P., Plotnikov A.M., Voevodov S.Iu. Magnitoreologicheskii amortizator [Magnetorheological shock absorber]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no 2232316 (2004).

4. Iamanin I.A. et al. Dinamicheskii gasitel' [Dynamic damper]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2354867 (2009).

5. Kudriakov Iu.B. et al. Magnitoreologicheskii vibrogasitel' [Magnetorheological vibration damper]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2106551(1998).

6. Mikhailov V.P. et al. Magnitoreologicheskaiia pozitisioniruushchaia i vibroizoliruushchaia Sistema [Magnetorheological positioning and vibration isolation system]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2443911 (2012).

7. Vlasov A.V. Sposob dempfirovaniia kolebaniia podvizhnoi si-stemy i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia [Method of damping vibrations of the mobile system and the device for its implementation]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2426922 (2011).

8. Deshmukh S.S., McKinley G.H. Fluid-filled cellular solids for controlled. US Patent no. 8091692 (2012).

9. Gordeev B.A., Erofeev V.I., Okhulkov S.N., Tumaakov S.F. Magnitoreologicheskii amortizator [Magnetorheological shock absorber]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2561610 (2015).

10. Naigert K.V., Tutynin V.T. Adaptivnyi kombinirovannyi reologicheskii amortizator [Adaptive combined rheological shock absorber]: Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 175044 (2017).

11. Motavkin A.V., Pokrovskii E.M., Skorodumov V.F. Opredelenie reologicheskikh parametrov polimernykh kompozitov [Determination of rheological parameters of polymer composites]. *Vysokomolekuliarnye soedineniia*, 2005, vol. A47, no. 9, pp. 1728–1734.

12. Iakhno O.M., Dubovitskii V.F. Osnovy reologii polimerov [Basics of polymer rheology]. Kiev: Vishchaia shkola, 1976, 185 p.

13. Uilkinson U.L. Nen'utonovskie zhidkosti [Non-newton fluids]. Moscow: Mir, 1964, 216 p.

14. Ronald G. Larson. The structure and rheology of complex fluids. NY: Oxford University Press, 1999, 682 p.

15. Froishteter G.B., Danilevich S.Iu., Radionova N.V. Tehenie i teploobmen nen'utonovskikh zhidkosteii v trubakh [Flow and heat exchange of non-Newtonian fluids in pipes]. Kiev: Naukova dumka, 1990, 216 p.

16. Shliomis M.I. Hydrodynamics of a liquid with intrinsic rotation. *Sov. Phys., JETP*, 1967, vol. 24, no. 1, pp. 173–177.

17. Shliomis. M.I. Effective viscosity of magnetic suspensions. *Sov. Phys., JETP*, 1972, vol. 34, no. 6, pp. 1291–1294.

18. Smyk A.F. Fizika: kurs lektzii [Physics: course of lectures]. MADI, Moscow, 2016, 293 p.

19. Naigert K.V., Rednikov S.N. Tekhnologii upravleniia raskhodnymi kharakteristikami potoka posredstvom izmeneniia reologicheskikh svoistv rabochikh sred [Flow rate management technologies by changing the rheological properties of operating media]. *Vestnik IuUrGU. Mashinostroenie*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 52–60. DOI: 10.14529/engin160206

20. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. Matematicheskie modeli neodnorodnoi anizotropnoi turbulentnosti vo vnutrennikh techeniiaakh [Mathematical models of heterogeneous anisotropic turbulence in internal currents]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2001, 448 p.

Получено 05.09.18

Опубликовано 20.06.19

Сведения об авторах

Найгерт Катарина Валерьевна (Челябинск, Россия) – кандидат технических наук, докторант кафедры автомобильного транспорта Южно-Уральского государственного университета; e-mail: kathy_naigert@mail.ru.

Целищев Владимир Александрович (Уфа, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной гидромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета; e-mail: pgl.ugatu@mail.ru.

About the authors

Katharina V. Naigert (Chelyabinsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Doctoral Student, Department of Automobile Transport, South Ural State University; e-mail: kathy_naigert@mail.ru.

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