

Найгерт К.В., Целищев В.А. Оценка температурных факторов, влияющих на рабочие процессы магнито-реологических систем нового поколения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 93–99. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.11

Naigert K.V., Tselishev V.A. Evaluation of temperature factors which influent on performance of new generation magnetorheological systems. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 93–99. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.11

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 3, 2019
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.11
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

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ
МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Стабильность рабочих процессов магнито-реологических систем имеет существенную зависимость от температурных характеристик рабочих сред, поэтому в рамках рассмотрения динамики процессов, протекающих в магнито-реологических системах, необходимо учитывать влияние на них термодинамических параметров. Магнито-реологическим системам присущи большие тепловыделения в объемах рабочих сред как под действием внешних электромагнитных полей, так посредством процессов жидкостного трения, которые резко повышаются по мере роста вязкости рабочих сред. В магнито-реологических системах нового поколения, предусматривающих комбинированный метод управления расходными характеристиками рабочей среды, можно избежать излишнего роста вязкости за счет перераспределения вклада различных составляющих комбинированного управляющего сигнала, например увеличения вклада гидродинамических или неньютоновских реологических эффектов в процесс регулирования потока магнито-реологической жидкости. Но эффекты турбулентности также повышают выраженность тепловыделений при жидкостном трении и приводят к иным новым факторам неустойчивости рабочих процессов. Турбулентность потока негативно сказывается на времени переходных процессов и значительно увеличивает время выхода системы на стационарные режимы. Ввиду этого основным гарантом стабильности рабочих процессов является стабильность температуры рабочей среды – эффективное термостатирование. В то же время, если рассматривать динамику магнито-реологических систем, наибольшим временем переходных процессов в объеме магнито-реологической рабочей среды обладают именно термодинамические процессы. Даже при обеспечении качественного термостатирования рабочей среды все равно имеет место градиент значений температуры по сечению потока, что дает право говорить о наличии недорегулирования температурных параметров жидкости в некотором моменте времени. Это связано с тем, что процессы жидкостного трения и тепловыделения протекают по всему жидкому объему, а процессы охлаждения организованы по поверхности жидкого объема, что свидетельствует о необходимости учета термодинамики процесса при моделировании динамики магнито-реологических систем. Разработанная оригинальная конструкция реологического дросселя-термостата, содержащего термоэлектрические полупроводниковые элементы, способна повысить эффективность термостатирования. Предложен метод оптимизации проектирования и расчета динамических и геометрических характеристик реологического дросселя-термостата. Представлены результаты численного моделирования рабочего процесса элемента управления термодинамическими параметрами системы термостатирования магнито-реологического привода нового поколения.

Ключевые слова: магнито-реологические системы, вязкость рабочих сред, реологические эффекты, термостатирование, термоэлектрические полупроводниковые элементы, температурные параметры, процессы охлаждения, реологический дроссель-термостат, комбинированное управление, переходные процессы.

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

EVALUATION OF TEMPERATURE FACTORS WHICH INFLUENT
ON PERFORMANCE OF NEW GENERATION MAGNETORHEOLOGICAL SYSTEMS

Stability of performance in magnetorheological systems has a significant dependence on the temperature characteristics of working environment; therefore the impact of thermodynamic parameters should be taken into account by consideration of the dynamics of processes in the magnetorheological systems. Magnetorheological system is inherent to the large heat dissipation in working environment's volume by external electromagnetic fields and to processes of liquid friction which are sharply increased at growing the viscosity of working environment. New generation magnetorheological systems use combined method of flow rate control of working environment; it helps to avoid excessive viscosity growth due to redistribution of the contribution of various components of combined control signal, for example, it could increase the contribution of hydrodynamic or non-Newtonian rheological effects in management process of magnetorheological fluid. But the effects of turbulence increase the

intensity of heat release by fluid friction too and lead to other new factors of instability in performance. In flow turbulence negatively affects the time of transients and increases the time to stationary modes. Therefore the main guarantor of the stability of work processes is temperature stability of working environment (effective temperature control). The largest time of transients in the magnetorheological systems' dynamics also have the thermodynamic processes in working environment's volume. Providing even more high quality thermostating of working environment could have distributed temperature gradient along the flow section; it leads to under regulation of the temperature parameters of the fluid at some point in time. This is due to the fact that the processes of liquid friction and heat release occur throughout the liquid volume but the cooling processes are organized over the surface of the liquid volume which indicates the need to take into account the thermodynamics of process in magnetorheological system. Developed original rheological-throttling thermostat construction with thermoelectric semiconductor elements can improve the efficiency of thermostating. The results of numerical simulation of control element's performance for thermodynamic parameters of thermostating system for new generation magnetorheological drive are proposed.

Keywords: magnetorheological systems, viscosity of working environment, rheological effects, thermostating, thermoelectric semiconductor elements, temperature parameters, cooling processes, rheological-throttling thermostat, combined control, transients.

Введение

Очевидно, что динамика рабочих процессов приводных систем является совокупной динамикой их элементов и определяется динамикой самого медленного элементного звена. В магнитореологических приводных системах, как правило, отсутствуют подвижные механические элементы, что положительно сказывается на динамике подобных систем. Управление рабочими параметрами магнитореологических приводов происходит за счет контроля расходных характеристик потока магнитореологической среды. Исходя из этого динамика магнитореологических систем зависит от динамики процессов изменения реологических свойств рабочих сред. Процессы изменения энергий взаимодействия частиц, обусловленные приложением внешних управляющих электромагнитных полей, выходят на стационарные режимы за достаточно короткое время, и переходные процессы длятся 100–200 нс. При этом реологические свойства магнитореологических сред зависят не только от энергии взаимодействия частиц магнетика, но и от вязкости жидкости носителя. Как известно, вязкость жидких сред имеет существенную зависимость от их температуры. Процессы теплопереноса в рабочей среде обладают скоростями значительно меньшего порядка в сравнении с процессами изменения энергий взаимодействия частиц в электромагнитных полях, следовательно, именно их необходимо рассматривать как одну из медленных составляющих процесса регулирования реологических свойств рабочей среды в магнитореологических приводах, наряду с релаксационными процессами частиц. Но в отличие от релаксационных процессов некоторые негативные аспекты в процессах теплопереноса легко решаемы посредством применения инновационных материалов, а повышение стабильности термодинамических характеристик – путем создания новых конструктивных решений [1–10].

Актуальность

Основными особенностями развития систем и механизмов являются: рост и расширение парамет-

ров, увеличение их стабильности, сокращение времени переходных процессов и снижение массогабаритных показателей.

Все это приводит к потребности создания принципиально новых конструкций элементов систем и применения концептуально иных материалов. Несмотря на то, что магнитореологические и полупроводниковые технологии существуют уже не первый десяток лет, они все еще имеют неисчерпаемый потенциал для развития и совершенствования за счет разработки оптимальных конструкций и применения новых функциональных материалов. Известной проблемой эксплуатации магнитореологических систем является повышение температуры магнитореологической жидкости во внешних электромагнитных полях, приводящее к нестабильности расходных характеристик. Ее решение возможно как за счет рационализации конструкции устройства управления термодинамическими параметрами, так и при помощи совершенствования физических свойств функциональных материалов. Зависимость вязкости рабочей среды от температурных параметров не стоит рассматривать исключительно как негативный фактор, так как он позволяет оказывать контролируемое влияние на реологические свойства – расходные характеристики потока магнитореологической жидкости, т.е. может служить инструментом управления рабочими процессами. Исходя из этого системы, способные осуществлять контроль и стабилизацию термодинамических процессов в рабочих средах магнитореологических сред, востребованы. Как уже было отмечено, динамические характеристики магнитореологических систем во многом определяются их термодинамикой, поэтому оптимизация процессов выделения/поглощения/переноса тепла значительно улучшает динамику рабочих процессов. Полупроводниковые термоэлектрические элементы позволяют создавать высокоэффективные компактные системы термостатирования, уменьшая затраты материалов и пространства. Следовательно, совершенствование конструкций системы термостатирования магнитореологических приводов и развитие методов их расчета являются актуальными направлениями [11, 12].

Численная модель

Как известно, в полупроводниках с ростом температуры увеличивается количество свободных носителей электрического заряда, как электронов в зоне проводимости, так и дырок в валентной зоне, а при наложении внешнего электрического поля в полупроводниковом материале появляется дрейфовая компонента скорости (у дырок в направлении поля, у электронов против направления поля) [13–15].

В полупроводниках плотность тока является суммой электронного и дырочного токов:

$$j = j_n + j_p = qn v_n + qp v_p,$$

где n, p – концентрации свободных электронов и дырок; v_n, v_p – дрейфовые скорости носителей заряда; q – электрический заряд.

Заряды у электронов и дырок противоположны по знаку, но так как векторы дрейфовых скоростей тоже направлены в противоположные стороны, суммарный ток есть сумма модулей значений электронного и дырочного токов.

Очевидно, что дрейфовые скорости носителей заряда имеют зависимость от внешнего электрического поля, поэтому введем коэффициенты пропорциональности:

$$\mu_n = \frac{v_n}{E};$$

$$\mu_p = \frac{v_p}{E},$$

где E – напряженность электрического поля.

$$j = qn\mu_n E + qp\mu_p E = \sigma_n E + \sigma_p E = \sigma E,$$

где σ_n, σ_p – электронная и дырочная составляющие электропроводности полупроводника; σ – электропроводность полупроводника.

Для определения технических характеристик и динамики тепловых эффектов рассмотрим рабочий процесс реологического дросселя-термостата [16], конструкция которого изображена на рис. 1, 2, для фиксированных объемов хладагента и магнитореологической рабочей среды.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i c_{\rho i} T_i) - \text{div}(\lambda_i \text{grad} T_i) = S_{T_i},$$

где T_i – температура; λ_i – коэффициент теплопроводности; $c_{\rho i}$ – теплоемкость; t – время; ρ_i – плотность; S_{T_i} – член уравнения, учитывающий источники и стоки теплоты.

Член, описывающий влияние переноса теплоты на теплопроводность по закону Фурье:

$$\text{div}(\lambda_i \text{grad} T_i).$$

Схемы расчетных областей изображены на рис. 1–3.

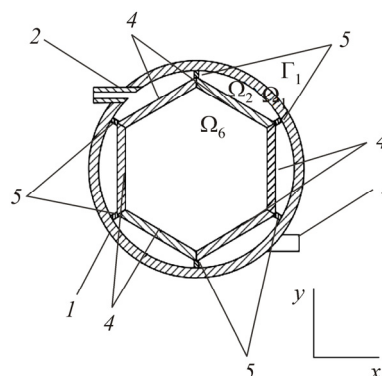


Рис. 1. Реологический дроссель-термостат: 1 – гидролиния; 2, 3 – патрубki; 4 – полупроводниковые термоэлектрические элементы; 5 – перфорированная пластина

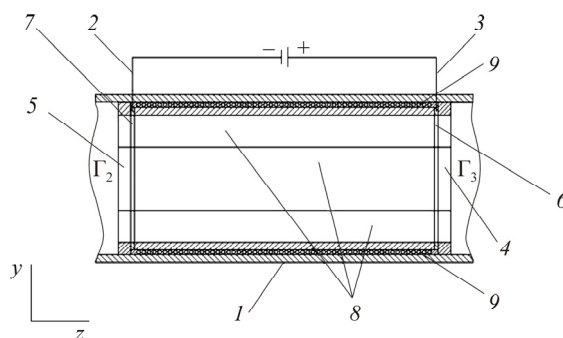


Рис. 2. Реологический дроссель-термостат: 1 – гидролиния; 2, 3 – тоководы; 4, 5 – герметизирующая пластина; 6, 7 – токопроводящая пластина; 8 – полупроводниковые термоэлектрические элементы; 9 – перфорированная пластина

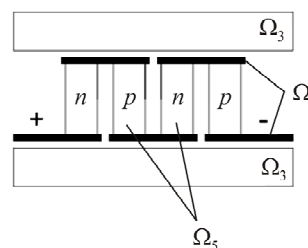


Рис. 3. Термоэлектрический элемент Пельтье

Начальные и граничные условия:

$$T_i = T_i(\Omega_i, t);$$

$$T_i(\Omega_i)|_{t=0} = T_0;$$

по оси x :

$$(-\lambda_1 \text{grad} T, \vec{n})|_{\Gamma_1} = \alpha_1 (T_1 - T_{\Gamma_1})|_{\Gamma_1};$$

по оси z :

$$(-\lambda_6 \text{grad} T, \vec{n})|_{\Gamma_2} = \alpha_6 (T_6 - T_{\Gamma_2})|_{\Gamma_2};$$

$$(-\lambda_6 \text{grad} T, \vec{n})|_{\Gamma_3} = \alpha_6 (T_6 - T_{\Gamma_3})|_{\Gamma_3},$$

где α_1, α_6 – средний по поверхности коэффициент теплоотдачи среде; \vec{n} – единичный вектор внешней нормали; $T_{\Gamma_1}, T_{\Gamma_2}, T_{\Gamma_3}$ – температура граничной среды.

Член уравнения, учитывающий источники и стоки теплоты:

$$S_{T_i} = S_{C_i} + S_{P_i} T.$$

Для Ω_1, Ω_3

$$S_{T_i} = 0.$$

Тепловые эффекты, возникающие в полупроводнике, формируют мощность тепловыделения в полупроводнике, их можно классифицировать следующим образом [17–22]:

Эффект Пельтье

$$Q_p = BeT_j A,$$

где A – площадь сечения n и p ветвей; B – коэффициент, характеризующий тепловые эффекты в спае.

Холодный спай: $B = -1; -Q$.

Горячий спай: $B = 1; +Q$.

Коэффициент Зеебека

$$e = |e_n| + e_p,$$

где e_n, e_p – коэффициенты Зеебека n и p ветвей.

Эффект Джоуля

$$Q_j = j^2 R_{p-n} H_{p-n} A,$$

где H_{p-n} – высота полупроводника.

Удельное электрическое сопротивление ветвей термоэлемента

$$R_{p-n} = R_n + R_p,$$

где R_n, R_p – сопротивления n и p ветвей.

Эффект Томсона

$$Q_T = Y_T (j, \text{grad} T) H_{p-n} A.$$

Коэффициент Томсона

$$Y_T = T \left(\frac{\partial e}{\partial T} \right).$$

Тепловые эффекты в хладагенте:

$$S_{C_2} = 0;$$

$$S_{P_2} = -\frac{k_2 A_2}{V_2},$$

где V_2 – эффективный объем хладагента; A_2 – площадь поверхности контакта хладагента.

Горячий спай: $B = 1; +Q$;

$$S_{C_4} = \frac{N_{p-n} A_4}{V_4} e_j T_4,$$

$$S_{P_4} = 0.$$

Холодный спай: $B = -1; -Q$;

$$S_{C_4} = 0;$$

$$S_{P_4} = \frac{N_{p-n} A_4}{V_4} e_j,$$

где A_4 – площадь поверхности контакта спая; V_4 – эффективный объем спая; N_{p-n} – число n и p ветвей.

Коэффициент Томсона $\left(\frac{\partial e}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial x} < 0$:

$$S_{C_5} = \frac{N_{p-n} A_5 H_{p-n}}{V_5} \left[j^2 R_{n-p} + \left(\frac{\partial e}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial x} j T_5 \right],$$

$$S_{P_5} = 0.$$

Коэффициент Томсона $\left(\frac{\partial e}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial x} > 0$:

$$S_{C_5} = \frac{N_{p-n} A_5 H_{p-n}}{V_5} j^2 R_{n-p};$$

$$S_{P_5} = \frac{N_{p-n} A_5 H_{p-n}}{V_5} \left(\frac{\partial e}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial x} j,$$

где A_5 – площадь поверхности контакта полупроводника; V_5 – эффективный объем полупроводника.

Тепловые эффекты в магнитореологической рабочей среде:

$$S_{C_6} = \frac{k_6}{V_6} \frac{\partial T}{\partial x} A_6;$$

$$S_{P_6} = 0,$$

где A_6 – площадь поверхности контакта магнитореологической рабочей среды; V_6 – эффективный объем магнитореологической рабочей среды; k_2, k_6 – коэффициенты теплопроводности сред.

Мощность

$$P = \frac{Q_C}{\epsilon},$$

где Q_C – поглощаемая тепловая мощность,

$$Q_C = \alpha I \Delta T,$$

где I – сила тока; α – термоЭДС полупроводников; ε – холодильный коэффициент:

$$\varepsilon = \frac{T_C}{T_h - T_C} \frac{M - T_h / T_C}{M + 1},$$

где M – вспомогательный коэффициент;

$$M = \sqrt{1 + 0,5z(T_h + T_C)},$$

где z – добротность полупроводникового вещества; T_h – горячая поверхность; T_C – холодная поверхность.

Рассмотрим вариант оптимизации рабочих процессов реологического дросселя-термостата посредством варьирования материалов и сред.

Результаты численного моделирования

Получены зависимости градиента температур на горячей и холодной поверхностях термоэлектрического элемента от мощности (рис. 4–6) для двух вариантов охлаждающих сред и двух вариантов материала поверхностей термоэлектрических элементов.

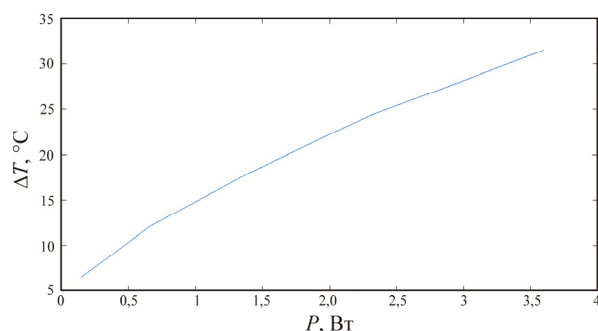


Рис. 4. Зависимость градиента температур на горячей и холодной поверхностях от мощности для случая «рабочая среда – циркулирующий воздух», материал поверхностей термоэлектрического элемента – композитная керамика

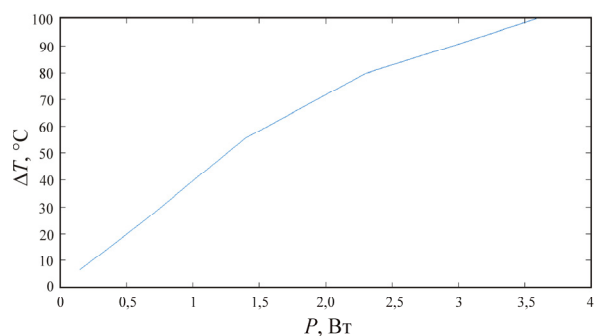


Рис. 5. Зависимость градиента температур на горячей и холодной поверхностях от мощности для случая «рабочая среда – жидкий хладагент», материал поверхностей термоэлектрического элемента – композитная керамика

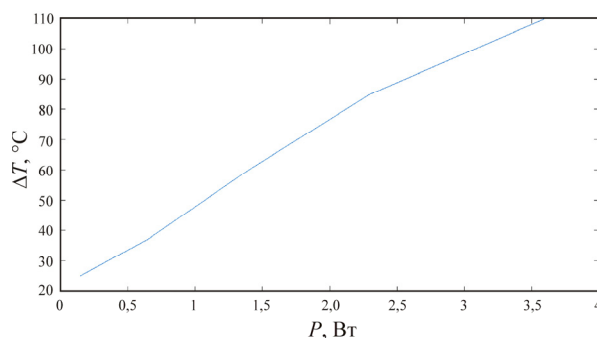


Рис. 6. Зависимость градиента температур на горячей и холодной поверхностях от мощности для случая «рабочая среда – жидкий хладагент», материал поверхностей термоэлектрического элемента – сплав алюминия

Рассмотрены варианты зависимости градиента температур на горячей и холодной поверхностях от мощности при принудительной циркуляции хладагента и воздуха в полости, образованной корпусом и горячей стороной термоэлектрического элемента. Результаты численного моделирования показывают высокую эффективность жидкостного охлаждения по сравнению с воздушным охлаждением, так как реализация большего градиента температур на поверхностях термоэлектрического элемента обеспечивает высокую скорость достижения заданных значений температуры и стабилизации рабочих параметров приводной системы.

Проведены расчеты зависимости градиента температур на горячей и холодной поверхностях от мощности для поверхностей термоэлектрического элемента, выполненных из композитной керамики, и поверхностей термоэлектрического элемента, изготовленных из алюминиевого сплава. Очевидно, что алюминиевый сплав обладает более высокой теплопроводностью в сравнении с керамикой на основе оксида алюминия. Это подтверждается результатами численного эксперимента.

Результаты моделирования подтверждают, что описанная численная модель позволяет рационализировать выбор охлаждающих сред и материалов для реологического дросселя-термостата, что дает возможность оптимизировать работу магнитореологических приводных систем и сократить время их переходных процессов.

В то же время предложенная численная модель способна производить оптимизацию по целому ряду других физических и геометрических параметров.

Новизна исследовательской работы

Разработаны методологические основы повышения эффективности проектирования реологического дросселя-термостата, отличающиеся возможностью определения оптимальных геометри-

ческих характеристик его элементов за счет оценки тепловых потоков, наблюдаемых в объемах сред и элементов конструкции в процессе эксплуатации реологического дросселя-термостата, позволяющие производить расчет потока тепла, отводимого от рабочей среды привода к рабочей среде охлаждающего жидкостного контура, с учетом термических процессов, протекающих в полупроводниковых ветвях сборки термоэлектрических элементов.

Получены результаты численного моделирования реологического дросселя-термостата оригинальной запатентованной конструкции, позволяющие оценить эффективность возможных вариантов оптимизации систем термостатирования, созданных на основе реологического дросселя-термостата и рационализации его рабочих параметров по ряду геометрических характеристик элементов реологического дросселя-термостата и физических свойств материалов и сред.

Выводы

Полученные результаты доказали эффективность выбранных вариантов оптимизации рабочих процессов реологического дросселя-термостата и рационализации его рабочих параметров.

Очевидна существенная зависимость динамики рабочих процессов от физических свойств функциональных материалов и эффективность оптимизации динамики магнитореологических систем за счет рационального применения конструктивных материалов.

Разработанная конструкция реологического дросселя-термостата эффективна при малых массогабаритных показателях.

Применение систем термостатирования с полупроводниковыми термоэлектрическими элементами, изготовленными из сверхпроводящих материалов, позволяет существенно снизить время переходных процессов в магнитореологических приводах.

Список литературы

1. Мотавкин А.В., Покровский Е.М., Скородумов В.Ф. Определение реологических параметров полимерных композитов // *Высокомолекулярные соединения*. – 2005. – Т. А47, № 9. – С. 1728–1734.
2. Яхно О.М., Дубовицкий В.Ф. Основы реологии полимеров. – Киев: Вищ. шк., 1976. – 185 с.
3. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. – М.: Мир, 1964. – 216 с.
4. Ronald G. Larson. The structure and rheology of complex fluids. – NY: Oxford University Press, 1999. – 682 p.
5. Фройштетер Г.Б., Данилевич С.Ю., Радионова Н.В. Течение и теплообмен неньютоновских жидкостей в трубах. – Киев: Наук. думка, 1990. – 216 с.

6. Shliomis M.I. Hydrodynamics of a liquid with intrinsic rotation // *Sov. Phys., JETP* 24. – 1967. – No. 1. – P. 173–177.
7. Shliomis M.I. Effective viscosity of magnetic suspensions // *Sov. Phys., JETP* 34. – 1972. – No. 6. – P. 1291–1294.
8. Смык А.Ф. Физика: курс лекций / МАДИ. – М., 2016. – 293 с.
9. Найгерт К.В., Редников С.Н. Автоматизация рабочего процесса магнитореологического дросселирующего устройства // *Вестник ЮУрГУ. Машиностроение*. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 23–32. DOI: 10.14529/engin160203
10. 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
11. Bethancourt A., Echigo R., Yoshida H. Thermoelectric conversion analysis in a counterflow heat exchanger // *Proceed. of the 12th Int. Conf. on Thermoelectrics / American Institute of Physics*. – Tokyo, Japan, 1994. – Vol. 12. – P. 299–304.
12. Bejan A. *Advanced engineering thermodynamics*. – 3 ed. – NY: John Wiley & Sons, Inc., 2006. – 920 p.
13. Optimal design of a multi-couple thermoelectric generator / J. Chen, B. Lin, H. Wang, G. Lin // *Semiconductor Sci. Tech.* – 2000. – Vol. 15. – P. 184–188.
14. Cobble M.H. Analysis of a thermoelectric device having contact resistance // *Proceed. of the 11th Int. Conf. on Thermoelectrics*. – Arlington, TX, IEEE, 1992. – P. 218–222.
15. Cobble M.H. *Handbook of thermoelectrics*. – CRC Press, Inc., 1995. – 720 p.
16. Реологический дроссель-термостат: пат. 173746 РФ / Найгерт К.В., Тутьнин В.Т. Опубл. 07.09.2017, Бюл. № 25.
17. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
18. Сакун И.А. Холодильные машины. – Л.: Машиностроение, 1985. – 510 с.
19. Себеси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 592 с.
20. Аскадский А.А., Кондрашенко В.И. Компьютерное материаловедение полимеров. Т. 1. Атомно-молекулярный уровень. – М.: Научный мир, 1999. – 544 с.
21. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2001. – 448 с.
22. Котур В.И., Скомская М.А., Храмова Н.Н. Электрические измерения и электрические приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.

References

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

2. Iakhno O.M., Dubovitskii V.F. Osnovy reologii polimerov [Basics of polymer rheology]. Kiev: Vishchaia shkola, 1976, 185 p.
3. Uilkinson U.L. Nen'utonovskie zhidkosti [Non-Newtonian fluids]. Moscow: Mir, 1964, 216 p.
4. Ronald G. Larson. The structure and rheology of complex fluids. NY: Oxford University Press, 1999, 682 p.
5. Froishteter G.B., Danilevich S.Iu., Radionova N.V. Techenie i teploobmen nen'utonovskikh zhidkosti v trubakh [Flow and heat exchange of non-Newtonian fluids in pipes]. Kiev: Naukova dumka, 1990, 216 p.
6. Shliomis M.I. Hydrodynamics of a liquid with intrinsic rotation. *Sov. Phys., JETP* 24, 1967, no. 1, pp. 173-177.
7. Shliomis M.I. Effective viscosity of magnetic suspensions. *Sov. Phys., JETP* 34, 1972, no. 6, pp. 1291-1294.
8. Smyk A.F. Fizika: kurs lektsii [Physics: course of lectures]. MADI. Moscow, 2016, 293 p.
9. Naigert K.V., Rednikov S.N. Avtomatizatsiia ra-bochego protsessa magnitoreologicheskogo drosseliruiushchego ustroistva [Workflow automation of the magnetorheological throttling device]. *Vestnik IuUrGU. Mashinostroenie*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 23-32. DOI: 10.14529/engin160203
10. Naigert K.V., Rednikov S.N. Tekhnologii upravleniia rashodnymi 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
11. Bethancourt A., Echigo R., Yoshida H. Thermoelectric conversion analysis in a counterflow heat exchanger. *Proceed. of the 12th Int. Conf. on Thermoelectrics. American Institute of Physics*. Tokyo, Japan, 1994, vol. 12, pp. 299-304.
12. Bejan A. Advanced engineering thermodynamics. 3 ed. NY: John Wiley & Sons, Inc., 2006, 920 p.
13. Chen J., Lin B., Wang H., Lin G. Optimal design of a multi-couple thermoelectric generator. *Semiconductor Sci. Tech.*, 2000, vol. 15, pp. 184-188.
14. Cobble M.H. Analysis of a thermoelectric device having contact resistance. *Proceed. of the 11th Int. Conf. on Thermoelectrics*. Arlington, TX, IEEE, 1992, pp. 218-222.
15. Cobble M.H. Handbook of thermoelectrics. CRC Press, Inc., 1995, 720 p.
16. Naigert K.V., Tutynin V.T. Reologicheskii drossel'-termostat [Rheological thermostat throttle]: Patent Rossiiskaia Fedratsiia no. 173746 (2017).
17. Patankar S. Chislennye metody resheniia zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti [Numerical methods of solving problems of heat exchange and fluid dynamics]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 152 p.
18. Sakun I.A. Kholodil'nye mashiny [Cooling machines]. Leningrad: Mashinostroenie, 1985, 510 p.
19. Sebesi T., Bredshou P. Konvektivnyi teploobmen. Fizicheskie osnovy i vychislitel'nye metody [Convective heat exchange. Physical basis and calculation methods]. Moscow: Mir, 1987, 592 p.
20. Askadskii A.A., Kondrashenko V.I. Komp'uternoe materialovedenie polimerov [Computer material science of polymers]. Vol. 1. Atomno-molekuliarnyi uroven'. Moscow: Nauchnyi mir, 1999, 544 p.
21. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. Matematicheskie modeli neodnorodnoi anizotropnoi turbulentnosti vo vnutrennikh techeniakh [Компьютерная материаловедение полимеров]. Izdatel'stvo Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2001, 448 p.
22. Kotur V.I., Skomskaia M.A., Khramova N.N. Elektricheskie izmereniia i elektricheskie pribory [Electrical Measurements and Electrical Devices]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 400 p.

Получено 05.09.18

Опубликовано 26.09.19

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