

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.638.5:536.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ МИКРОПРОВОДА Fe–Rh

© 2022 г. О. О. Павлухина^а, *, В. В. Соколовский^а, В. Д. Бучельников^а, М. А. Загребин^а

^аЧелябинский Государственный Университет, ул. Братьев Кашириных, 129, Челябинск, 454001 Россия

*e-mail: pavluhinaoo@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.2021 г.

После доработки 12.12.2021 г.

Принята к публикации 22.12.2021 г.

На сегодняшний день выбор геометрии ячейки магнитного охлаждения является актуальной задачей в области магнитного охлаждения. В данной работе в рамках теоретического моделирования исследовано протекание процессов теплопереноса в трехмерных ячейках магнитного охлаждения, содержащих микропровода Fe–Rh. Скорости потока теплоносителя составляли 2.5 и 0.7 м/с. Получено, что в случае диаметра микропроводов 10 и 50 мкм время релаксации составляет 0.8 и 1.4 мс при скорости 2.5 м/с и 1.8 и 3.3 мс при скорости 0.7 м/с соответственно. Показано, что использование микропроводов Fe–Rh в ячейках магнитного охлаждения может быть перспективно для технологии магнитного охлаждения.

Ключевые слова: FeRh, магнитные микропровода, теоретическое моделирование, магнитокалорический эффект

DOI: 10.31857/S001532302204009X

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы большой интерес научных групп по всему миру привлекают магнитокалорические материалы. Это обусловлено тем, что данные материалы могут быть использованы в качестве рабочего тела магнитных холодильных машин [1, 2]. Магнитные охлаждающие системы обладают рядом преимуществ, в частности, используемое рабочее тело может быть изолировано от окружающей среды, так как является твердым телом. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что магнитные охлаждающие установки могут быть эффективнее по сравнению с парогазовыми установками.

В связи с этим внимание ученых сосредоточено на поиске новых материалов в качестве рабочего тела, которые являются дешевыми и обладают значительным магнитокалорическим эффектом (МКЭ). В сплавах на основе Fe–Rh с составом, близким к эквиаtomному, на сегодняшний день наблюдаются рекордные значения МКЭ [3, 4]. Например, в работе [4] показано, что метамагнитный фазовый переход в сплаве Fe₅₁Rh₄₉ наблюдается при температуре около 310 К. При этом величина МКЭ в изменяющемся магнитном поле вплоть до 2 Тл составила 13 К.

Изучение процессов теплообмена является одной из основных отраслей современной науки и имеет большое практическое значение в различ-

ных отраслях современной промышленности. Очевидно, что выбор геометрии магнитной охлаждающей ячейки является важной проблемой в технологии магнитного охлаждения. В данном случае соотношение площади поверхности к объему охлаждающего материала должно быть как можно больше. Такое соотношение позволит теплоносителю быстрее отводить тепло от охлаждаемого материала. Вследствие этого, для технологии магнитного охлаждения перспективными представляются ленты, тонкие пластины, сетки, провода [5–9]. Так, например, в работе [5] представлен обзор использования в технологии магнитного охлаждения проводов, тонких пленок и лент. Обсуждены перспективы и проблемы использования тонких пленок в технологии магнитного охлаждения. Авторы отмечают, что тонкие пленки могут быть использованы в технологии магнитного охлаждения, однако необходимо учитывать, что их свойства могут отличаться от свойств массивных образцов.

Работа [7] посвящена исследованию перспектив использования параллельных и гофрированных пластин в конструкции ячейки магнитного охлаждения. В частности, в научной печати есть работы, посвященные теоретическому исследованию устройств магнитного охлаждения, где в качестве рабочего тела выступают параллельные пластины [8–10]. Авторами представлены резуль-

таты численного моделирования устройства, где в качестве рабочего тела выступают параллельные пластины и показана роль паразитных тепловых потерь.

В работе [11] приведен обзор различных теоретических моделей ячеек магнитных охлаждающих систем, рассмотрены параметры, используемые в численном моделировании. Отмечено, что подавляющее большинство работ посвящено моделированию одномерной геометрии ячеек ввиду ее легкости, тогда как двух- и трехмерное моделирование остается более сложным.

Стоит отметить, что особый интерес исследователей привлекают микропровода [12–15]. Это связано с перспективами их применения. Недавние экспериментальные исследования показали, что микропровода сплавов Гейслера могут быть перспективными кандидатами для магнитного охлаждения вблизи комнатной температуры [6].

В наших предыдущих работах исследована трехмерная система микропроводов [16, 17]. Провода были расположены в один слой. Реальные охлаждающие ячейки должны содержать большое количество проводов, расположенных в несколько слоев. Для дальнейшей оптимизации структуры ячейки магнитного охлаждения было исследовано расположение проводов друг относительно друга в ячейке магнитного охлаждения [18]. В работе [18] исследованы два типа геометрии расположения проводов $\text{Ni}_{45}\text{Co}_5\text{Mn}_{37}\text{In}_{13}$ в ячейке магнитного охлаждения и влияние расположения проводов на протекание процессов теплопереноса. Показано, что шахматное расположение проводов в ячейке магнитного охлаждения является оптимальным. Однако следует отметить, что величина МКЭ в сплаве $\text{Ni}_{45}\text{Co}_5\text{Mn}_{37}\text{In}_{13}$ более чем в 2 раза ниже, чем в сплаве $\text{Fe}_{51}\text{Rh}_{49}$, который на сегодняшний день имеет рекордно большие значения МКЭ. В связи с этим представляет интерес изучение распределения теплопередачи и теплофизических свойств в ячейках магнитного охлаждения, содержащих микропровода на основе $\text{Fe}_{51}\text{Rh}_{49}$.

ДЕТАЛИ ВЫЧИСЛЕНИЙ

При создании математической модели процесса теплопереноса необходимо рассмотреть два механизма теплопереноса: теплопроводности и конвекции, а также учесть движение теплоносителя. В результате необходимо решить уравнения Навье–Стокса для несжимаемой жидкости, уравнение непрерывности и теплопроводности. Уравнение непрерывности выражает закон сохранения массы в элементе объема, т.е. непрерывного потока жидкости или газа. Жидкость считается несжимаемой. При исследовании процессов теп-

лопереноса исследована следующая система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \mathbf{u} = 0, \\ \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \eta \Delta \mathbf{u}, \\ \rho C_{p(l)} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k_l \nabla T_l) = \nabla(-\rho C_{p(l)} \mathbf{u} T), \\ \rho_l C_{p(s)} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k_s \nabla T_s) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где k – теплопроводность; индексы (l) и (s) обозначают жидкость и твердое тело соответственно; $T = T(x, y, z)$ – температура в момент времени t , C_p – теплоемкость; ρ – плотность, η – вязкость, $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, y, z, t)$ – вектор скорости жидкости в точке (x, y, z) в пространстве в момент времени t .

В качестве граничных условий приняты следующие допущения. Граничное условие, позволяющее описать вязкое движение жидкости, предусматривает обращение в ноль скорости жидкости на неподвижных твердых поверхностях. Граничные условия для уравнения теплопроводности заключаются в том, что поток тепла, поступающий из одной среды, должен быть равен потоку, поступающему во вторую среду. Стенки ячейки магнитного охлаждения являются теплоизолированными. Для решения системы уравнений (1) с учетом граничных условий применен метод конечных элементов [19, 20].

Моделирование процессов теплопереноса выполнено на трехмерной ячейке магнитного охлаждения, которая содержит 12 микропроводов $\text{Fe}_{51}\text{Rh}_{49}$, расположенных в шахматном порядке (рис. 1а). Длина проводов составляла 1 мм, тогда как их диаметр варьировали от 10 до 50 мкм. Высота ячейки составила 0.5 мм, ширина – 0.4 мм и длина – 2.5 мм. Численно моделирование теплопереноса в представленной ячейке реализовано на сетке, где число элементов зависит от выбранной конфигурации. Так, например, число элементов для системы, содержащей микропровода диаметром 10 мкм, составляет 23 109, для системы, содержащей микропровода диаметром 50 мкм, составляет 8489. Каждый элемент представлен набором дифференциальных уравнений (1).

Параметры для теплоносителя и сплава $\text{Fe}_{51}\text{Rh}_{49}$ взяты из работ [3, 21, 22]. В соответствии с тем, что процесс переноса тепла в охлаждающей ячейке необходимо моделировать вблизи температуры фазового перехода, то в качестве температуры теплоносителя, поступающего в систему, принята температура метамагнитного перехода 310 К. Скорость теплоносителя составила 0.7 и 2.5 м/с. Начальная температура микропроводов и теплоносителя ($T_0 = 297$ К) принята как разница температуры фазового перехода и величины МКЭ ($\Delta T_{\text{ad}} = -13$ К [4]).

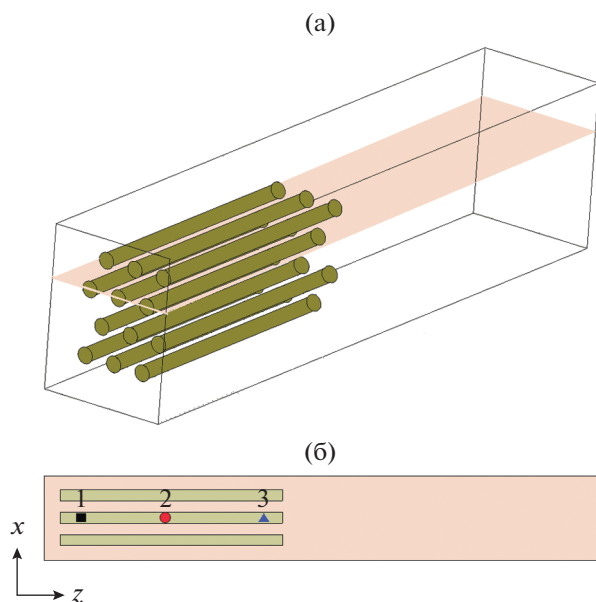


Рис. 1. Исследуемая в работе ячейка магнитного охлаждения, содержащая 12 микропроводов сплава Fe–Rh (а). Координаты точек контроля температуры для микропровода, окруженного другими проводами (б). Поток теплоносителя подается в ячейку слева.

Для исследований времени релаксации выбран провод, находящийся в середине ячейки, окруженный соседними микропроводами. В реальных системах провода будут располагаться в окружении, аналогичном проводу, находящемуся ближе к центру ячейки. Оптимальные контрольные точки для проведения температурных “замеров” взяты по аналогии с работой [18]. На рис. 1а представлена плоскость, в которой расположен исследуемый провод, на рис. 1б представлены контрольные точки. Временем релаксации будем считать время, в течение которого разница температур между жидкостью и микропроводом (в точке контроля 3) уменьшится в e раз, т.е. составит 4.78 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим результаты расчета времени релаксации температуры для микропроводов диаметром 10 и 50 мкм. На рис. 2 и 3 представлены зависимости времени релаксации для различных скоростей теплоносителя. Скорость теплоносителя составляет 0.7 (рис. 2) и 2.5 м/с (рис. 3). Точки на рисунках соответствуют символам на рис. 1б.

Из представленных данных видно, что в случае диаметра микропроводов 50 мкм, время релаксации составляет 3.3 мс, для скорости теплоносителя 0.7 м/с и 1.4 мс для скорости теплоносителя 2.5 м/с. Для диаметров микропроводов

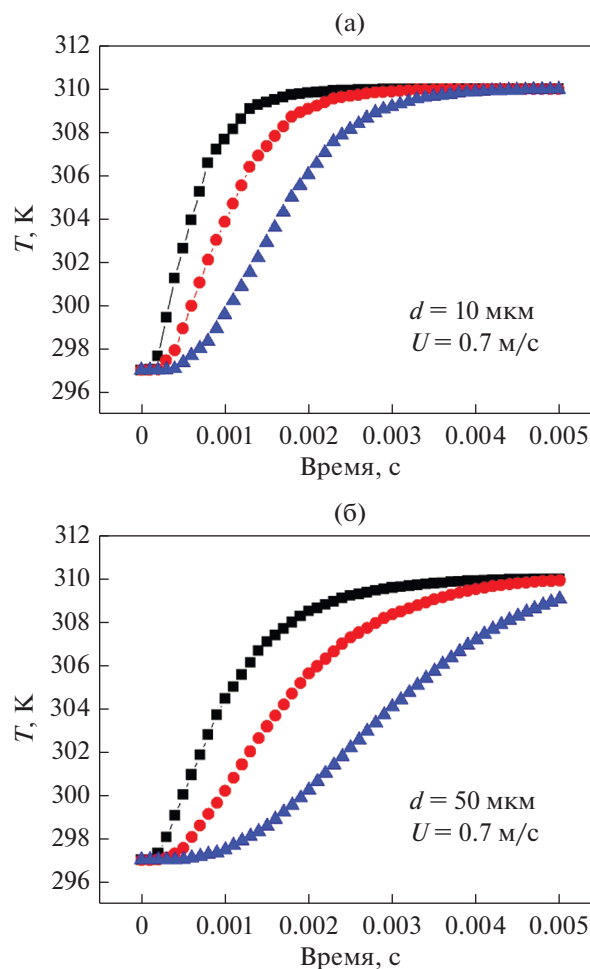


Рис. 2. Зависимость температуры от времени для микропроводов с различными диаметрами. Диаметры микропроводов: 10 (а) и 50 мкм (б). Температурные кривые представлены для различных областей (см. точки на рис. 1). Скорость теплоносителя на входе в ячейку составляет 0.7 м/с.

10 мкм, время релаксации составляет 1.8 мс для скорости теплоносителя 0.7 м/с и 0.8 мс для скорости теплоносителя 2.5 м/с. Из полученных данных можно сделать вывод о том, что увеличение скорости теплоносителя приводит к уменьшению времени релаксации для микропроводов с фиксированным диаметром.

В ходе исследования были оценены распределения температур для различных скоростей теплоносителя. На рис. 4 представлено распределение потока теплоносителя для толщины микропроводов 50 мкм и скорости потока теплоносителя 0.7 м/с в момент времени, соответствующий времени релаксации. Как видно из представленных данных, лимитирующим фактором протекания процессов теплопереноса в микропроводах является теплоперенос в проводах, находящихся в центре ячейки.

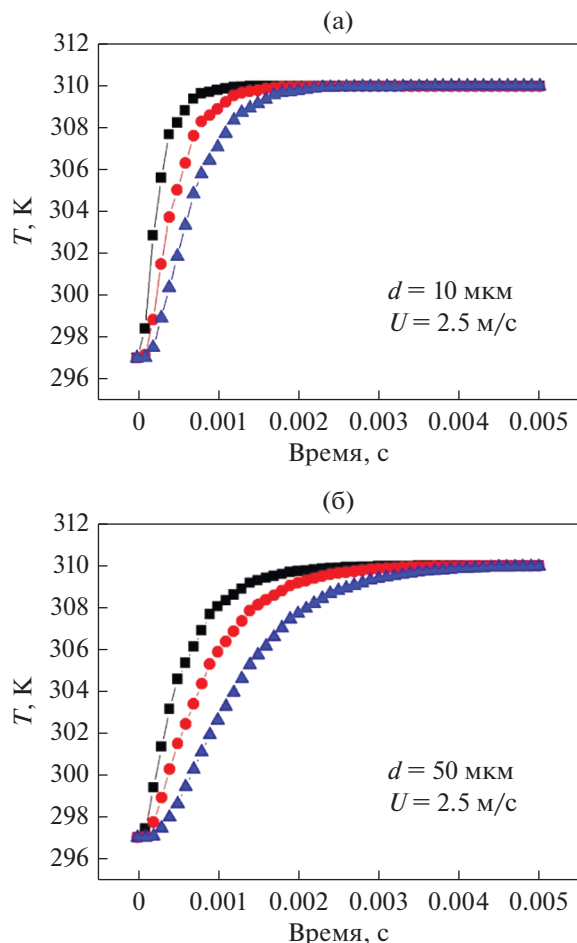


Рис. 3. Зависимость температуры от времени для микропроводов с различными диаметрами. Диаметры микропроводов: 10 (а) и 50 мкм (б). Температурные кривые представлены для различных областей (см. точки на рис. 1). Скорость потока теплоносителя на входе в ячейку составляет 2.5 м/с.

Влияние скорости потока теплоносителя на время релаксации микропроводов различного диаметра изображено на рис. 5. В нашей предыдущей работе [18], посвященной исследованию процессов теплопереноса в ячейках из микропроводов $\text{Ni}_{45}\text{Co}_5\text{Mn}_{37}\text{In}_{13}$, скорость потока теплоносителя составляла 2.5 м/с. Времена релаксации для толщины микропроводов 10 и 50 мкм составили 0.8 и 2.2 мс соответственно. Можно видеть, что полученные значения времени релаксации для сплавов Fe–Rh и Ni–Co–Mn–In принимают близкие значения. Однако величина МКЭ в $\text{Fe}_{51}\text{Rh}_{49}$ в 2 раза выше, соответственно можно сделать вывод о том, что за аналогичный отрезок времени теплоперенос происходит эффективнее. Таким образом, использование микропроводов $\text{Fe}_{51}\text{Rh}_{49}$ в ячейках магнитного охлаждения может иметь перспективы для технологии магнитного охлаждения.

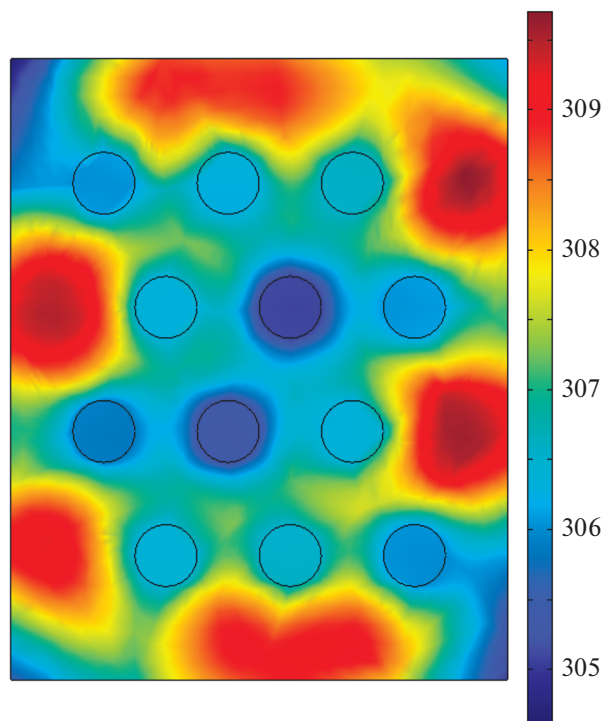


Рис. 4. Распределение поля температуры (К) в ячейке магнитного охлаждения. Результаты представлены для диаметра микропровода 50 мкм в момент времени, соответствующий времени релаксации при скорости потока теплоносителя 0.7 м/с.

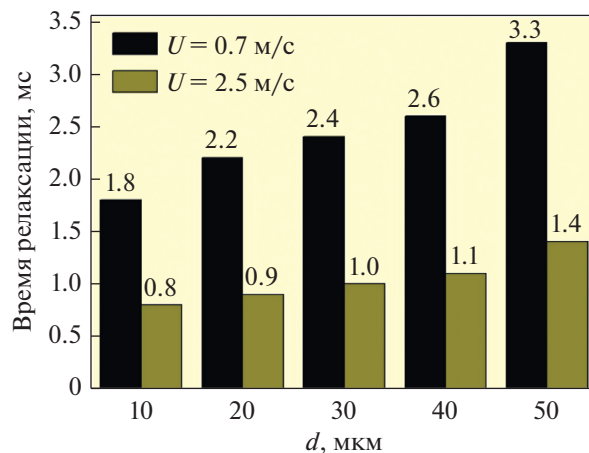


Рис. 5. Время релаксации для микропроводов с различным диаметром при скорости теплоносителя 0.7 и 2.5 м/с.

ВЫВОДЫ

В настоящее время сплавы на основе Fe–Rh с составом, близким к эквиатомному, демонстрируют рекордные значения МКЭ. В связи с этим большой интерес представляет изучение процессов теплопереноса в ячейках магнитного охлаждения,

содержащих данные сплавы. В рамках теоретического моделирования в работе исследованы процессы теплопереноса в трехмерных ячейках магнитного охлаждения, содержащих микропровода $\text{Fe}_{51}\text{Rh}_{49}$, проведена оценка распределения температур, получены времена релаксации для различных скоростей теплоносителя. Получено, что при скорости теплоносителя 2.5 м/с времена релаксации для толщины микропроводов 10 и 50 мкм составили 0.8 и 1.4 мс соответственно. Показано, что увеличение скорости теплоносителя в более чем 3 раза приводит к уменьшению времени релаксации более чем в 2 раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Минобрнауки РФ № 075-01391-22-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kitanovski A., Peter W.E.* Thermodynamics of magnetic refrigeration // *Int. J. Refrig.* 2006. V. 29. P. 3–21.
2. *Pecharsky V.K., Gschneidner K.A., Tsokol A.O.* Recent developments in magnetocaloric materials // *Rep. Prog. Phys.* 2005. V. 68. P. 1479–1539.
3. *Chirkova A., Skokov K.P., Schultz L., Baranov N.V.* Giant adiabatic temperature change in FeRh alloys evidenced by direct measurements under cyclic conditions // *Acta Mater.* 2016. V. 106. P. 15–21.
4. *Nikitin S.A., Myalikgulyev G., Tishin A.M., Annaorazov M.P., Asatryan K.A., Tyurin A.L.* The magnetocaloric effect in $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$ compound // *Physics Letters A.* 1990. V. 148. № 6. P. 363–366.
5. *Khovaylo V.V., Rodionova V.V., Shevyrtalov S.N., Novosad V.* Magnetocaloric effect in “reduced” dimensions: Thin films, ribbons, and microwires of Heusler alloys and related compounds // *Phys. Status Solidi B.* 2014. V. 251. № 10. P. 2104–2113.
6. *Zhukova V., Ipatov M., Granovsky A., Zhukov A.* Magnetic properties of Ni–Mn–In–Co Heusler-type glass-coated microwires // *J. Appl. Phys.* 2014. V. 115. P. 17A939.
7. *Sarlah A., Tusek J., Poredos A.* Comparison of thermohydraulic properties of heat regenerators applicable to active magnetic refrigerators // *J. Mech. Eng.* 2012. V. 58. P. 16–22.
8. *Nielsen K.K., Bahl C.R.H., Smith A., Bjork R., Pryds N., Hattel J.* Detailed numerical modeling of a linear parallel-plate Active Magnetic Regenerator // *Int. J. Refrig.* 2009. V. 32. № 6. P. 1478–1486.
9. *Engelbrecht K., Tusek J., Nielsen K.K., Kitanovski A., Bahl C.R.H., Poredos A.* Improved modelling of a parallel plate active magnetic regenerator // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2013. V. 46. № 25. P. 255002.
10. *Taskaev S., Khovaylo V., Karpenkov D., Radulov I., Ulyanov M., Bataev D., Dyakonov A., Gunderov D., Skokov K., Gutfleisch O.* Plastically deformed Gd–X (X = Y, In, Zr, Ga, Bi) solid solutions for magnetocaloric regenerator of parallel plate geometry // *Journal of Alloys and Compounds.* 2018. V. 754. P. 207–214.
11. *Nielsen K.K., Tusek J., Engelbrecht K., Schopfer S., Kitanovski A., Bahl C.R.H., Smith A., Pryds N., Poredos A.* Review on numerical modeling of active magnetic regenerators for room temperature applications // *Int. J. Refrig.* 2011. V. 34. № 3. P. 603–616.
12. *Vazquez M., Chiriac H., Zhukov A., Panina L., Uchiyama T.* On the state-of-the-art in magnetic microwires and expected trends for scientific and technological studies // *Phys. Status Solidi A.* 2011. V. 208. № 3. P. 493–501.
13. *Ilyn M.I., Zhukova V., Santos J.D., Sanchez M.L., Priada V.M., Hernando B., Larin V., Gonzalez J., Tishin A.M., Zhukov A.* Magnetocaloric effect in nanogranular glass coated microwires // *Phys. Status Solidi A.* 2008. V. 205. № 6. P. 1378–1381.
14. *Zhukov A., Rodionova V., Ilyn M., Aliev A.M., Varga R., Michalik S., Aronin A., Abrosimova G., Kiselev A., Ipatov M., Zhukova V.* Magnetic properties and magnetocaloric effect in Heusler-type glass-coated NiMnGa microwires // *J. Alloys Compd.* 2013. V. 575. P. 73–79.
15. *Zhukova V., Aliev A.M., Varga R., Aronin A., Abrosimova G., Kiselev A., Zhukov A.* Magnetic properties and MCE in Heusler-type glass-coated microwires. // *J. Supercond. Nov. Magn.* 2013. V. 26. P. 1415–1419.
16. *Pavlyukhina O., Sokolovskiy V., Buchelnikov V.* Theoretical modeling of heat transfer processes in Ni–Co–Mn–In magnetic wires // *Refrigeration Science and Technology.* 2016. P. 202–205.
17. *Pavlyukhina O., Sokolovskiy V., Buchelnikov V.* Modeling of heat transfer processes in Ni_2MnIn magnetic wires // *Phys. Status Solidi A.* 2016. V. 213. № 2. P. 390–398.
18. *Pavlyukhina O.O., Sokolovskiy V.V., Buchelnikov V.D., Zagrebina M.A.* Theoretical study of heat transfer processes in Heusler-type magnetic microwires. // *Lett. Mater.* 2019. V. 9. № 4. 395–399.
19. *Zienkiewicz O.C., Morgan K.* Finite Elements and Approximations. John Wiley & Sons, N.Y., 1983.
20. *Zienkiewicz O.C., Taylor R.L.* The Finite Element Method: Fluid Dynamics. (Butterworth-Heinemann: London, 2000).
21. *Washburn E.W.*, International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology. V. 5. McGraw-Hill, N.Y., 1929.
22. *Hao Y., Zhang L., Zhu J.* The electronic structure, phase transition, elastic, thermodynamic, and thermoelectric properties of FeRh: high-temperature and high-pressure study // *Zeitschrift für Naturforschung A.* 2020. V. 75. № 9. P. 789–801.