

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.632

### ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$

© 2022 г. Н. З. Абдулкадирова<sup>a, \*</sup>, А. Г. Гамзатов<sup>a, \*\*</sup>, А. М. Алиев<sup>a, \*\*\*</sup>, P. Gebara<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, 367015 Россия

<sup>b</sup>Institute of Physics, Czestochowa University of Technology, Armii Krajowej 19 Av., Czestochowa, 42-200 Poland

\*e-mail: nnurizhat@mail.ru

\*\*e-mail: gamzatov\_adler@mail.ru

\*\*\*e-mail: lowtemp@mail.ru

Поступила в редакцию 13.11.2021 г.

После доработки 14.12.2021 г.

Принята к публикации 22.12.2021 г.

Проведены исследования теплоемкости ( $C_p$ ), магнитокалорического эффекта ( $\Delta T$ ,  $\Delta S_M$ ), температуропроводности  $\eta(T)$  и электросопротивления  $\rho(T)$  сплава  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  в интервале температур 80–300 К в магнитных полях до 8 Тл. Изменение энтропии  $\Delta S_M$  в магнитном поле 1.8 Тл составило 4.6 Дж/(кг К). На температурной зависимости  $\rho(T)$  вблизи температуры Кюри  $T_C$  наблюдается аномалия в виде резкого уменьшения электросопротивления в узком температурном диапазоне, а затем восстанавливается его металлический ход. Вблизи  $T_C$  в магнитном поле 1.8 Тл обнаружена прямая связь между  $\Delta T$  и изменением сопротивления  $\Delta\rho$ :  $\Delta T(T) = \alpha\Delta\rho(T)$ . На зависимости  $\eta(T)$  вблизи  $T_C$  наблюдается ярко выраженный минимум, что свидетельствует об интенсивном рассеянии носителей тепла на флуктуациях магнитного параметра порядка, а также, возможно, на искажениях кристаллической решетки.

**Ключевые слова:** теплоемкость, магнитокалорический эффект, температуропроводность, электросопротивление

**DOI:** 10.31857/S0015323022040027

#### ВВЕДЕНИЕ

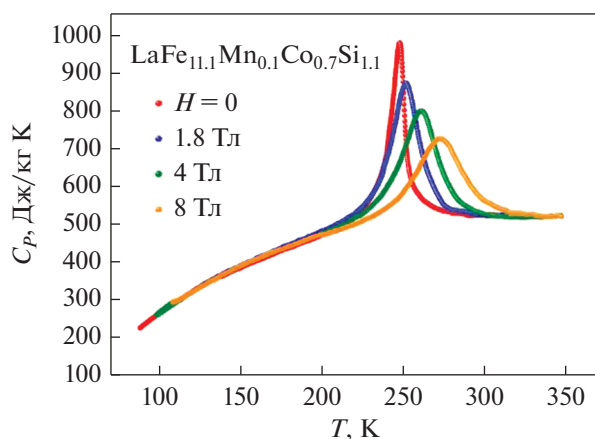
Магнитные материалы, демонстрирующие высокие значения магнитокалорического эффекта (МКЭ) в интервале температур 250–320 К при изменении магнитного поля  $\Delta\mu_0 H = 1\text{--}2$  Тл, привлекают большое внимание в связи с возможностью их применения в технологии магнитного охлаждения. Есть много требований к материалам, которые будут использовать в технологии магнитного охлаждения.

С практической точки зрения активный регенератор магнитного холодильника должен характеризоваться большими значениями магнитокалорического эффекта (МКЭ) при комнатной температуре. Группа сплавов  $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$  обладает этими свойствами благодаря высокому содержанию железа и превосходным магнитным свойствам структуры типа  $\text{NaZn}_{13}$  [1–6]. Управлять магнитокалорическими свойствами данных сплавов можно как изменением соотношения компонентов исходного состава  $\text{La}(\text{FeSi})_{13}$ , так и заменой элементов основного состава другими металлами. Влияние замещения исходного состава атомами других элементов в

системе  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  на магнитокалорические свойства исследовано в работе [7], где было обнаружено, что такое замещение приводит к уменьшению температуры Кюри  $T_C$ , а также к уменьшению адиабатического изменения температуры  $\Delta T$  при изменении магнитного поля. Магнитокалорические свойства сплавов  $\text{La}\text{--}\text{Fe}\text{--}\text{Si}$  довольно хорошо исследованы [8–13]. Анализ литературных данных указывает на скудность информации о теплофизических свойствах данных сплавов, а также на отсутствие прямых измерений магнитокалорического эффекта в циклических магнитных полях. В данной работе представлены результаты исследований теплофизических и магнитокалорических свойств для сплава  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  в интервале температур 80–300 К в магнитных полях до 8 Тл.

#### ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Образец  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  был синтезирован путем дуговой плавки высокочистых компонентов под низким давлением Ar. Слитки пере-



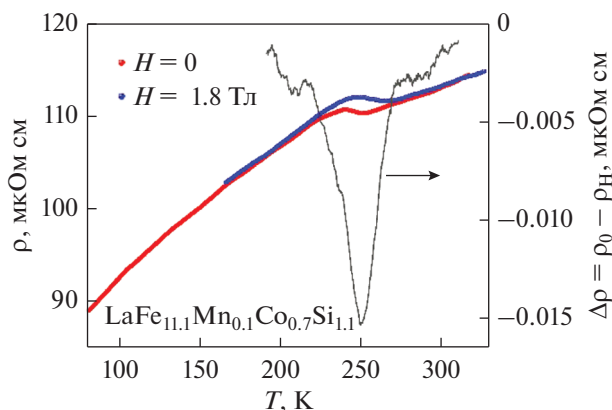
**Рис. 1.** Температурная зависимость удельной теплоемкости для  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  в магнитных полях до 8 Тл.

плавляли несколько раз, чтобы обеспечить их однородность. Затем образец запаивали в кварцевые трубки под низким давлением аргона, отжигали при 1323 К в течение 15 суток и охлаждали в ледяной воде. Структурные и магнитные исследования описаны в [9].

Теплоемкость и температуропроводность измеряли методом модуляции теплового потока. Прямые измерения адиабатического изменения температуры  $\Delta T$  при изменении магнитного поля проводили модуляционным методом [14]. Данная методика позволяет регистрировать изменение температуры с точностью не хуже  $10^{-3}$  К. Суть метода заключается в том, что к образцу прикладывают циклическое магнитное поле, которое благодаря МКЭ индуцирует периодическое изменение температуры образца. Это изменение температуры регистрируют синхронным детектором посредством дифференциальной термопары, один спай которой приклеен к исследуемому образцу, другой — к основанию ячейки. Частота изменения циклического магнитного поля в данных экспериментах составляла 0.2 Гц. Переменное магнитное поле напряженностью 1.8 Тл создавали источником магнитного поля производства фирмы АМТ&С. В качестве источника магнитного поля до 8 Тл использована криомагнитная система замкнутого цикла [14]. Электросопротивление измеряли стандартным четырехзондовым методом.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения удельной теплоемкости сплава  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  в интервале температур 80–350 К в магнитных полях до 8 Тл представлены на рис. 1. Максимум аномалии теплоемкости в нулевом поле наблюдается при  $T = 247$  К, которую мы принимаем за  $T_C$ . На температурной



**Рис. 2.** Температурная зависимость электросопротивления для  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  в поле  $H = 0$  и 1.8 Тл. Линия — зависимость  $\Delta\rho(T)$  при  $H = 1.8$  Тл.

зависимости  $C_p(T)$  наблюдаются аномалии, связанные с фазовым переходом (ФП) ферромагнетик—парамагнетик (ФМ—ПМ). В магнитном поле максимум зависимости  $C_p(T)$  сильно подавляется и смещается в сторону более высоких температур. Такое поведение аномалии теплоемкости в магнитном поле при фазовом переходе ФМ—ПМ является характерной для большинства магнитных материалов [15].

На рис. 2 приведена температурная зависимость электросопротивления в поле  $H = 0$  и 1.8 Тл с максимумом при  $T = 247$  К. Как видим, вблизи  $T_C$  наблюдается аномалия на зависимости  $\rho(T)$  при  $H = 0$ . Ниже  $T_C$  сопротивление увеличивается с ростом температуры, показывая металлический характер, но выше  $T_C$  сопротивление резко уменьшается в узком температурном диапазоне, а затем восстанавливает металлический температурный ход. Такое поведение связано с тем, что суммарный вклад как от электрон-фононного, так и электрон-магнонного рассеяния в ПМ-фазе меньше, чем в ФМ-фазе, в отличие от обычных ФМ металлических материалов.

Обычно считается, что основной вклад в электросопротивление вблизи магнитных и магнито-структурных фазовых переходов первого рода вносят электрон-фононное и электрон-магнонное рассеяние. В большинстве ФМ металлических материалов электрон-магнонное составляющая обычно приближается к максимуму при  $T_C$ , а затем становится слабо зависящей от температуры выше  $T_C$ . Как показали авторы [16], в соединениях  $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{11.9}\text{Si}_{1.1}$  ( $x = 0.04, 0.06, 0.08$ ) магнитный фазовый переход при  $T_C$  сопровождается большим изменением параметра решетки с сохранением исходной кристаллической структуры. Поэтому можно предположить, что изменение рассеяния электронов на фононах вблизи фа-

зового перехода ФМ–ПМ может быть причиной уменьшения сопротивления в ПМ фазе в образце  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$ .

Приложение магнитного поля 1.8 Тл приводит к увеличению температуры ферромагнитного упорядочения от  $T = 240$  до 248 К (см. рис. 2), при этом аномалия на зависимости  $\rho(T)$  сохраняется. Таким образом, вблизи  $T_C$  приложение магнитного поля приводит к положительному эффекту магнетосопротивления. Справа на рис. 2 приведена температурная зависимость изменения сопротивления в магнитном поле  $\Delta\rho = \rho - \rho_H$ .

Ранее в работе [17] на примере манганитов было показано, что изменение температуропроводности в магнитном поле вблизи  $T_C$  хорошо коррелирует с магнитокалорическим эффектом. Для системы  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  такие корреляционные исследования требуют более детального анализа и дополнительных экспериментальных результатов. В данной работе изучено влияние магнитного поля на температуропроводность. На рис. 3 приведена температурная зависимость температуропроводности  $\eta(T)$  образца  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Co}_{0.7}\text{Mn}_{0.1}\text{Si}_{1.1}$  в магнитных полях до 8 Тл. Как видим, вблизи температуры магнитного фазового перехода наблюдается ярко выраженный минимум, что свидетельствует об интенсивном рассеянии носителей тепла на флуктуациях магнитного параметра порядка, а также, возможно, на искажениях кристаллической решетки. Магнитное поле, подавляя флуктуации, снимает искажения кристаллической решетки, тем самым сглаживает минимум температуропроводности.

Температуропроводность, по сути, представляет собой длину свободного пробега носителей тепла. Если основными носителями тепла являются фононы, то длина свободного пробега и термодиффузия определяются простым соотношением:

$$\eta = \frac{1}{3} l_{\text{ph}} v_{\text{S}}$$

Здесь  $v_{\text{S}}$  – скорость звука,  $l_{\text{ph}}$  – длина свободного пробега фононов. Следовательно, температурная зависимость длины свободного пробега фононов уменьшается с ростом температуры. В данном случае мы наблюдаем более сложное поведение, так как исследуемый образец проявляет металлические свойства. Следовательно, необходимо учесть и вклад электронов в теплоперенос.

На рис. 4 приведены результаты прямых исследований МКЭ в циклическом поле 1.8 Тл с частотой  $f = 0.2$  Гц. Максимальная величина МКЭ в поле 1.8 Тл для  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  равна  $\Delta T = 2.4$  К.

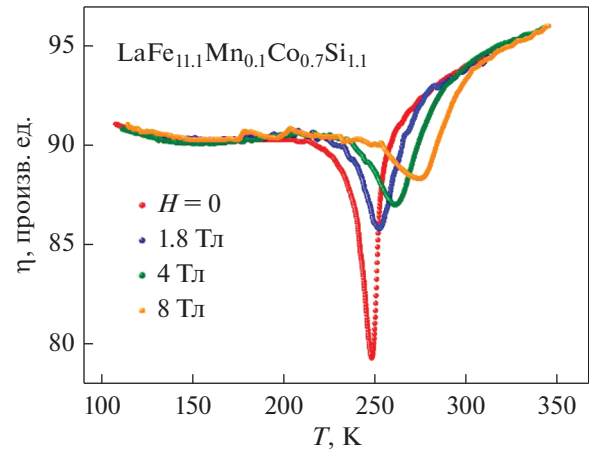


Рис. 3. Температурная зависимость температуропроводности  $\eta(T)$  для  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  в магнитных полях до 8 Т.

Магнитокалорический эффект также характеризуется изменением энтропии ( $\Delta S$ ), которое можно оценить как из данных по теплоемкости:

$$\Delta S_M = - \int_{T_1}^{T_2} \left( \frac{C_p(T, H_0) - C_p(T, H_1)}{T} \right)_{P, H} dT,$$

так и из прямых измерений  $\Delta T_{\text{ad}}$  из соотношения:

$$\Delta S_M = -\Delta T C_p(T, H) / T,$$

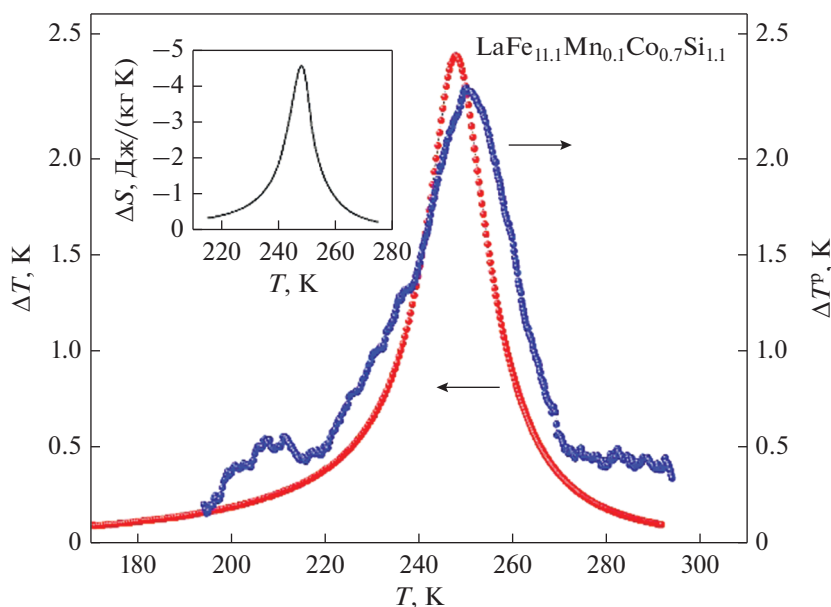
где  $\Delta T$  – экспериментальные данные прямых измерений,  $C_p(T, H)$  – температурная зависимость теплоемкости в магнитном поле (см. рис. 1). Результаты оценки  $\Delta S_M$  приведены на вставке рис. 4, где в поле  $H = 1.8$  Тл имеем  $\Delta S_M = 4.6$  Дж/(кг К).

Как известно, во всех ферромагнетиках парапроцесс достигает максимальной интенсивности в точке Кюри, так как на магнитный порядок носителей магнетизма наиболее сильно оказывают дезорганизующее влияние тепловые флуктуации. Сопутствующими этому парапроцессу явлениями являются магнитокалорический эффект, эффект колоссального магнетосопротивления, магнитострикция и т.д. В результате этого в магнитных материалах наблюдается связь между этими параметрами [18–24].

Взаимосвязь магнитокалорических и магнито-транспортных свойств ряда магнитных материалов многократно обсуждалась в литературе [19–25], где приведены соотношения:

$$\rho(T, H) - \rho(T, 0) = K [S(T, H) - S(T, 0)] \quad [20];$$

$\Delta S_M(T, H) = -\alpha \int_0^H [\partial \ln \rho / \partial T]_H dH$  ( $\alpha \approx 21.7$  эме/г для  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ ) [21],  $\Delta S_M = A(MR_{\text{total}} - MR_{\text{tun}})$  ( $A \approx 15$  Дж/(кг К) для  $\text{La}_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$ ) [22, 23], которые показали, что из данных электросопротив-



**Рис. 4.** Температурная зависимость МКЭ сплава  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  в магнитном поле 1.8 Тл. На вставке приведена зависимость изменения магнитной энтропии в поле 1.8 Тл. Правая шкала соответствует оценке МКЭ из данных по электросопротивлению  $\Delta T = K\Delta\rho$ .

ления с хорошей точностью можно оценить не только величину, но и температурный ход МКЭ. Простую линейную зависимость между изменением магнитной энтропии ( $\Delta S_M$ ) и удельным сопротивлением с независимым от температуры коэффициентом пропорциональности были предсказаны в рамках теоретических моделей: модели  $s$ – $d$ -обмена [25] и модели двойного обмена [26].

Если мы обратим свое внимание на зависимость  $\Delta T(T)$  при  $H = 1.8$  Тл (рис. 4) и на  $\Delta\rho(T)$  (см. рис. 2), то заметим, что температурные зависимости  $\Delta\rho$  и МКЭ имеют практически идентичный характер. Это говорит о том, что существует определенная связь между МКЭ и изменением электросопротивления в магнитном поле для образца  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$ . Как можно заметить, эта связь будет иметь довольно простой вид:  $\Delta T \sim \Delta\rho$  и можем записать  $\Delta T = \alpha\Delta\rho$ , где  $\alpha = -142.66$  К/(Ом см) – коэффициент пропорциональности, не зависящий от температуры и магнитного поля). Коэффициент  $\alpha$  в данном случае выступает как подгоночный параметр, а его значения получены путем подгонки двух зависимостей –  $\Delta T(T)$  и  $\Delta\rho(T)$ . Правая шкала рис. 4 соответствует значениям  $\Delta T_{\Delta\rho}$ , оцененных из данных по электросопротивлению в магнитном поле 1.8 Тл. Как видим, значения  $\Delta T_{\Delta\rho}$  хорошо согласуются с данными прямых измерений МКЭ. Как было сказано выше, прямое пропорциональное соотношение между МКЭ и изменением электросопротивления ранее наблюдали и для ряда других магнитных материалов [18–20].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование магнитокалорических и тепловых свойств образца  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$ . На температурной зависимости  $C_p(T)$  наблюдаются аномалии, связанные с фазовым переходом ФМ–ПМ. Обнаружено, что с увеличением приложенного магнитного поля максимум на зависимости  $C_p(T)$  сильно подавляется и смещается в сторону более высоких температур. Изменение энтропии  $\Delta S_M$  в поле 1.8 Тл составило 4.6 Дж/(кг К).

На температурной зависимости  $\rho(T)$  вблизи  $T_C$  наблюдается аномалия в виде резкого уменьшения электросопротивления с ростом  $T$  в узком температурном диапазоне, а затем восстанавливается его металлический ход. Такое поведение, скорее всего, связано с уменьшением суммарного вклада электрон-фононного и электрон-магнитного рассеяния при переходе в парамагнитную фазу. Магнитное поле 1.8 Тл приводит к увеличению температуры ферромагнитного упорядочения  $T_C$  от 240 до 248 К, при этом аномалия на зависимости  $\rho(T)$  сохраняется. Таким образом, вблизи  $T_C$  приложение магнитного поля приводит к положительному эффекту магнитосопротивления. Зависимость  $\Delta\rho$  от температуры и магнитного поля хорошо коррелирует с данными  $\Delta T(T)$  и связаны простым соотношением  $\Delta T(T) = \alpha\Delta\rho(T)$ .

На зависимости  $\eta(T)$  вблизи  $T_C$  наблюдается ярко выраженный минимум, что свидетельствует об интенсивном рассеянии носителей тепла на флуктуациях магнитного параметра порядка,

а также, возможно, на искажениях кристаллической решетки.

Авторы выражают благодарность за измерения электросопротивления Л.Н. Ханову. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-58-53046 ГФЕН\_а.

Авторы не имеют конфликтов интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tishin A.M., Spichkin Y.I.* The Magnetocaloric Effect and its Applications. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2003.
2. *Gutfleisch O., Liu J.P., Willard M., Brück E., Chen C., Shankar S.G.* Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient // *Advanced Materials*. 2011. V. 23. P. 821–842.
3. *Pecharsky V.K., Gschneidner K.A., Pecharsky A.O., Tishin A.M.* Thermodynamics of the magnetocaloric effect // *Phys. Rev. B*. 2001. V. 64. P. 144406.
4. *Gebara P., Pawlik P., Michalski B., Wyslocki J.J.* Measurements of Magnetocaloric Effect in  $\text{LaFe}_{11.14}\text{Co}_{0.66}\text{Si}_{1.2-x}\text{Al}_x$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.3$ ) Alloys // *Acta Phys. Pol.* 2015. V. 127. P. 576.
5. *Shen B.G., Sun J.R., Hu F.X., Zhang H.W., Cheng Z.H.* Recent Progress in Exploring Magnetocaloric Materials // *Adv. Mater.* 2009. V. 21. P. 4545–564.
6. *Bao-Gen Shen, Hu Feng-Xia, Dong Qiao-Yan, Jirong Sun.* Magnetic properties and magnetocaloric effects in NaZn13-type  $\text{La}(\text{Fe},\text{Al})_{13}$ -based compounds // *Chin. Phys. B*. 2013. V. 22. № 1. P.017502.
7. *Абдулкадирова Н.З., Алиев А.М., Гамзатов А.Г., Gebara P.* Теплоемкость и магнитокалорический эффект  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  ( $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ ) // *ФТТ*. 2020. Т. 62. С.752–755.
8. *Shen J., Li Y.X., Gao B., Shen B.G.* Magnetic properties and magnetic entropy changes of  $\text{LaFe}_{11.0}\text{Co}_{0.8}(\text{Si}_{1-x}\text{Al}_x)_{1.2}$  compounds // *J. Magn. Magn. Mat.* 2007. V. 310. P. 2823–2825.
9. *Gebara P., Marcin J.* Influence of partial substitution of Fe by Mn on the thermomagnetic properties of magnetocaloric  $\text{LaFe}_{11.2}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  alloy // *Acta Physica Polonica A*. 2018. V.133. P. 648–650.
10. *Fujieda S., Fujita A., Fukamichi K.* Large magnetocaloric effect in  $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$  itinerant-electron metamagnetic compounds // *Appl. Phys. Lett.* 2020. V. 8. P. 1276.
11. *Hu Feng-xia, Shen Bao-gen, Sun Ji-rong, Wang Guang-jun, Cheng Zhao-hua.* Very large magnetic entropy change near room temperature in  $\text{LaFe}_{11.2}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  // *Appl. Phys. Lett.* 2020. V. 80. P. 865.
12. *Yan A., Müller K.H., Gutfleisch O.* Magnetocaloric effect in  $\text{LaFe}_{11.8-x}\text{Co}_x\text{Si}_{1.2}$  melt-spun ribbons // *J. Alloys Compd.* 2008. V. 450. P. 18.
13. *Liu X.B., Ryan D.H., Altounian Z.* The order of magnetic phase transition in  $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{11.4}\text{Si}_{1.6}$  compounds. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2004. V. 270. P. 305.
14. *Aliev A.M., Batdalov A.B., Kalitka V.S.* Magnetocaloric properties of manganites in alternating magnetic fields // *JETP Letters*. 2010. V. 90. P. 663–666.
15. *Гамзатов А.Г., Батдалов А.Б., Алиев А.М., Ellouze M., Jemma F.* Теплоемкость и магнитокалорический эффект в манганитах  $\text{Pr}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$  // *ФТТ*. 2017. Т. 59. С. 2066–2070.
16. *Hu Feng-Xia et al.* Magnetoresistances and magnetic entropy changes associated with negative lattice expansions in NaZn13-type compounds  $\text{LaFeCoSi}_{14}$  // *Chinese Physics*. 2005. P. 2329.
17. *Batdalov A.B., Gamzatov A.G., Aliev A.M., Abdulkadirova N., Yen P.D.H., Thanh T.D., Dung N.T., Yu S.-C.* Magnetocaloric properties in the  $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ : Direct and indirect estimations from thermal diffusivity data // *J. Alloys and Compounds*. 2019. V. 782. P. 729–734.
18. *Rawat R., Das I.* The similar dependence of the magnetocaloric effect and magnetoresistance in TmCu and TmAg compounds and its implications // *J. Phys.: Cond. Matter*. 2000. V. 13. P. 379.
19. *Sakamoto N., Kyômen T., Tsubouchi S., Itoh M.* Proportional relation between magnetoresistance and entropy suppression due to magnetic field in metallic ferromagnets // *Phys. Rev. B*. 2004. V. 69. P. 092401.
20. *Campoy J.C.P., Plaza E.J.R., Coelho A.A., Gama S.* Magnetoresistivity as a probe to the field-induced change of magnetic entropy in RAl2 compounds (R = Pr, Nd, Tb, Dy, Ho, Er) // *Phys. Rev. B*. 2006. V. 74. P. 134410.
21. *Xiong C.M., Sun J.R., Chen Y.F., Shen B.G., Du J., Li Y.X.* Relation between magnetic entropy and resistivity in  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$  // *IEEE Trans. Magn.* 2005. V. 41. P. 122–124.
22. *Gamzatov A.G., Batdalov A.B.* The relation between magnetoresistance and magnetocaloric effect in  $\text{La}_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3$  manganite // *Phys. B*. 2011. V. 406. P. 1902–1905.
23. *Gamzatov A.G., Aliev A.M., Yen P.D.H., Khanov L., Hau K.X., Thanh T.D., Dung N.T., Yu S.-C.* Correlation of the magnetocaloric effect and magnetostriction near the first-order phase transition in  $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.1}\text{MnO}_3$  manganite // *J. Appl. Phys.* 2018. V. 124. P. 183902.
24. *Gamzatov A.G., Batdalov A.B., Aliev A.M., Yen P.D.H., Gudina S.V., Neverov V.N., Thanh T.D., Dung N.T., Yu S.-C., Kim D-H., Phan M.H.* Determination of the magnetocaloric effect from thermophysical parameters and their relationships near magnetic phase transition in doped manganites // *J. Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. V. 513. P. 167209.
25. *Kasuya T.* Electrical resistance of ferromagnetic metals // *Prog. Theor. Phys.* 1956. V. 16. P. 58.
26. *Kubo K., Ohata N.* A quantum theory of double exchange // *J. Phys. Soc. Jpn.* 1972. V. 33. P. 21.