

## Раздел V. Электроника и нанотехнологии

УДК 666.655

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-213-219

### М.А. Мараховский, А.А. Панич, В.А. Мараховский ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДОВ ИНТЕНСИВНОГО СПЕКАНИЯ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Исследована возможность вариации свойств пьезоэлектрических керамик разного типа назначения. Цель исследования заключалась в вариации свойств путём изменения технологических факторов при изготовлении пьезокерамики без модифицирования их химического состава. На важнейшем технологическом этапе – спекании – задаются плотность, твёрдость и прочность пьезокерамики, непосредственно влияющие на её электрофизические параметры, т.к. пьезоэффект – это электромеханическое преобразование. Особенный интерес представляют методы спекания объединяющие процесс консолидации частиц с нагревом – горячее прессование и искровое плазменное спекание. Такие методы, за счёт создаваемого одноосного давления, интенсифицируют диффузионные процессы массопереноса при спекании, способствуя получению пьезокерамики повышенной плотности при одновременном понижении температур спекания. Однако, в отличие от горячего прессования, при искровом плазменном спекании между частицами порошка возникают искровые разряды, что в сочетании со сверхбыстрым нагревом (до 1000 °С/мин), формирует мелкозернистую монофазную структуру керамики. Такая микроструктура способствует повышению механических и электрофизических параметров получаемой керамики. Задача исследования состояла в апробации предлагаемых методов спекания на пьезоэлектрических материалах различных составов с целью управления их свойствами. В качестве объектов исследования использовались пьезокерамические материалы на основе системы цирконат-титаната-свинца и их модификации, в том числе многокомпонентные, имеющие высокий прикладной потенциал, а также бессвинцовый сегнетоэлектрический материал  $Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO_3$  (BST). Методом растровой электронной микроскопии установлены зависимости формируемой керамической структуры от метода спекания и от температуры процесса. Установлены закономерности «метод спекания – микроструктура – свойства». В результате исследования подтверждена эффективность методов горячего прессования и искрового плазменного спекания в целях вариации свойств пьезокерамики различного типа назначения, что в совокупности с понижением температур спекания, а также сокращением длительности процесса (в 36 раз!) актуально с точки зрения энергосбережения.

Пьезокерамика; горячее прессование; искровое плазменное спекание; микроструктура; электрофизические параметры.

### М.А. Marakhovskiy, A.A. Panich, V.A. Marakhovskiy THE PROSPECTS FOR INTENSIFICATION OF SINTERING OF PIEZOCERAMIC MATERIALS

The paper investigates the possibility of changing the properties of piezoelectric ceramics for various purposes. The aim of the study is to correct properties by changing technological factors in the manufacture of piezoceramics without modifying their chemical composition. At the most important technological stage – sintering – the density, hardness and strength of piezoceramics are formed, which directly affect its electrophysical parameters, since the piezoelectric effect is an Electromechanical transformation. Of particular interest are sintering methods that combine the process of compaction of particles with heating - hot pressing and spark plasma sintering. Such methods, due to the created uniaxial pressure, activate the diffusion processes of mass transfer during sintering, contributing to the production of high-density piezoceramics while lowering the sintering tem-

peratures. However, unlike hot pressing, spark plasma sintering generates spark discharges between the powder particles, which, in combination with ultra-fast heating (up to 1000 °C/min), forms a fine-grained monophasic structure of ceramics. This microstructure increases the mechanical and electrophysical parameters of the resulting ceramics. The aim of the study was to test the proposed sintering methods on piezoelectric materials of different compositions in order to control their properties. The objects of research were piezoceramic materials based on the zirconate-titanate-lead system and their modifications, including multicomponent materials with high application potential, as well as lead-free ferroelectric material  $Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO_3$  (BST). The dependences of the formed ceramic structure on the sintering method and temperature were determined using scanning electron microscopy. The regularities of "sintering method – microstructure – properties" are established. The effectiveness of hot pressing and spark plasma sintering methods for correcting the properties of piezoceramics of various types of applications has been confirmed, which together with a decrease in sintering temperatures, as well as a reduction in the duration of the process (by 36 times!) relevant for energy saving purposes.

*Piezoelectric ceramics; hot pressing; spark plasma sintering; microstructure; and electrical properties.*

**Введение.** Большой практический интерес к пьезоэлектрической керамике на основе системы цирконат-титаната свинца (ЦТС) обусловлен экстремумами физических свойств системы вблизи морфотропной области – области структурного тетрагонального ромбоэдрического перехода [1–2]. Твёрдые растворы системы ЦТС, расположенные вблизи морфотропной области послужили основой для большинства пьезокерамических материалов разработанных для самых различных применений. Улучшение электромеханических свойств, изменение температуры Кюри, напряженности коэрцитивного поля и других параметров в связи с конкретными применениями проводится за счёт модифицирования химического состава пьезоэлектрической керамики [2–3]. Но еще в начале 70-х годов стало ясно, что возможности модифицирования системы ЦТС практически исчерпаны, и был сделан новый шаг в разработке пьезоматериалов от двухкомпонентной и трёхкомпонентных систем к многокомпонентным системам на основе ЦТС. Также существует множество перовскитовых пьезоэлектрических составов на основе  $BaTiO_3$ ,  $PbTiO_3$ ,  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$  и  $(Na, K)NbO_3$  и других нашедших практическое применение [2, 4]. Но наивысший рейтинг среди пьезоэлектрических керамик, производимых в мире, остаётся за материалами на основе системы ЦТС [5].

Однако изменение электрофизических параметров пьезоэлектрической керамики может быть достигнуто не только созданием новых химических составов, но и путем вариации технологических факторов. Плотность, твёрдость и прочность пьезокерамики формируются когда проводится технологический этап «Спекание». Следовательно, от условий спекания зависят будущие электрофизические параметры пьезокерамики, поскольку, пьезоэффект – электромеханическое явление [2, 6]. Среди множества вариантов особенный интерес представляют методы интенсивного спекания пьезоэлектрической керамики: горячее прессование (ГП) и искровое плазменное спекание (ИПС) [7–11]. Обозначенные методы спекания повышают плотность пьезоэлектрической керамики и снижают температуру её спекания.

**Экспериментальная часть.** Метод ИПС был успешно опробован на сегнетокерамике системы титаната бария-стронция используемой в качестве переключающих и управляющих элементов техники сверхвысокочастотных (СВЧ) диапазонов 0,7–30 GHz взамен полупроводниковых и ферритовых устройств имеющих существенные недостатки. Однако, использование сегнетокерамики состава  $Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO_3$  (BST) в ускорительной технике требует подавления гистерезисных явлений и снижения диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ). В связи с этим в состав сегнетокерамики BST вводятся различные примеси (Mg, Mn, титанат-магния и др.) [12–14]. Спекание проводилось традиционным способом в камерной печи (АТМ), а также методом ИПС, обеспечивающим мелкозернистую монофазную керамическую структуру, оказывающую непосредственное влияние на диэлектрические характеристики сегнетокерамики BST (рис. 1).

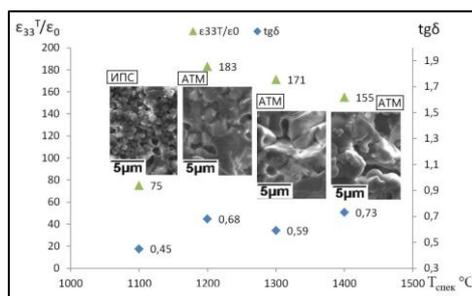


Рис. 1. Диэлектрические характеристики и микроструктура сегнетокерамики BST

Спекание сегнетокерамики BST с добавкой Mg методом ИПС способствовало сокращению диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) на 40%, а диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) на 50 % по сравнению с сегнетокерамикой полученной методом АТМ. Такие изменения положительно влияют на эффективность устройств СВЧ техники [13].

Наряду с общеизвестными пьезоэлектрическими материалами системы ЦТС в последнее время представляют высокий интерес сегнетомягкие пьезоматериалы системы  $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$  (PMN-PT), которые характеризуются высокими значениями электрофизических параметров и находят применение в многослойных конденсаторах с повышенными значениями диэлектрической проницаемости, актуаторах прецизионного перемещения, а также высокочувствительных преобразователях. Однако материалы этой системы имеют проблемы, возникающие в процессе изготовления (появление кристаллической структуры пирохлора при синтезе материала и др.) [15–17]. С целью ликвидации указанных проблем при изготовлении, а также повышения механических и электрофизических характеристик, было проведено спекание методами ГП и ИПС (рис. 2).

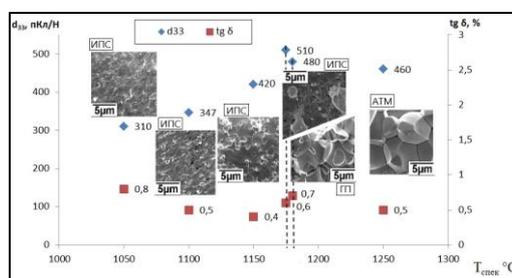


Рис. 2. Основные характеристики и микроструктура пьезоэлектрической керамики PMN-PT

Пьезокерамические образцы системы PMN-PT, полученные методом ИПС, имели повышенные значения электрофизических параметров по сравнению с керамикой того же состава спеченной при атмосферном давлении в обычной камерной печи и керамикой полученной методом ГП. Такое поведение пьезокерамического материала можно объяснить формированием однородной мелкозернистой микроструктуры керамики в процессе спекания, поскольку в методе ИПС сильно подавляется процесс роста зёрен. Метод ГП также обеспечивает повышенные значения пьезоэлектрического модуля  $d_{33}$  по сравнению со спеканием в атмосферном давлении, но ниже, чем при методе ИПС [18].

Преобразователи, работающие в режиме излучения, пьезотрансформаторы и устройства силового ультразвука основываются на сегнетожестких пьезокерамических материалах [19]. В зависимости от условий использования требуются опре-

деленные наборы электрофизических параметров пьезокерамических материалов. Была исследована возможность управления свойствами сегнетожесткой пьезоэлектрической керамики многокомпонентного состава  $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$ - $Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$  за счёт корректировки процесса формирования микроструктуры на этапе спекания. Использован метод ГП и современный перспективный метод ИПС при изготовлении пьезоэлектрической керамики, способствовавшие повышению как механических, так и электрофизических параметров, наряду со снижением температуры процесса на  $200^\circ\text{C}$  (рис. 3).

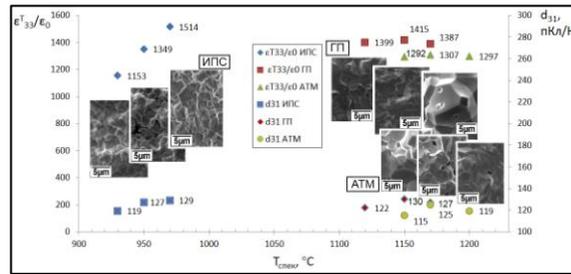


Рис. 3. Основные характеристики и микроструктура пьезоэлектрической керамики  $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$ - $Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$

Сегнетожесткая пьезоэлектрическая керамика полученная методом ГП и ИПС обладала повышенными значениями относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$  на 8 и 16 %, соответственно, пьезоэлектрического модуля  $d_{31}$  на 4 %, относительно значений полученных традиционным спеканием в камерной печи [20].

В последнее время большое внимание уделяется новому поколению пьезокерамических материалов – многокомпонентным системам, характеризующимся повышенными электрофизическими характеристиками и предназначенным для изготовления многослойных актюаторов. С целью повышения технологичности пьезокерамического многокомпонентного материала  $PbTiO_3$  –  $PbZrO_3$  –  $Pb(Ni_{1/2}W_{1/2})O_3$  –  $Pb(Cd_{1/2}W_{1/2})O_3$  –  $Pb(Bi_{2/3}W_{1/3})O_3$  –  $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$  –  $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ , с температурой спекания ниже  $1000^\circ\text{C}$ , были использованы методы ГП и ИПС (рис. 4). Микроструктура пьезоэлектрической керамики полученной методами АТМ, ГП и ИПС подтверждает возможность управления процессом формирования мелкозернистой структуры керамики. Плотная керамическая структура формируется уже при температуре спекания  $850^\circ\text{C}$ .

В результате исследования установлено, что предпочтительным методом спекания пьезокерамики является ИПС. При таком способе температура спекания керамических образцов может быть снижена до  $900^\circ\text{C}$ , с сохранением, а иногда и превышением основных характеристик пьезоэлектрической керамики в сравнении с методом АТМ [21].

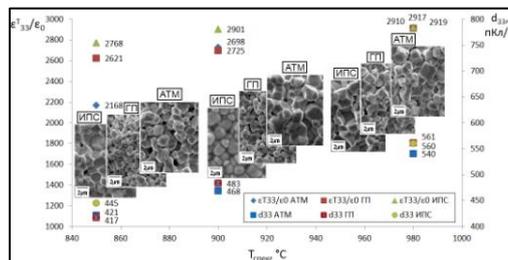


Рис. 4. Основные характеристики и микроструктура пьезоэлектрической многокомпонентной керамики

**Заключение.** Использование методов ГП и ИПС при получении пьезоэлектрической керамики способствует формированию плотной микроструктуры, положительно влияющей на основные электрофизические и диэлектрические характеристики. При этом, температуры спекания снижаются. Большим потенциалом обладает метод ИПС, не только понижающий температуру процесса спекания на 200 °С, но и сокращающий продолжительность изотермической выдержки (в 36 раз!). Это не только положительно сказывается на энергосбережении, но и повышает эффективность пьезоэлектрической керамики различного типа назначения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кутриянов М.Ф., Константинов Г.М., Панич А.Е.* Сегнетоэлектрические морфотропные переходы. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 1991.
2. *Фесенко Е.Г., Данцигер А.Я., Разумовская О.Н.* Новые пьезокерамические материалы. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 1983.
3. *Тололов В.Ю., Панич А.Е.* Электромеханические свойства сегнетопьезокерамик на основе оксидов семейства перовскита // Исследовано в России. – 2008. – Рег. N 002. – С. 8-26.
4. *Keramik/Hrsq. H. Schaumburg. – Stuttgart: B.G. Tenbner, 1994.*
5. *Панич А.А., Мараховский М.А., Мотин Д.В.* Кристаллические и керамические пьезоэлектрики // Инженерный вестник Дона. – 2011. – № 1. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/325> (доступ свободный).
6. *Поплавко Ю.М. [и др.].* Физика активных диэлектриков. – Ростов-на-Дону: Изд. ЮФУ, 2009. – 480 с.
7. *Marder R., Caim R., Estournès C., Chevallier G.* Plasma in spark plasma sintering of ceramic particle compacts // Scripta materialia. – 2014. – Vol. 82. – P. 57-60.
8. *Munir Z.A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M.* The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method // Journal of Materials Science. – 2006. – Vol. 41. – P. 763-777.
9. *Пыина А.М., Александрова Е.В., Григорьев Е.Г., Олевский Е.А.* Influence of the electric current on the spark-plasma sintering processing // Journal of Vector Science. – 2013. – No. 3 (25). – P. 185-187.
10. *Анненков Ю.М., Акарачкин С.А., Иващутенко А.С.* Механизм искрового плазменного спекания керамики // Бутлеровские сообщения. – 2012. – Т. 30 (4). – С. 74-78.
11. *Токита М.* Тенденции в развитии систем искрового плазменного спекания и технологии // Журнал общества специалистов порошковых технологий. – 1993. – № 30 (11). – С. 790-804.
12. *Вендик О.Г., Дедык А.И., Дмитриева Р.В. и др.* Гистерезис диэлектрической проницаемости титаната стронция при 4,2 К // ФТТ. – 1984. – Т. 26. – Вып. 3. – С. 684-689;
13. *Мараховский М.А., Панич А.А., Мараховский В.А.* Исследование характеристик сегнето-керамики титаната бария-стронция, полученной методом искрового плазменного спекания // INTERMATIC-2018. Ч. 2. – М., 2018. – 430 с.
14. *Ненашева Е.А., Канарейкин А.Д., Дедык А.И., Павлова Ю.В.* Электрически управляемые компоненты на основе керамики BST – Mg для применения в ускорительной технике // ФТТ. – 2009. – Т. 51. – Вып. 8. – С. 1468-1472.
15. *Yamada H.* Pressureless sintering of PMN-PT ceramics // Journal of the european ceramic society. – 1999. – Vol. 19 (6-7). – P. 1053-1056.
16. *Lente M.H., Zanin A.L., Assis S.B., Santos I.A., Garcia D., Eiras J.A.* Ferroelectric domain dynamics in PMN-PT ceramics // Ferroelectrics. Gordon and Breach Science Publishers. – 2003. – Vol. 296. – P. 149-155.
17. *Liou Y.C.* Stoichiometric perovskite PMN-PT ceramics produced by reaction-sintering process // Materials science and engineering: B. – 2003. – Vol. 103 (3). – P. 281-284.
18. *Мараховский М.А., Панич А.А.* Получение пьезокерамики системы PMN-PT методом искрового спекания // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 6 (191). – С. 242-249.
19. *Шарапов В.М., Минаев В.Г., Сотула Ж.В., Куницкая Л.Г.* Электроакустические преобразователи. – М.: Техносфера, 2013. – 296 с.
20. *Мараховский М.А., Панич А.Е., Марахоаский В.А.* Влияние технологии спекания на свойства сегнетожесткой керамики системы ЦТС. Технологии и материалы для экстремальных условий. – Агой, 2019. – 343 с.

21. *Мараховский М.А., Мараховский В.А., Мирющенко Э.А., Панич Е.А.* Исследование возможности создания новых полифазных пьезоматериалов для гидроакустических преобразователей. ГА-2018. – СПб., 2018. – 616 с.

## REFERENCES

1. *Kupriyanov M.F., Konstantinov G.M., Panich A.E.* Segnetoelektricheskie morfotropnye perekhody [Ferroelectric morphotropic transitions]. Rostov-on-Don: Izd-vo Rostov. un-ta, 1991.
2. *Fesenko E.G., Dantsiger A.Ya., Razumovskaya O.N.* Novye p'ezokeramicheskie materialy [New piezoceramic materials]. Rostov-on-Don: Izd-vo Rostov. un-ta, 1983.
3. *Topolov V.Yu., Panich A.E.* Elektromekhanicheskie svoystva segnetop'ezokeramik na osnove oksidov semeystva perovskita [Electromechanical properties segnetoelectric on the basis of oxides of the perovskite family], *Issledovano v Rossii* [Studied in Russia], 2008, Reg. N 002, pp. 8-26.
4. *Keramik/Hrsq. H. Schaumburq. Stuttgart: B.G. Tenbner, 1994.*
5. *Panich A.A., Marakhovskiy M.A., Motin D.V.* Kristallicheskie i keramicheskie p'ezoelektriki [Crystal and ceramic piezoelectrics], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2011, No. 1. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/325> (access is free).
6. *Poplavko Yu.M. [i dr.].* Fizika aktivnykh dielektrikov [Physics of active dielectrics]. Rostov-on-Don: Izd. YuFU, 2009, 480 p.
7. *Marder R., Caim R., Estournès C., Chevallier G.* Plasma in spark plasma sintering of ceramic particle compacts, *Scripta materialia*, 2014, Vol. 82, pp. 57-60.
8. *Munir Z.A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M.* The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method, *Journal of Materials Science*, 2006, Vol. 41, pp. 763-777.
9. *Ilyina A.M., Aleksandrova E.V., Grigoryev E.G., Olevsky E.A.* Influence of the electric current on the spark-plasma sintering processing, *Journal of Vector Science*, 2013, No. 3 (25), pp. 185-187.
10. *Annenkov Yu.M., Akarachkin S.A., Ivashutenko A.S.* Mekhanizm iskrovogo plazmennogo spevaniya keramiki [Mechanism of spark plasma sintering of ceramics], *Butlerovskie soobshcheniya* [Butlerovskie messages], 2012, Vol. 30 (4), pp. 74-78.
11. *Tokita M.* Tendentsii v razvitii sistem iskrovogo plazmennogo spevaniya i tekhnologii [Trends in the development of spark plasma sintering systems and technologies], *Zhurnal obshchestva spetsialistov poroshkovykh tekhnologiy* [Journal of the society of powder technology specialists], 1993, No. 30 (11), pp. 790-804.
12. *Vendik O.G., Dedyk A.I., Dmitrieva R.V. i dr.* Gisterezis dielektricheskoy pronitsaemosti titanata strontsiya pri 4,2 K [Hysteresis of the dielectric constant of strontium titanate at 4.2 K], *FTT* [Solid State Physics], 1984, Vol. 26, Issue 3, pp. 684-689;
13. *Marakhovskiy M.A., Panich A.A., Marakhovskiy V.A.* Issledovanie kharakteristik segnetokeramiki titanata bariya-strontsiya, poluchennoy metodom iskrovogo plazmennogo spevaniya [Investigation of the characteristics of barium-strontium titanate ferroceramics obtained by spark plasma sintering], *INTERMATIC-2018. Part 2. Moscow, 2018*, 430 p.
14. *Nenasheva E.A., Kanareykin A.D., Dedyk A.I., Pavlova Yu.V.* Elektricheski upravlyaemye komponenty na osnove keramiki BST – Mg dlya primeneniya v uskoritel'noy tekhnike [Electrically controlled components based on BST – Mg ceramics for use in accelerator technology], *FTT* [Solid State Physics], 2009, Vol. 51, Issue. 8, pp. 1468-1472.
15. *Yamada H.* Pressureless sintering of PMN-PT ceramics, *Journal of the european ceramic society*, 1999, Vol. 19 (6-7), pp. 1053-1056.
16. *Lente M.H., Zanin A.L., Assis S.B., Santos I.A., Garcia D., Eiras J.A.* Ferroelectric domain dynamics in PMN-PT ceramics, *Ferroelectrics. Gordon and Breach Science Publishers*, 2003, Vol. 296, pp. 149-155.
17. *Liou Y.C.* Stoichiometric perovskite PMN-PT ceramics produced by reaction-sintering process, *Materials science and engineering: B*, 2003, Vol. 103 (3), pp. 281-284.
18. *Marakhovskiy M.A., Panich A.A.* Poluchenie p'ezokeramiki PMN-PT metodom iskrovogo spevaniya [Obtaining piezoceramics of PMN-PT system by spark sintering], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 6 (191), pp. 242-249.
19. *Sharapov V.M., Minaev V.G., Sotula Zh.V., Kunitzkaya L.G.* Elektroakusticheskie preobrazovateli [Electroacoustic converters]. Moscow: Tekhnosfera, 2013, 296 p.

20. *Marakhovskiy M.A., Panich, A.E., Marakhoaskiy V.A.* Vliyanie tekhnologii spekaniya na svoystva segnetozhestkoy keramiki sistemy TSTS. Tekhnologii i materialy dlya ekstremal'nykh usloviy [Influence of sintering technology on the properties of Ferroalloy ceramics of the CTS system. Technologies and materials for extreme conditions]. Agoy, 2019, 343 p.
21. *Marakhovskiy M.A., Marakhovskiy V.A., Miryushchenko E.A., Panich E.A.* Issledovanie vozmozhnosti sozdaniya novykh polifaznykh p'ezomaterialov dlya gidroakusticheskikh preobrazovateley. GA-2018 [Investigation of the possibility of creating new polyphase piezomaterials for hydroacoustic transducers. GA-2018]. Saint Petersburg, 2018, 616 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.И. Юрасов.

**Мараховский Михаил Алексеевич** – Научное конструкторско-технологическое бюро «Пьезоприбор» Южного федерального университета; e-mail: marmisha@mail.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10; тел.: +79045015431; к.т.н.; начальник сектора.

**Мараховский Владимир Алексеевич** – e-mail: demuer@mail.ru; тел.: +79508578801; инженер.

**Панич Александр Анатольевич** – Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета; e-mail: rctt.rctt@mail.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10; тел.: +79034888887; д.т.н.; директор.

**Marakhovskiy Mikhail Alekseevich** – Scientific Design and Technological Bureau "Piezopribor" Southern Federal University; e-mail: marmisha@mail.ru; 10, Milchakova street, Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone: +79045015431; cand. of eng. sc.; team leader.

**Marakhovskiy Vladimir Alekseevich** – e-mail: demuer@mail.ru; phone: +79508578801; engineer.

**Panich Alexander Anatolievich** – Institute of high technologies and piezotechnics Southern Federal University; e-mail: rctt.rctt@mail.ru; 10, Milchakova street, Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone: +79034888887; dr. of eng. sc.; director.