

С. Р. Таишев

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ

S. R. Taishev

PIEZOELECTRIC ELEMENTS METALLIZATION RESEARCHES TO IMPROVE THE PARAMETERS STABILITY

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Проводится исследование процесса металлизации пьезоэлементов с целью повышения стабильности их параметров. *Материалы и методы.* Показано, что наиболее технологически отработанными методами для формирования электродов пьезоэлементов являются вжигание серебра и химическое осаждение никеля. *Результаты.* Были проанализированы основные теоретические и практические аспекты указанных методов. Предложены практические рекомендации для проведения процесса металлизации. *Выводы.* Данные процессы металлизации всецело удовлетворяют требованиям, предъявляемым к пьезоэлементам с точки зрения создания прочного токопроводящего слоя на поверхности элемента.

A b s t r a c t. *Background.* The article studies the metallization process of piezoelements in order to increase the stability of their parameters. *Materials and methods.* It is shown that the most technologically proven methods for the formation of electrodes of piezoelectric elements are silver firing and chemical precipitation of nickel. *Results.* The main theoretical and practical aspects of these methods were analyzed. Practical recommendations for the metallization process are proposed. *Conclusions.* These processes metallization fully meet the requirements for piezoelements from the point of view of creating a durable conductive layer on the surface of the element.

К л ю ч е в ы е с л о в а: металлизация пьезоэлементов, вжигание серебра, осаждение никеля, стабильность параметров пьезоэлементов.

К e y w o r d s: piezoelectric elements metallization, silver burning, nickel deposition, piezoelectric elements parameters stability.

Уникальные свойства пьезоэлементов (ПЭ) обуславливают их широкое применение в различных областях промышленности. Многие научно-исследовательские и производственные предприятия, производящие пьезокерамику, ПЭ, проводят научные и технологические работы с целью улучшения параметров и характеристик ПЭ [1–8]. Одним из ключевых направлений развития в данной области является совершенствование технологий и свойств пьезоматериалов и ПЭ с целью обеспечения стабильности параметров устройств на их основе [2–4].

Одними из ключевых элементов, влияющих на стабильность ПЭ, являются металлизированные поверхности ПЭ (электроды), сформированные из материалов, принципиально отличающихся по своим конструктивно-технологическим и физико-химическим свойствам от материала подложки (пьезокерамики) и, как следствие, оказывающих наибольшее влияние на временную корреляцию параметров ПЭ и устройств на их основе. В связи с этим актуальными становятся как теоретические, так и экспериментальные исследования процесса металлизации,

направленные на его оптимизацию и использование различных внешних факторов на рабочие характеристики ПЭ.

В общем случае металлизацией принято называть процесс формирования металлического покрытия на поверхности ПЭ [2].

Металлизация производится с целью:

– создания электропроводящего слоя на поверхности (части поверхности) ПЭ, которая служит электродом и к которому впоследствии припаивают вывод для коммутации с электрической цепью;

– создания прочного, а зачастую вакуумно-плотного соединения между деталями из металла и пьезокерамики путем их пайки, когда происходит образование металлокерамического узла или конструкции;

– формирования металлических компонентов электронной схемы на пьезокерамические основания, подложки и другие изделия.

Соответственно, к электродам предъявляются следующие требования:

– не ухудшать параметры ПЭ;

– иметь достаточную прочность сцепления с поверхностью ПЭ;

– быть долговечными, полностью и с одинаковой толщиной покрывать поверхность ПЭ

и т.д.

Качество электродов зависит как от их материала и способа нанесения, так и от предварительной обработки покрываемых поверхностей (механическая обработка, очистка, активация поверхности и т.д.).

Тип металла и технология нанесения электродов обуславливаются назначением металлизированной поверхности, ее форм-фактором, а также условиями эксплуатации. В настоящее время широкое применение находят такие металлы, как Ag, Au, Pt и другие, а для создания металлокерамических конструкций применяются Mo, W, Mn, Ni [2].

Толщина электродов может составлять значение от долей микрона до 30–50 мкм и зависит в первую очередь от их назначения и, как следствие, технологии нанесения. В настоящее время наиболее часто используемыми материалами для формирования электродов являются серебро и никель [2].

Серебро обладает рядом свойств, обуславливающих его широкое применение: высокая электропроводность, относительно низкая скорость окисления, высокая смачиваемость при наличии флюсов с образованием прочного сцепления с пьезокерамикой, а также относительно низкая стоимость. Широко используемые типы пьезокерамики образуют надежное сцепление с электродами из серебра, прочность которого на разрыв составляет от 10 до 30 МПа.

Технология металлизации с использованием серебра в основном осуществляется методом вжигания серебра в пьезокерамику. Удовлетворяющее большинству требований покрытие формируется методом двух- и трехкратного серебрения с последующим вжиганием. Значительно реже используются методы вакуумной металлизации и нанесения на ПЭ дисперсного серебра с использованием проводящего клея.

Широко используется метод серебрения и вжигания, при котором специальная паста, состоящая из углекислого серебра Ag_2CO_3 от 35 до 40 % и связки (раствор канифоли $(C_{19}H_{29}COOH)$ в скипидаре от 65 до 60 %), наносится на поверхность ПЭ и вжигается, при этом происходит восстановление углекислого серебра до металлического. С целью увеличения длительности процесса высыхания пасты, исключая ее чрезмерное загустевание во время нанесения, в раствор добавляется 5-процентное растительное масло. С целью необходимости получения рельефного рисунка вводят 5 % пластификатора – дибутилфталата, что придает пасте необходимую пластичность. А для повышения смачиваемости поверхности и растекания пасты путем снижения ее поверхностного натяжения в связку добавляют 2 % ацетона. Приготовленная таким образом связка входит в состав пасты в достаточном количестве для получения консистенции масляной краски. Это значение обычно составляет 1/3 от массы составляющих пасты в сухом остатке. Соответственно, перед введением связки сухие компоненты должны быть тщательно перемешаны [3, 4].

Для улучшения сцепления серебра с поверхностью ПЭ в пасту вводятся небольшие добавки оксида висмута Bi_2O_3 и бората свинца $Pb_2B_4O_7$. Одновременно с серебром происходит восстановление оксида висмута до металлического висмута и бората свинца до металличе-

го свинца с образованием оксида бора. Так как температура плавления металлического свинца составляет значение $327,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а оксида бора – $577\text{ }^{\circ}\text{C}$, то в процессе вжигания происходит образование некоторого количества жидкой фазы, способствующей лучшему смачиванию всего микрорельефа поверхности ПЭ.

Кроме углекислого серебра, в качестве серебрясодержащего компонента могут быть использованы металлическое коллоидное серебро и оксид серебра.

Паста наносится вручную кистью на поверхность ПЭ, предварительно очищенную, обезжиренную и активированную, а при использовании массового производства – полуавтоматическим принтером трафаретной печати. Для очистки поверхности ПЭ широкое применение получил ультразвук, а активация поверхности происходит с использованием генераторов холодной плазмы. Значение толщины серебра после вжигания составляет до 5 мкм в случае однослойного нанесения пасты, до 10 мкм в случае двухслойного и до 40 мкм в случае многослойного.

На рис. 1 представлен график температурного режима вжигания серебра в свинцовосодержащую и безсвинцовую пьезокерамику [2].

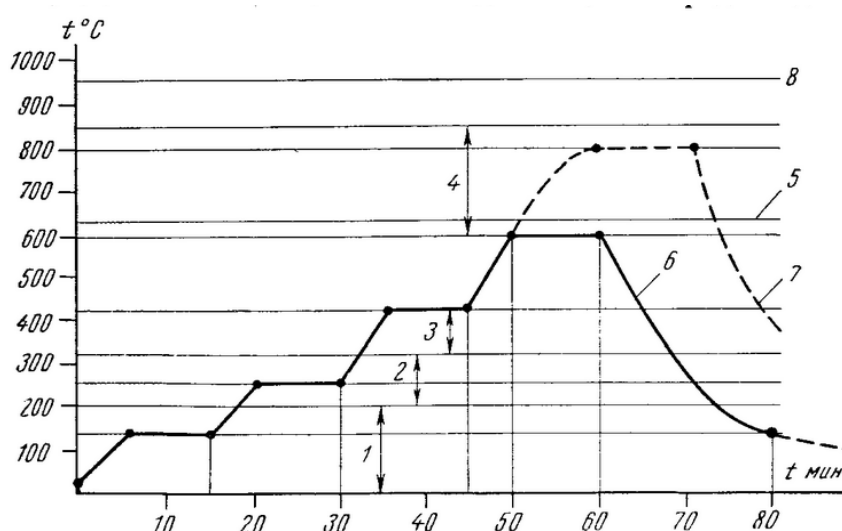


Рис. 1. График температурного режима вжигания серебра в свинцовосодержащую и безсвинцовую пьезокерамику [2]: 1 – зона удаления жидких составляющих пасты ($20\text{--}140\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2 – зона разложения и удаления канифоли ($200\text{--}320\text{ }^{\circ}\text{C}$); 3 – зона пиролиза соединений серебра ($320\text{--}410\text{ }^{\circ}\text{C}$); 4 – интервал вжигания ($600\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$); 5 – нижняя граница вжигания в безсвинцовую пьезокерамику; 6 – график вжигания серебра в безсвинцовую пьезокерамику; 7 – график вжигания серебра в свинцовосодержащую пьезокерамику; 8 – температура плавления серебра ($961\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Важно помнить, что при температуре процесса более $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ за счет сил поверхностного натяжения серебро начинает стягиваться в капли и слой металлизации разрушается.

При пайке выводов к электродам из серебра используют паяльник либо применяют метод печатного монтажа с мягкими припоями при температуре от 200 до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Необходимо учитывать, что время контактирования с расплавленным припоем должно быть минимальным из-за того, что покрытие из серебра может растворяться в большинстве используемых припоев на основе свинца и олова. В некоторых случаях используется метод пайки ультразвуком, когда контакт с поверхностью ПЭ обуславливается явлением кавитации, разрушающим поверхностную пленку с помощью УЗ-колебаний в жидкой среде и вызывающим проникновение припоя в объем пьезокерамики через поры.

Со временем вследствие фотохимического процесса может наблюдаться явление потускнения серебряных электродов. Такое серебро тем не менее по-прежнему проявляет хорошие проводящие свойства. При этом при необходимости потускнение может быть исключено путем химико-механического воздействия непосредственно перед пайкой.

Толщина серебряных электродов обусловлена в основном необходимостью обеспечения прочности сцепления серебра с пьезокерамикой. Несмотря на то, что слой серебра минималь-

ной толщины не обеспечивает максимальной прочности сцепления электродов с ПЭ, их масса оказывает влияние на антирезонансную частоту, имеющую гиперболический характер в зависимости от толщины ПЭ (50–400 мкм). Масса электрода изменяет такие электрические эквивалентные параметры ПЭ, как индуктивность L и емкость C . Следует учесть, что индуктивность в зависимости от массы электрода изменяется более интенсивно, чем емкость. Данное явление вызывает практический интерес, если необходимо произвести подстройку ПЭ на заданную частоту посредством изменения толщины электродов.

Никелирование по сравнению с серебрением имеет ряд технологических преимуществ, таких как:

- процесс металлизации протекает относительно быстро (скорость покрытия от 10 до 12 мкм/ч при температуре от 75 до 78 °С), причем покрытие можно наносить на изделия любой формы, получая при этом равномерный слой никеля;

- использование никеля в качестве электродов положительно сказывается на стабильности и долговечности ПЭ и компонентов на их основе, что обусловлено более низкой подвижностью никеля в пьезокерамических подложках по сравнению с серебром;

- никель в основном наносится методом химического осаждения, протекающим при температурах не выше 100 °С, что является определяющим фактором при изготовлении ПЭ с так называемой поперечной поляризацией, когда направление электрического поля не совпадает с расположением электродов. В этом случае технологически бывает невозможно изготовить ПЭ с заданными параметрами методом высокотемпературного (выше точки Кюри) вжигания, характерного для серебра.

Относительным ограничением химического никелирования является практическая невозможность его использования для ПЭ малой толщины (до 0,2 мм), так как при помещении в кипящие растворы тонких пьезокерамических изделий может произойти их деформация и разрушение.

Кроме того, прочность сцепления электродов с поверхностью ПЭ в случае никелирования зачастую является неудовлетворительной из-за того, что в значительной степени зависит от качества обработки поверхности ПЭ и общего соблюдения технологии, по сравнению с методом вжигания серебра, когда высокая температура процесса частично может компенсировать возможные нарушения технологической дисциплины.

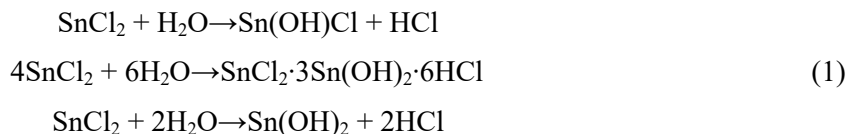
Во время процесса никелирования происходит восстановление никелевых солей на поверхности ПЭ с помощью гипофосфата натрия или калия. Данный процесс происходит значительно быстрее на поверхности ПЭ на основе свинцовосодержащей керамики, если предварительно наносится подслой меди. Для активизации процесса применяется хлорид палладия, который наносится до и после меднения. Температура процесса (меднения и химического никелирования) – от 90 до 95 °С. Толщина слоя никеля при никелировании в течение 40 мин достигает значения порядка 10 мкм. Положительной особенностью химических покрытий из никеля является их высокая равномерность осаждения по всей поверхности ПЭ. Благодаря отсутствию большого количества пор данные покрытия обладают высокой защитной способностью, что имеет особое значение при их эксплуатации с точки зрения повышения стабильности параметров ПЭ. В настоящее время на практике применяют следующие способы химического осаждения никеля из растворов: метод химического восстановления, контактный, контактно-химический.

Но наибольшее применение находит метод химического восстановления, в основе которого лежит реакция взаимодействия ионов металла с растворенным восстановителем. При этом скорость протекания реакций окисления восстановителя и восстановления ионов металла имеют максимальные значения исключительно на металлах, проявляющих свойства автокаталитической реакции. Это означает, что образовавшийся в результате химического восстановления из раствора металл в дальнейшем катализирует реакцию окисления восстановителя. Никель в наибольшей степени обладает вышеуказанным свойством (наряду с кобальтом, железом, медью, серебром, золотом, палладием, родием, рутением, платиной, оловом, свинцом, индием). Если же осаждаемый металл не проявляет свойств автокаталитической реакции, то наблюдается образование металлического порошка из-за восстановления ионов металла, протекающего во всем объеме раствора. Для химического осаждения никеля используют различные восстановители: гипофосфит, гидразин, формальдегид, борогидрид, боразины, гидразин-

боран, а также ионы металлов в низшей степени окисления (Fe^{2+} , Sn^{2+} , Ti^{3+} , Cr^{2+} , Co^{2+}). Выбор восстановителя обуславливается в основном физико-химическими свойствами осаждаемого металла. Например, для получения никелевых и кобальтовых покрытий используется восстановитель гипосфит, так как именно эти металлы в достаточной степени обладают свойствами автокаталитической реакции [3].

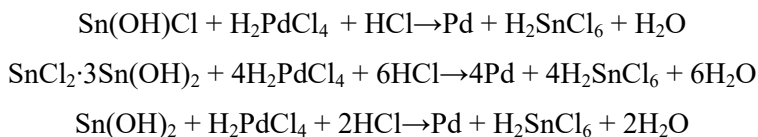
В настоящее время практическое применение нашли методы формирования покрытий с помощью химического восстановления для более чем 20 различных металлов, а также двойных и тройных сплавов: Ni-P, Ni-B, Ni-Co-P, Ni-Mo-B, Ni-Cr-P, Ni-Sn-P, Ni-Cu-B и др. [2].

Как уже было сказано, химическое восстановление металлов является автокаталитической реакцией, т.е. пленка металла, которая образуется в начальный период, катализирует дальнейшую реакцию восстановления этого же металла. Но для начальной стадии восстановления металла необходимо, чтобы покрываемая поверхность проявляла каталитические свойства по отношению к этой реакции. Такими свойствами обладают главным образом металлы *d*-элементов VIII группы и некоторые другие металлы. Cu, W, Ti не являются катализаторами реакции окисления восстановителя. Следовательно, для придания поверхности свойств каталитической реакции ее подвергают специальной обработке – активации. Существуют различные методы активации, заключающиеся в нанесении металла-катализатора на поверхность. Наиболее распространенный на практике способ активации состоит из двух последовательных операций – «сенсibilизирование» и «активирование». Сенсibilизирование (повышение чувствительности) заключается в обработке поверхности раствором солей Sn^{2+} , Fe^{2+} , Ti^{3+} , Ge^{2+} . Самым эффективным способом сенсibilизирования является обработка поверхности в растворе SnCl_2 в соляной кислоте в течение 20–30 с с дальнейшей промывкой в дистиллированной воде. Активирование поверхности проводят в растворе, содержащем 0,5–1,0 г/л хлорида палладия, подкисленном соляной кислотой (pH 2–3), в течение 10–20 с. В итоге в растворе хлорида олова на поверхности диэлектрика образуется слой с повышенной концентрацией данной соли. Во время промывки образца в воде соль олова подвергается гидролизу в соответствии со следующими уравнениями:



На поверхности протекает главным образом реакция в соответствии с уравнением (1), приводящая к образованию основного хлорида олова состава $\text{Sn(OH)}_{1,5}\text{Cl}_{0,5}$. Соединения Sn^{2+} восстанавливают соединения Pd^{2+} до металла на стадии активирования поверхности.

Хлорид палладия в солянокислых растворах находится в виде соединения H_2PdCl_4 , и, следовательно, реакции, протекающие на поверхности при ее активировании, могут быть представлены уравнениями



Для активирования поверхности также находят применение совмещенные растворы, которые одновременно содержат PdCl_2 и SnCl_2 . В результате процесса активации металлический палладий равномерно распределяется по всей поверхности тонким слоем, и в дальнейшем на этот слой уже можно наносить химическое покрытие.

Простейшие растворы для получения химических покрытий состоят из соли металла и восстановителя и являются относительно неустойчивыми; ионы металла восстанавливаются с образованием металлического осадка во всем объеме раствора. В начальный момент времени реакция взаимодействия ионов металла с восстановителем является некаталитической, но по мере образования частиц металла реакция принимает характер каталитической реакции, и скорость ее возрастает с увеличением поверхности осадка.

Окончательная стабилизация раствора достигается введением комплексообразующих веществ (лигандов), которые обеспечивают образование прочных комплексов с ионами метал-

ла, а также веществ, создающих определенное значение pH (щелочи, кислоты, буферизирующие добавки), и стабилизаторов – специальных составов, которые в малых концентрациях (1–100 мг/л) значительно повышают стабильность раствора.

Для примера приведем составы растворов химического никелирования, которые можно использовать для металлизации ПЭ:

– раствор 1. $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 20 г/л, $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – 10 г/л, $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 10–25 г/л, CH_3COOH (98 %) – 6,2–6,5 мл/л, тиомочевина NH_2CSNH_2 – 0,002–0,003 г/л, температура 92 °С;

– раствор 2. $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 45 г/л, $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 45 г/л, NH_4Cl – 50 г/л, цитрат натрия $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 45 г/л, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 20 г/л, NH_4OH (25 %) до pH 8–9, температура 75–92 °С.

Растворы готовятся следующим образом. В дистиллированной воде, подогретой до 50–60 °С, растворяется соль никеля и вводится соль ацетата натрия (в первый раствор) и цитрат натрия с хлоридом аммония (во второй раствор). Затем в первый раствор добавляется уксусная кислота, а во второй раствор – аммиак до устойчивой синей окраски раствора (благодаря реакции комплексообразования ионов Ni^{2+} с аммиаком), что соответствует pH 8–9. Гипофосфит натрия вводится в раствор непосредственно перед никелированием так же, как и стабилизирующая добавка (тиомочевина).

Качество получаемых электродов оценивается следующим образом.

Определяется плотность электродов на ПЭ. Установление плотности (денсиметрия) имеет весьма высокую точность, значение которой может быть оценено в $\pm 0,3$ %.

Плотность электродов $\rho_э$ выражается формулой

$$\rho_э = \frac{h_n}{h - h_n} \left(\rho \frac{h}{h_n} - \rho_n \right),$$

где ρ , ρ_n – плотность соответственно образца с нанесенным электродом и подложки; h , h_n – толщина соответственно образца с нанесенным электродом и подложки.

Пористость электродного слоя определяют по формуле

$$Q = \frac{\rho_m - \rho_э}{\rho_m},$$

где ρ_m – плотность материала электрода.

Для измерения толщины электродов ПЭ используют прибор типа БТП-3. Он предназначен для выборочного контроля толщины металлопокрытия на диэлектрике. В приборе применен радиоактивный источник Sr^{90} активностью 0,5 милликюри. Измерение толщины электродов основано на определении интенсивности рассеянных β -лучей, отраженных от контролируемой поверхности. Интенсивность отраженного потока β -излучения зависит от толщины электродов и разницы атомных номеров материала основания и электродов. Толщину также можно определить количественным химическим анализом содержания металла в растворе, полученном после растворения покрытия азотной кислотой.

Прочность сцепления электродов с ПЭ определяют подпайкой к электроду вывода заданного сечения и испытанием на отрыв на устройстве динамометрического типа [4].

Прочность сцепления электродов с поверхностью ПЭ определяется по формуле

$$\sigma = \frac{P}{S},$$

где σ – временное сопротивление разрыву, Па; P – разрывное усилие, Н; S – площадь поперечного сечения в месте отрыва, м^2 .

При высоком качестве покрытия происходит разрыв вывода, прочность которого подбирается с учетом требуемой прочности сцепления электродов с ПЭ.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно утверждать, что наиболее технологически отработанными методами для формирования электродов ПЭ являются вжигание серебра и химическое осаждение никеля. Были проанализированы основные теоретические и практические аспекты указанных методов. Данные процессы всецело удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ПЭ с точки зрения создания прочного токопроводящего слоя на поверхности элемента.

Библиографический список

1. *Богуш, М. В.* Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации / М. В. Богуш // Пьезоэлектрическое приборостроение. – Ростов на Дону : Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – Т. 3. – 346 с.
2. Пьезокерамическое материаловедение : учеб. пособие / под ред. С. Н. Свирской. – Ростов-на-Дону, 2009. – 82 с.
3. *Ланин, В. А.* Старение пьезокерамики системы ЦТС под действием электрических и механических напряжений : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ланин В. А. – Томск, 2006.
4. *Быстров, С. В.* Нестабильность параметров пьезокерамики и ее влияние на характеристики пьезодвигателей / С. В. Быстров, В. В. Григорьев, О. А. Малофеева // Евразийский союз ученых. – 2016. – № 2-4 (23). – С. 31–34.
5. *Баринов, И. Н.* Высокотемпературные полупроводниковые датчики давления с повышенной временной стабильностью / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – № 8. – С. 51–55.
6. *Баринов, И. Н.* Состояние разработок и тенденции развития высокотемпературных тензорезистивных датчиков давлений на основе карбида кремния / И. Н. Баринов, Б. В. Цыпин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 11. – С. 50–60.
7. *Кикот, В. В.* К вопросу о тенденциях развития пьезодатчиков акустического давления и способах уменьшения их температурной погрешности / В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2. – С. 58–63.
8. *Бастрыгин, К. И.* Высокотемпературный пьезоэлектрический датчик пульсации давления / К. И. Бастрыгин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1. – С. 76–81.

References

1. Bogush M. V. *P'ezoelektricheskoe priborostroenie* [Piezoelectric instrumentation]. Rostov-on-Don: Izd-vo SKNTs VSh, 2006, vol. 3, 346 p. [In Russian]
2. *P'ezokeramicheskoe materialovedenie: ucheb. posobie* [Piezoceramic materials science: studies. benefit]. Ed. by S. N. Svirskaya. Rostov-on-Don, 2009, 82 p. [In Russian]
3. Lanin V. A. *Starenie p'ezokeramiki sistemy TsTS pod deystviem elektricheskikh i mekhanicheskikh napryazheniy: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Aging of piezoelectric ceramics of the PZT system under the action of electric and mechanical stress : abstract. dis. ... cand. tech. sciences]. Tomsk, 2006. [In Russian]
4. Bystrov S. V., Grigor'ev V. V., Malofeeva O. A. *EvrAziyskiy soyuz uchenykh* [Eurasian Union of scientists]. 2016, no. 2-4 (23), pp. 31–34. [In Russian]
5. Barinov I. N., Volkov V. S. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics]. 2011, no. 8, pp. 51–55. [In Russian]
6. Barinov I. N., Tsy-pin B. V. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics]. 2010, no. 11, pp. 50–60. [In Russian]
7. Kikot V. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2016, no. 2, pp. 58–63. [In Russian]
8. Bastrygin K. I. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2016, no. 1, pp. 76–81. [In Russian]

Таишев Султан Равилевич

аспирант,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: sultan.taishev@yandex.ru

Taishev Sultan Ravilevich

postgraduate student,
 Penza State University
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Таишев, С. Р. Исследования процессов металлизации пьезоэлементов для повышения стабильности параметров / С. Р. Таишев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 95–101. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-11.