

В. В. Кикот, И. Н. Чебурахин, Г. А. Кошкин, В. С. Волков, В. Г. Андреев

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ БЕССВИНЦОВОЙ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ

V. V. Kikot, I. N. Cheburakhin, G. A. Koshkin, V. S. Volkov, V. G. Andreev

HIGH-TEMPERATURE PIEZOELECTRIC PRESSURE SENSOR WITH IMPROVED SENSITIVITY BASED ON LEAD-FREE POWER-CERAMICS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Целью исследования является анализ влияния легирующих элементов на пьезоэлектрический модуль и удельное электрическое сопротивление высокотемпературной бессвинцовой керамики системы титаната-ниобата висмута (ТНВ) при изготовлении чувствительных элементов пьезоэлектрических датчиков давления. *Материалы и методы.* Изготовлены макеты пьезоэлементов, легированные хромом, гадолинием и молибденом. Определен характер зависимости электрофизических характеристик ТНВ от содержания легирующих элементов. *Результаты.* Выдвинуты предположения о механизмах влияния легирующих добавок на электрофизические свойства пьезокерамики системы ТНВ. Показано, что введение хрома позволяет увеличить пьезомодуль материала, введение молибдена позволяет повысить высокотемпературное удельное электрическое сопротивление ТНВ, скомпенсировав при этом падение сопротивления, вызванное введением хрома при сохранении повышенного пьезомодуля. *Выводы.* Введение хрома и молибдена позволяет вдвое увеличить коэффициент преобразования пьезоэлектрического датчика за счет увеличения пьезомодуля d_{33} при сохранении рабочей температуры не менее 700 °С.

A b s t r a c t. *Background.* The object of the research is determining of influence of dopants on piezoelectric coefficient and electrical resistivity of high-temperature titanate-niobate bismuth lead-free ceramics for piezoelectric pressure sensors. *Materials and methods.* The prototypes of piezoelectric elements doped with chromium, gadolinium and molybdenum are made. The kind of dependence for electro physical parameters of titanate-niobate bismuth ceramic of dopant content is established. *Results.* The assumption about influence ways of dopants on titanate-niobate bismuth ceramic properties are made. It's shown that chromium implantation allows increasing piezoelectric coefficient and molybdenum implantation leads to material electrical resistivity increasing and allows compensating electrical resistivity degradation caused by implantation of chromium. *Conclusions.* The implantation of chromium and molybdenum allows to double transformation coefficient of piezoelectric sensor by increasing piezoelectric coefficient d_{33} while saving work temperature up to 700 °C.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пьезоэлектрический датчик давления, чувствительный элемент, пьезоэлемент, бессвинцовая пьезокерамика, пьезоэлектрический модуль, удельное электрическое сопротивление, титанат-ниобат висмута.

К е у о р д с: piezoelectric pressure sensor, sensing element, piezoelectric element, lead-less piezoceramic, piezoelectric coefficient, electrical resistivity, titanate-niobate bismuth.

При измерении параметров динамических процессов в энергетических установках с использованием информационно-управляющих систем самое широкое применение находят пьезоэлектрические преобразователи информации. Применение пьезоэлектрических первичных преобразователей в автоматических системах позволяет контролировать акустические и быстропеременные давления, ускорения, усилия, вибрации, удары, объемный и массовый расход, уровень и другие механические величины, напрямую связанные с важнейшими параметрами сложных процессов в широком диапазоне воздействия температур и других дестабилизирующих факторов.

По сравнению с измерительными преобразователями, основанными на других физических принципах, пьезоэлектрические преобразователи имеют относительно простую конструкцию, широкий частотный и динамический диапазоны, малые габариты и вес, высокую надежность и малую инерционность, не требуя при этом подведения энергии извне.

Развитие ряда отраслей промышленности, таких как космическая, авиационная, атомная энергетика, нефтепереработка и др., поставило задачу измерения динамических и импульсных давлений в экстремальных условиях эксплуатации, что привело к созданию специальных классов пьезоэлектрических датчиков вибрации, акустических и быстропеременных давлений [1, 2].

Постоянно возрастают требования к стойкости датчиков давлений в условиях внешних воздействий, в частности, при работе в области высоких температур [3–9]. Измерение параметров двигательных установок требует датчиков быстропеременных давлений и вибраций, работоспособных при температурах 600–700 °С. Известны технические решения пьезоэлектрических датчиков с чувствительными элементами на основе ниобата лития, работоспособные до температуры 700 °С [10]. Сравнительный анализ технических характеристик серийных датчиков пульсаций давления и динамических давлений показывает, что среди них отсутствуют малогабаритные высокоточные пьезоэлектрические датчики, работоспособные при воздействии температур до 700 °С (без принудительного охлаждения) [3, 4, 6].

При этом известные технические решения высокотемпературных пьезоэлектрических датчиков давлений характеризуются низкой чувствительностью, обусловленной в свою очередь низким значением пьезомодуля. Таким образом, актуальной задачей является повышение пьезочувствительности при сохранении работоспособности датчика в области повышенных температур.

Датчики пульсаций давления или датчики быстропеременных давлений предназначены для измерения динамических давлений на фоне медленно меняющихся статических давлений. Конструкция пьезоэлектрического датчика быстропеременных давлений включает первичный измерительный преобразователь, который, в свою очередь, содержит пьезоэлемент, имеющий, как правило, форму диска. Именно материал, из которого изготовлен пьезоэлемент, определяет чувствительность или коэффициент преобразования датчика.

Наибольшее распространение при производстве пьезоэлементов для датчиков динамических давлений получила пьезокерамика системы цирконата-титаната свинца (ЦТС), которая характеризуется высоким значением пьезомодуля d_{33} (порядка 200...300 пКл/Н), но при этом имеет относительно низкую температуру точки Кюри, не превышающую 350 °С. Несмотря на то, что в настоящее время ведутся работы по повышению стабильности электрофизических характеристик путем изменения технологических режимов изготовления и модификации состава ЦТС-пьезоматериалов, применение пьезоэлектрических датчиков для высокотемпературных измерений требует исследования и создания высокотемпературных пьезоматериалов [11, 12].

Краткий список материалов, используемых для производства высокотемпературных пьезоэлементов, приведен в работе [13]. Отмечается, что с ростом температуры точки Кюри T_C , которая в свою очередь определяет максимальную рабочую температуру, происходит значительное снижение пьезочувствительности, характеристикой которой является пьезомодуль d_{33} .

Наибольшим значением температуры точки Кюри обладает керамика на основе титаната-ниобата висмута $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$ (ТНВ). В зависимости от марки материала значение T_C находится в промежутке от 870 до 970 °С. Это означает, что возможно практическое использование материалов этой системы для производства чувствительных элементов с рабочей

температурой порядка 700 °С. При этом указывается, что для материалов системы ТНВ с $T_c = 908 \pm 5$ °С были получены значения d_{33} до 22 пКл/Н (16 после термостабилизации при 700 °С). Полученные результаты согласуются с другими работами в этой области [14], однако неясным является, за счет чего были получены достаточно высокие для высокотемпературного пьезоматериала пьезоэлектрические характеристики. Также важной проблемой керамики системы ТНВ является недостаточное сопротивление при высоких температурах, приводящее к пробое диэлектрика.

Таким образом, повышение электрофизических характеристик (пьезоэлектрического модуля, и электрического сопротивления при высоких температурах) бессвинцовой керамики системы ТНВ посредством введения легирующих элементов, является актуальной научно-технической задачей.

Для решения поставленной задачи для легирования системы ТНВ были использованы хром, молибден и гадолиний, вводимые в исходный материал в виде оксидов Cr_2O_3 и Gd_2O_3 , а также молибденовой кислоты H_2MoO_4 . Основу керамики составили оксиды висмута Bi_2O_3 , титана TiO_2 и ниобия Nb_2O_5 . Все исходные материалы имели средний размер частиц в пределе от 3 до 5 мкм и содержание основного компонента – не менее 99,99 мас. %.

Для получения пьезокерамических элементов применялась стандартная технология, включающая в себя смешение, первичный помол и синтез пьезокерамического порошка, за которыми следовали вторичный помол, введение временного связующего, формование и спекание. Спеченные, отшлифованные и металлизированные образцы были поляризованы.

Базовый химический состав керамики в ходе эксперимента оставался постоянным и соответствовал стехиометрии $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$. При этом введение легирующих элементов производилось сверх стехиометрии перед первичным или вторичным помолом исходных компонентов. Рассмотрение только одного состава, содержащего оксид гадолиния, обусловлено тем, что его введение не обеспечивало значительных преимуществ по сравнению с другими легирующими элементами.

Оптимальная температура спекания сформованных изделий в значительной мере зависела от вводимых легирующих добавок. Введение оксида хрома и молибденовой кислоты перед синтезом не сказывалось на требуемой температуре синтеза и спекания. Введение оксида гадолиния перед синтезом приводило к выкрашиванию на поверхности синтезированных образцов при механической обработке вне зависимости от температуры спекания. Это явление можно объяснить образованием при синтезе легкоплавкой фазы, которая приводила к интенсивному росту зерен ТНВ. Поэтому введение оксида гадолиния осуществлялось перед вторым помолом, а режим спекания был адаптирован таким образом, чтобы предотвратить рост зерна керамики: при предполагаемой температуре максимального роста зерна (800 °С) производилась выдержка в течение 3 ч.

Оптимальная напряженность электрического поля, в котором производилась поляризация керамики, определялась эмпирически в ходе эксперимента по зависимости пьезоэлектрического модуля от напряженности. В процессе поляризации осуществлялся также косвенный качественный контроль высокотемпературного сопротивления пьезокерамики. Для этого производилось измерение времени, в течение которого достигается заданное напряжение на контактах поляризатора. Длительный набор напряжения в данном случае свидетельствует о сравнительно низком сопротивлении образца и большом количестве свободных носителей заряда.

После поляризации проводилось определение основных электрофизических характеристик пьезокерамического материала: пьезомодуля, электрической емкости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Тангенс диэлектрических потерь для образцов всех исследованных составов составлял менее 0,001, что косвенно свидетельствует о сегнетожесткости керамики системы ТНВ вне зависимости от состава легирующих компонентов и согласуется с данными [13].

Влияние легирующих элементов на основные рассматриваемые параметры керамики: пьезоэлектрический модуль d_{33} и время набора заданного напряжения при поляризации t , характеризующего высокотемпературного сопротивление, приведено в табл. 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента.

Характеристика	Концентрация легирующих компонентов, мас. %							
	Cr ₂ O ₃			H ₂ MoO ₄				Gd ₂ O ₃
	0	0,25	0,3	0,4	0,3 + Cr ₂ O ₃	0,1 + Cr ₂ O ₃	0,05 + Cr ₂ O ₃	0,5
d_{33} , пКл/Н	4,58	6,97	9,3	2,35	3,06	8,82	9,82	7,27
ρ , ГОм·м	21	26	29	2150	2130	2100	2070	19
t , с	29	25	25	1,5	1,5	1,5	2	30

Введение оксида хрома приводит к росту как пьезоэлектрического модуля, так и времени набора заданного напряжения при поляризации. При этом увеличение содержания оксида хрома в три раза не приводит к пропорциональному изменению характеристик, из чего можно заключить, что существует некоторая минимальная концентрация оксида хрома в материале, при которой происходит скачкообразное изменение характеристик.

При анализе механизма влияния ионов хрома на пьезомодуль и высокотемпературное сопротивление следует исходить из того, что оксид хрома (III) является химически стабильным и тугоплавким соединением (температура плавления $T_{пл}$ превышает 2300 °С). Из этого следует низкая вероятность возможности его растворения в кристаллической решетке ТНВ с образованием твердых растворов замещения. Если предположить, что определенное количество трехвалентного иона хрома растворимо в ТНВ, то наиболее вероятным будет замещение в кристаллической решетке ионов ниобия Nb^{5+} , обладающих близким ионным радиусом. Это предположение позволяет объяснить дискретный характер зависимости электрофизических характеристик от содержания оксида хрома, однако по аналогии с ЦТС замещение иона с большим зарядом на ион с меньшим зарядом должно приводить к снижению пьезоэлектрического модуля и росту сопротивления [15]. Поэтому определение истинного механизма влияния хрома на электрофизические характеристики пьезокерамики требует дополнительных исследований.

Наибольший интерес в рамках настоящей работы представляют результаты, полученные для материалов, модифицированных молибденовой кислотой. При содержании H₂MoO₄ 0,5 мас. % наблюдается резкое снижение пьезомодуля и рост высокотемпературного сопротивления, выражающийся в ускорении набора требуемого напряжения при поляризации. Снижение содержания молибдена приводит к росту пьезоэлектрических характеристик, но не сказывается на высокотемпературном сопротивлении. Если проводить аналогию с введением хрома и гадолиния, то влияние молибдена на сопротивление имеет дискретный характер, в то время как зависимость пьезомодуля от содержания Мо имеет в первом приближении линейный характер. При той концентрации молибдена, при которой практически не наблюдается его влияние на пьезоэлектрический модуль, все еще имеет место скачкообразный рост сопротивления в сравнении с чистым ТНВ. Механизм резкого роста сопротивления при введении молибдена остается неясным. Снижение пьезоэлектрического модуля с ростом содержания молибдена можно объяснить образованием ограниченных твердых растворов замещения, обладающих повышенной константой анизотропии кристаллической решетки, что приводит к затруднению поляризации поликристаллического материала.

Следовательно, наилучший результат показало совместное легирование ТНВ молибденом и хромом концентрацией 0,05 мас. % H₂MoO₄ и 0,3 мас. % Cr₂O₃ соответственно, что позволяет получить максимальное значение пьезомодуля d_{33} равное 9,82 пКл/Н и практически максимально возможное удельное электрическое сопротивление $\rho = 2070$ ГОм·м.

Модель высокотемпературного пьезоэлектрического датчика с пьезоэлементом на основе ТНВ представлена в виде структурной схемы и приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема пьезодатчика

Если диапазоны измеряемого давления удалены от значения резонансной частоты пьезодатчика, то его схему замещения можно представить в виде, приведенном на рис. 2.

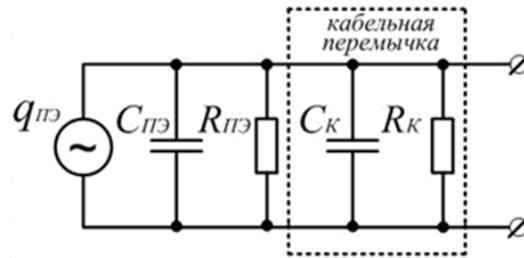


Рис. 2. Схема замещения пьезодатчика

Согласно структурной схеме измеряемое давление ΔP воспринимается мембраной и через силопередающий элемент с силой, пропорциональной измеряемому акустическому давлению, воздействует на рабочий пьезоэлемент пьезодатчика. Вследствие деформации пьезоэлемента на его электродах возникает поверхностный электрический заряд $q_{пэ}$, который через кабельную перемычку поступает на выход пьезодатчика (на вход преобразователя информативных параметров) [1].

Если ΔP изменяется по гармоническому закону с частотой f , значение которой ниже частоты резонанса пьезодатчика, то коэффициент преобразования измеряемого акустического давления в выходной сигнал можно записать в виде [1]

$$K_{\Delta P} = \frac{U}{\Delta F} = \frac{q_{пэ}(\Delta F)R\omega}{\Delta F\sqrt{1+C^2R^2\omega^2}}, \quad (1)$$

где U – значение выходного сигнала пьезодатчика (на входе вторичного преобразователя информативных параметров пьезодатчика); $\Delta F = S_{эфф}\Delta P$ – сила воздействующая на пьезоэлемент;

$S_{эфф} = \pi\left(\frac{r+r_0}{2}\right)^2$ – эффективная площадь мембраны; r – радиус мембраны; r_0 – радиус

силопередающего элемента; $q(T) = d_{33}(T)\frac{L_2}{L_0}F$ – заряд, генерируемый пьезоэлементом; d_{33} –

пьезочувствительность пьезоэлемента; $S_{пэ}$ – площадь электродов пьезоэлемента; S_0 – площадь приложения силы ΔF_A ; $C = C_{пэ} + C_K + C_{вп}$ – электрическая емкость пьезодатчика;

$C_{пэ} = \epsilon_{33}\frac{S_{пэ}}{h_{пэ}}$, C_K , $C_{вп}$ – электрические емкости пьезоэлемента, кабельной перемычки и

входная электрическая емкость вторичного преобразователя соответственно;

$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{пэ}} + \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_{вп}}$ – обратное сопротивление пьезодатчика; $R_{пэ} = \tilde{\rho}\frac{h_{пэ}}{S_{пэ}}$, R_K , $R_{вп}$ – электри-

ческие сопротивления пьезоэлемента, кабельной перемычки и входное электрическое сопротивление вторичного преобразователя информативных параметров соответственно; ϵ_{33} , $\tilde{\rho}_{пэ}$, $h_{пэ}$ – диэлектрическая проницаемость, удельное объемное сопротивление и расстояние между электродами пьезоэлемента; $\omega = 2\pi f$, где f – частота измеряемого давления.

Если во всем диапазоне частот измеряемого давления выполняется соотношение

$$R^2C^2\omega^2 \gg 1, \quad (2)$$

то зависимость выходного напряжения пьезодатчика U от измеряемого акустического давления ΔP имеет вид

$$U = \frac{d_{33}}{C}S_{эфф}\Delta P. \quad (3)$$

На основании выражения (6) с учетом (1) и (2) можно записать коэффициент преобразования пьезодатчика

$$K_{\Delta P} = \frac{U}{\Delta F} = \frac{S_{\text{ПЭ}} d_{33}}{S_0 (C_{\text{ПЭ}} + C_{\text{К}} + C_{\text{ВП}})}. \quad (4)$$

Поскольку при изменении состава ТНВ емкость пьезоэлемента практически не изменяется, изменение коэффициента преобразования $K_{\Delta F}$ будет определяться только изменением пьезомодуля d_{33} . Следовательно, при увеличении пьезомодуля d_{33} с 4,58 пКл/Н без применения легирующих добавок до 9,82 пКл/Н после легирования коэффициент преобразования увеличится не менее чем в два раза при сохранении неизменной электрической емкости пьезоэлемента, при этом удельное электрическое сопротивление пьезоэлемента увеличится в 98 раз, что в итоге приведет к повышению надежности функционирования датчика за счет снижения обратного тока через пьезоэлемент при высоких температурах.

Библиографический список

1. *Богуш, М. В.* Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Пьезоэлектрическое приборостроение / М. В. Богуш. – Ростов-на-Дону : СКНЦ ВШ, 2006. – Т. 3. – 346 с.
2. Датчики. Преобразователи. Системы. Каталог АО «НИИФИ». – Пенза : Пензенская правда, 2011. – С. 70–98.
3. *Мельников, А. А.* Система контроля состояния пьезоэлектрических датчиков давления / А. А. Мельников, Б. В. Цыпин, К. И. Бастрыгин, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 4 (10). – С. 29–34
4. *Бастрыгин, К. И.* К вопросу о коррекции температурной погрешности в пьезоэлектрических датчиках давления / К. И. Бастрыгин, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2 (8). – С. 25–30.
5. *Баринов, И. Н.* Компенсация дополнительной погрешности полупроводниковых датчиков давления, эксплуатирующихся при повышенной температуре / И. Н. Баринов, В. С. Волков, В. В. Кикот, С. К. Сигалаев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2015. – № 10. – С. 34–39.
6. *Кикот, В. В.* Коррекция температурной погрешности пьезоэлектрического датчика динамического давления в условиях термоудара / В. В. Кикот, В. П. Маланин, М. А. Щербаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 105–113.
7. *Чебурахин, И. Н.* Коррекция температурной погрешности, аппроксимация градуировочных характеристик чувствительных элементов датчикопреобразующей аппаратуры с внутридатчиковой электроникой / И. Н. Чебурахин, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 4 (14). – С. 32–41.
8. *Кучумов, Е. В.* Струнный автогенераторный измерительный преобразователь на основе пьезоструктуры / Е. В. Кучумов, И. Н. Баринов, В. С. Волков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2 (8). – С. 58–65.
9. Применение пьезоструктур для создания струнного измерительного преобразователя на основе автоколебательной системы / Е. В. Кучумов, И. Н. Баринов, В. С. Волков, С. А. Гурин, С. П. Евдокимов // Измерительная техника. – 2015. – № 6. – С. 49–52.
10. *Кривцов, В. А.* Высокотемпературные акустические датчики с органосиликатной изоляцией / В. А. Кривцов, Р. Ф. Масагутов. – Ленинград : Наука, 1982. – 167 с.
11. *Кошкин, Г. А.* Исследование влияния германия на стабильность электрофизических свойств сегнетомягкой пьезокерамики / Г. А. Кошкин // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения–2018» (Пенза, 19–21 ноября). – Пенза, 2018. – С. 144–146.
12. *Pak, Ch. G.* Investigation of the influence of shock activation on main properties of piezoelectric ceramics / Ch. G. Pak, A. V. Pryshchak, G. A. Koshkin // Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations : 14th International Symposium (Saint Petersburg, 14–18 may 2018). – Saint-Petersburg, 2018. – P. 162–163.
13. Исследование возможностей повышения пьезоактивности высокотемпературных пьезоэлементов / А. И. Спицин, Д. А. Добрынин, А. М. Храмцов, А. Г. Сегалла, А. А. Буш // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Москва, 2015. – Ч. 3. – С. 27–31.

14. Nanao, M. Piezoelectric Properties of Bi₃TiNbO₉–BaBi₂Nb₂O₉ Ceramics / M. Nanao, M. Hirose, T. Tsukada // Japanese Journal of Applied Physics. – 2001. – Т. 40, № 9S. – С. 5727.
15. Heywang, W. Tailoring of Piezoelectric Ceramics / W. Heywang, H. Thomann // Annual Review of Materials Science. – 1984. – Т. 14, № 1. – С. 27–47.

References

1. Bogush M. V. *P'ezoelektricheskie datchiki dlya ekstremal'nykh usloviy ekspluatatsii. P'ezoelektricheskoe priboroostroenie* [Piezoelectric sensors for extreme operating conditions. Piezoelectric instrument making]. Rostov-on-Don: SKNTs VSh, 2006, vol. 3, 346 p. [In Russian]
2. *Datchiki. Preobrazovateli. Sistemy. Katalog AO «NIIFI»* [Sensors. Converters. Systems. Catalogue of JSC "NIIFI"]. Penza: Penzenskaya pravda, 2011, pp. 70–98. [In Russian]
3. Mel'nikov A. A., Tsypin B. V., Bastrygin K. I., Kikot V. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 4 (10), pp. 29–34 [In Russian]
4. Bastrygin K. I., Kikot V. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 2 (8), pp. 25–30. [In Russian]
5. Barinov I. N., Volkov V. S., Kikot V. V., Sigalaev S. K. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics]. 2015, no. 10, pp. 34–39. [In Russian]
6. Kikot V. V., Malanin V. P., Shcherbakov M. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2016, no. 3 (39), pp. 105–113. [In Russian]
7. Cheburakhin I. N., Nefed'ev D. I. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2015, no. 4 (14), pp. 32–41. [In Russian]
8. Kuchumov E. V., Barinov I. N., Volkov V. S. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 2 (8), pp. 58–65. [In Russian]
9. Kuchumov E. V., Barinov I. N., Volkov V. S., Gurin S. A., Evdokimov S. P. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2015, no. 6, pp. 49–52. [In Russian]
10. Krivtsov V. A., Masagutov R. F. *Vysokotemperaturnye akusticheskie datchiki s organosilikatnoy izolyatsiyey* [High temperature acoustic sensors with organosilicate insulation]. Leningrad: Nauka, 1982, 167 p. [In Russian]
11. Koshkin G. A. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Shlyandinskie chteniya–2018»* (Penza, 19–21 noyabrya) [Methods, means and technologies of obtaining and processing of measuring information : proceedings of international. science.-tech. conf. " Shlyandinskie chteniya–2018" (Penza, November 19-21)]. Penza, 2018, pp. 144–146. [In Russian]
12. Pak Ch. G., Pryshchak A. V., Koshkin G. A. *Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations: 14th International Symposium (Saint Petersburg, 14–18 may 2018)*. Saint-Petersburg, 2018, pp. 162–163.
13. Spitsin A. I., Dobrynin D. A., Khramtsov A. M., Segalla A. G., Bush A. A. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priboroostroeniya: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Fundamental problems of electronic instrument engineering : proceedings of the international. science.-tech. conf.]. Moscow, 2015, part 3, pp. 27–31. [In Russian]
14. Nanao M., Hirose M., Tsukada T. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2001, vol. 40, no. 9S, p. 5727.
15. Heywang W., Thomann H. *Annual Review of Materials Science*. 1984, vol. 14, no. 1, pp. 27–47.

Кикот Виктор Викторович

кандидат технических наук,
начальник центра пьезопроизводства,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: distorsion@rambler.ru

Kikot Viktor Viktorovich

candidate of technical sciences,
head of piezo production center,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Чебурахин Игорь Николаевич

главный технолог,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: distorsion@rambler.ru

Cheburachin Igor Nikolaevich

chief technologist,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Кошкин Глеб Александрович

инженер-технолог,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: distorsion@rambler.ru

Koshkin Gleb Aleksandrovich

processing engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Волков Вадим Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: distorsion@rambler.ru

Volkov Vadim Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor, senior scientist,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Андреев Валерий Георгиевич

доктор технических наук, профессор
E-mail: distorsion@rambler.ru

Andreev Valery Georgievich

doctor of technical sciences, professor

Образец цитирования:

Высокотемпературный пьезоэлектрический датчик давления с повышенной чувствительностью на основе бесвинцовой пьезокерамики / В. В. Кикот, И. Н. Чебурахин, Г. А. Кошкин, В. С. Волков, В. Г. Андреев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 56–63. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-7.