

УДК 535.551, 620.171.5, 53.087.4

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗООПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИИ

А. Г. Паулиш<sup>1</sup>, П. С. Загубисало<sup>1</sup>, В. Н. Бараков<sup>2</sup>, М. А. Павлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1

<sup>2</sup>ООО «Фирма ПОДИЙ»,  
107084, Москва, ул. Мясницкая, 47  
E-mail: paulish63@ngs.ru

Исследованы характеристики пьезооптического преобразователя новой конструкции, обладающего при малых габаритах высокой чувствительностью к деформации. Благодаря оригинальной форме фотоупругого элемента удалось при заданной внешней силе существенно увеличить напряжение в его рабочей области, тем самым повысив чувствительность преобразователя. С помощью специально созданного устройства измерены основные характеристики преобразователя. Созданная его математическая модель позволила рассчитать величину деформации при заданной приложенной силе. В итоге чувствительность к относительной деформации составила  $\Delta x/x = 3 \cdot 10^{-10}$ , динамический диапазон более четырёх порядков, а коэффициент тензочувствительности на три порядка выше, чем для тензорезисторных датчиков деформации.

*Ключевые слова:* измерение деформации, датчики деформации, пьезооптический преобразователь, метод фотоупругости, оптические методы исследования напряжённых состояний.

DOI: 10.15372/AUT20180209

**Введение.** Пьезооптический эффект (или эффект фотоупругости) заключается в изменении коэффициента преломления прозрачной среды под действием внешней силы. Приложенная сила приводит к анизотропному изменению коэффициента преломления (двулучепреломлению) изначально изотропной среды благодаря деформации электронных оболочек атомов. В результате свет, распространяющийся в плоскости, перпендикулярной вектору силы, имеет разные скорости для поляризаций вдоль и поперёк вектора силы [1]. Разница величин коэффициентов преломления света для двух ортогональных поляризаций пропорциональна разнице напряжений в двух ортогональных осях:

$$\Delta n = n_o - n_e = K(\sigma_x - \sigma_y) = K\Delta\sigma. \quad (1)$$

Здесь  $n_o$  и  $n_e$  — коэффициенты преломления «обычного» и «необычного» лучей;  $K$  — пьезооптический коэффициент с типичным значением  $10^{-11}$ – $10^{-12}$  м<sup>2</sup>/Н для большинства оптических материалов;  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  — напряжения вдоль и поперёк приложенной силы в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света [1]. Данная разница коэффициентов преломления приводит к разнице фаз двух ортогональных поляризаций световой волны, прошедшей напряжённый материал:

$$\Delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n = \frac{2\pi d}{\lambda} K\Delta\sigma = \frac{2\pi d}{\lambda} KE \frac{\Delta x}{x}, \quad (2)$$

где  $d$  — расстояние, пройденное лучом в напряжённом материале;  $\lambda$  — длина волны света;  $E$  — модуль Юнга материала;  $\Delta x/x$  — относительная деформация материала [2].

Пьезооптические преобразователи (ПП), используемые для измерения деформаций (напряжений), обладают наибольшей чувствительностью по сравнению с другими, например с тензорезисторными преобразователями [3]. Это связано с фундаментальной высокой чувствительностью поляризации света к изменению состояния вещества, в котором распространяется свет. Схема исследуемого ПП приведена на рис. 1 [2]. Изначально неполяризованный световой поток  $\Phi$  от светодиода после прохождения поляризатора и четвертьволновой пластины приобретает круговую поляризацию и проходит сквозь фотоупругий элемент (ФЭ). Далее, после прохождения двух анализаторов, оптические оси которых перпендикулярны друг другу, световые потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  попадают на фотоприёмники. При приложении нагрузки к ФЭ вдоль одной из его осей появляются дополнительные напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  в центральной части ФЭ. В результате возникает дополнительная разность фаз  $\Delta$  (обусловленная двулучепреломлением (1) и (2)) между взаимно перпендикулярными компонентами поляризации луча, прошедшего сквозь ФЭ. Изменение фазы поляризации приводит к изменению интенсивности световых потоков ( $\Phi_1, \Phi_2$ ), падающих на фотоприёмники, и соответственно электрических сигналов ( $I_1, I_2$ ) на выходе фотоприёмников, что, в свою очередь, вызывает изменение выходного сигнала преобразователя  $\sim (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2) \sim \Delta$ , величина которого пропорциональна величине  $\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_y$  (2), т. е. величине измеряемого напряжения (деформации) [2]. Несмотря на то что пьезооптический преобразователь известен давно, в научной литературе отсутствуют данные о промышленном применении датчиков такого типа и об экспериментально определённом коэффициенте тензочувствительности, что затрудняет оценку его преимуществ перед датчиками, основанными на других физических принципах, которые широко используются в промышленности.

В работе [4] была оптимизирована форма ФЭ, которая позволила повысить чувствительность ПП за счёт увеличения механических напряжений в рабочей области ФЭ при заданной внешней силе  $F$ . Крестообразная форма ФЭ дала возможность разместить узлы крепления элементов преобразователя в промежутках между боковыми поверхностями ФЭ,

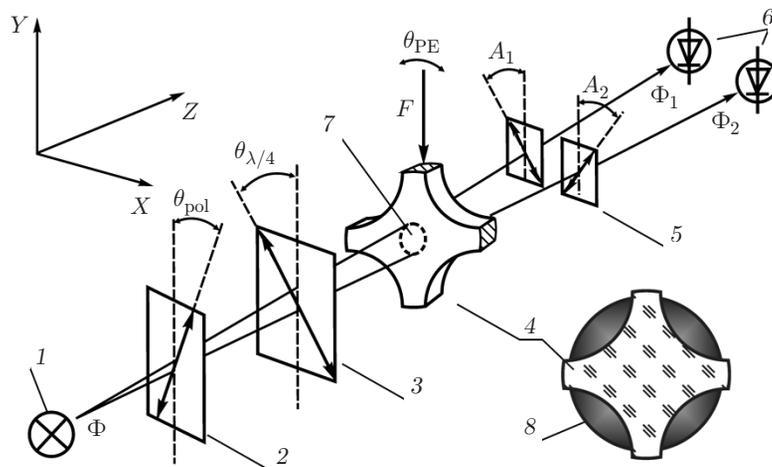


Рис. 1. Схема пьезооптического преобразователя: 1 — источник света; 2 — поляризатор; 3 — четвертьволновая пластина; 4 — фотоупругий элемент, к которому прикладывается измеряемая внешняя сила  $F$ ; 5 — анализаторы; 6 — фотоприёмники;  $\theta_{pol}$ ,  $\theta_{\lambda/4}$ ,  $\theta_{PE}$  — углы поляризатора, четвертьволновой пластины, фотоупругого элемента относительно оси  $Y$ ;  $A_1 = -45^\circ$ ,  $A_2 = +45^\circ$  — углы анализаторов относительно оси  $Y$ ; 7 — рабочая область фотоупругого элемента; 8 — несущие элементы конструкции преобразователя для крепления оптических элементов;  $\Phi$  — исходный световой поток;  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  — световые потоки, падающие на фотодетекторы

не выходя за габариты внешнего диаметра ФЭ [4, 5]. Таким образом, поперечный размер преобразователя не превышает диаметр ФЭ, что позволило разместить ПП в собственном унифицированном корпусе, который может быть использован с нагрузочными элементами разных конструкций в зависимости от способа монтажа на контролируемом объекте [5, 6].

Задачей данной работы является экспериментальное определение параметров нового пьезооптического преобразователя с указанным фотоупругим элементом, таких как чувствительность к абсолютной и относительной деформациям, величина динамического диапазона и коэффициент тензочувствительности для создания высокочувствительных датчиков деформации.

**Моделирование пьезооптического преобразователя.** Расчёты величины деформации ФЭ под действием внешней силы проводились методом конечных элементов с помощью пакета COMSOL Multiphysics<sup>TM</sup>, при этом учитывались конструкции ФЭ, нагрузочных элементов и объекта контроля, используемых для измерения деформации.

**Схема эксперимента.** Для экспериментального определения чувствительности преобразователя к приложенной силе применялось специально разработанное устройство (далее ромб), показанное на рис. 2, *a*. Ромб с закреплённым преобразователем (рис. 2, *b*) с одной стороны (снизу) жёстко фиксировался, а к другой (верхней) стороне вдоль основной оси симметрии ромба прикладывалась калиброванная сила  $F_a$ , которая создавалась с помощью рычажного механизма с калиброванными грузами. Рычажной механизм имел коэффициент передачи силы 1:8. Калиброванный вес равен 0,1 кгс. Таким образом, вес, прилагаемый к ромбу по вертикали, составлял 0,8 кгс (7,848 Н). Конструкция ромба обеспечивала приложение силы к ФЭ в направлении перпендикулярно оптической оси ПП с помощью выступов (см. рис. 2, *b*). На рис. 2, *c* показана схема сил, возникающих в системе ромба с закреплённым преобразователем, при приложении калиброванной силы  $F_a$ . В вершинах ромб имеет шарниры без трения. Решая статическую задачу, находим соотношение

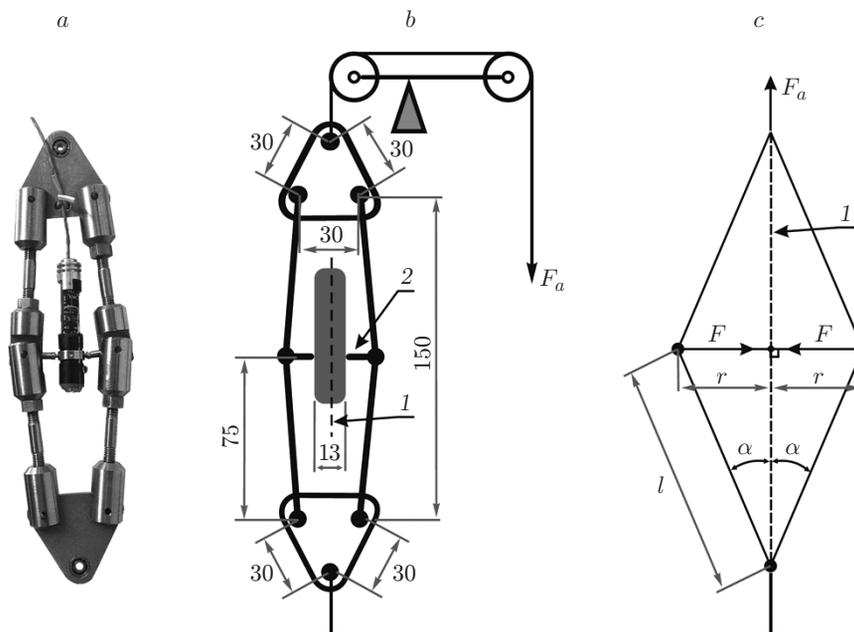


Рис. 2. Устройство для определения чувствительности преобразователя к силе: *a* — ромб с закреплённым преобразователем для приложения калиброванной силы к фотоупругому элементу; *b* — схема ромба с размерами в миллиметрах (1 — оптическая ось преобразователя, 2 — выступы ромба для приложения силы  $F_a$  к фотоупругому элементу преобразователя); *c* — схема приложения силы  $F_a$  к ромбу

между силой  $F$ , приложенной к ФЭ, и калиброванной силой  $F_a$ , приложенной к ромбу:

$$F = F_a \operatorname{tg} \alpha = \frac{r F_a}{\sqrt{l^2 - r^2}},$$

где  $\alpha$  — угол между плечом ромба и его вертикальной осью;  $r$  — радиус ФЭ с охранним кольцом 6,5 мм;  $l$  — длина плеча ромба 75 мм (см. рис. 2, *b*). Таким образом, при приложении одного калиброванного груза весом 0,1 кгс ( $F_a = 7,848$  Н) на ФЭ действует сила  $F = 0,68$  Н.

Для питания преобразователя и измерения выходного сигнала использовалась схема токовой петли. Диапазон выходного сигнала варьировался от 4 до 20 мА. Измерения проводились с помощью мультиметра Agilent 34461A.

**Экспериментальные результаты.** На рис. 3 показана типичная зависимость выходного сигнала преобразователя ( $I_{\text{ВЫХ}}$ ) от времени при изменении нагрузки на ФЭ. Сначала прикладывалась предварительная нагрузка, чтобы выбрать люфты. Затем ромб был последовательно нагружен четырьмя одинаковыми калиброванными весами, каждый из которых даёт силу  $F = 0,68$  Н. Величина сигнала, соответствующая силе  $F = 0,68$  Н, усреднённая по четырём приложениям нагрузки, равнялась примерно 300 мкА. В результате коэффициент преобразования составил  $t = 441$  мкА/Н.

Чтобы определить минимальное регистрируемое значение силы, было использовано значение случайного шума выходного сигнала в течение первых 20 с до нагрузки. Отклонение  $I_{\text{ВЫХ}}$  от среднего значения  $I_{\text{ср}}$  показано на вставке на рис. 3. На этом интервале величина стандартного отклонения выходного сигнала составила  $\sigma = 0,128$  мкА, что является общепринятой оценкой точности. Таким образом, точность измерения силы (она же — минимально регистрируемая величина силы)

$$F_{\min} = 0,128 \text{ мкА} \cdot 0,68 \text{ Н} / 300 \text{ мкА} \approx 0,29 \text{ мН.} \quad (3)$$

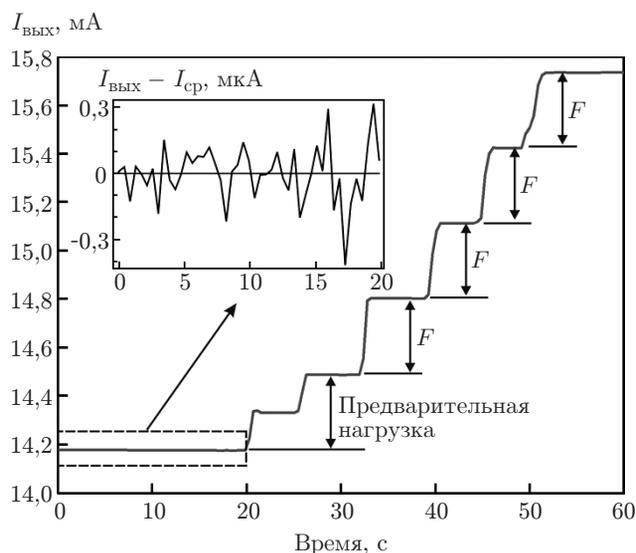


Рис. 3. Временная зависимость выходного сигнала преобразователя  $I_{\text{ВЫХ}}$  при последовательном приложении силы с помощью одинаковых калиброванных весов. На вставке показана зависимость сигнала  $I_{\text{ВЫХ}} - I_{\text{ср}}$  в первые 20 с до приложения весов. Данная зависимость использовалась для оценки шума и минимальной детектируемой силы

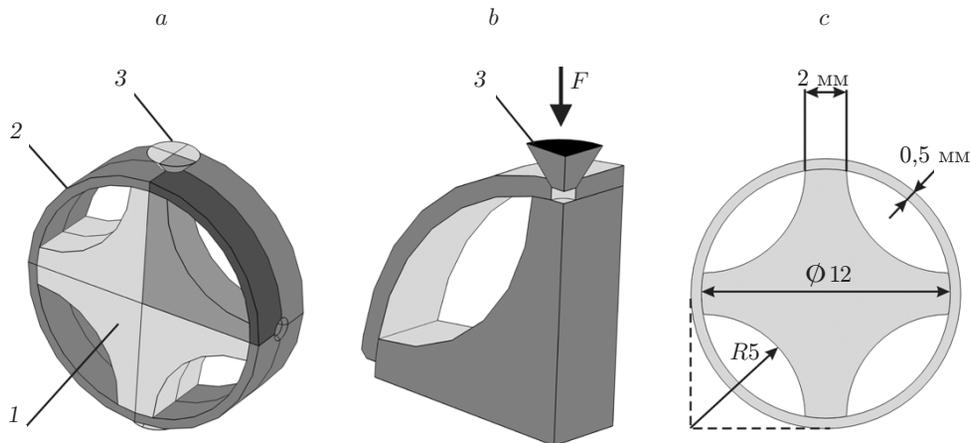


Рис. 4. 3D-модель фотоупругого элемента в охранном кольце, к которому прикладывалась сила  $F$  посредством конусов: *a* — вид модели ФЭ; *b* — 1/8 часть модели, стрелкой показано направление прилагаемой к конусам силы; *c* — геометрические размеры модели

**Расчёт деформации.** Для расчёта величины абсолютной деформации ФЭ под действием силы  $F_{\min}$  (3) была использована математическая модель, которая включала 3D-модель ФЭ из плавленного кварца (1 на рис. 4, *a*), заключённого в охранное кольцо из инвара 2. Охранное кольцо защищает ФЭ от скалывания. К модели прикладывалась внешняя сила  $F_{\min}$  посредством стальных клиньев (3 на рис. 4, *a, b*) в форме усечённого конуса. Данная схема приложения силы максимально близка к реальному устройству преобразователя и ромба. Расчёт производился только для 1/8 части модели в связи с симметричностью задачи. На рис. 4, *c* приведены геометрические параметры 3D-модели. Толщина ФЭ и охранного кольца составляла 4 мм. Соответственно толщина 1/8 части модели равнялась 2 мм. В модели использовались граничные условия, определяемые условиями эксперимента, описанного выше. Расчёт деформации ФЭ вдоль оси приложения силы производился численным моделированием методом конечных элементов с помощью пакета COMSOL Multiphysics, в который были встроены параметры материалов.

В результате моделирования деформация ФЭ, соответствующая  $F_{\min}$ , составила  $\Delta x_{\min} = 0,0035 \text{ нм} = 3,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ . Это и есть минимально регистрируемая преобразователем величина абсолютной деформации ФЭ. По результатам моделирования в пакете COMSOL Multiphysics коэффициент линейной зависимости приложенной силы  $F$  от деформации  $\Delta x$  (коэффициент жёсткости в законе Гука  $F = k\Delta x$ ) составил  $k = F/\Delta x = 0,083 \text{ Н/нм}$ . Тогда чувствительность преобразователя к деформации  $tk = (441,2 \text{ мкА/Н}) \cdot (0,083 \text{ Н/нм}) = 36,6 \text{ мкА/нм}$ .

Минимально регистрируемая относительная деформация  $\Delta x_{\min}/x = 3,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}/13 \times 10^{-3} \text{ м} \approx 2,7 \cdot 10^{-10}$ , где  $x = 13 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  — диаметр ФЭ с охранным кольцом. Полученная величина существенно превышает величины для известных датчиков деформации.

Если считать рабочий диапазон выходного сигнала равным  $12 \pm 5 \text{ мА}$  (диапазон токовой петли), то динамический диапазон выходного сигнала составит  $5 \text{ мА}/0,128 \text{ мкА} = 3,9 \cdot 10^4$ .

Правой границе диапазона соответствуют сила 11,3 Н и деформация  $1,37 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ . Полученная величина динамического диапазона также существенно (на 1–2 порядка) превышает величины известных датчиков деформации.

**Определение тензочувствительности.** Универсальным параметром датчиков деформации независимо от конструкции и принципа действия является коэффициент тензочувствительности, который находится согласно выражению  $\Delta U/U = C(\Delta x/x)$ , где

Параметр	Значение
Коэффициент тензочувствительности (эксперимент)	7340
Минимальная регистрируемая абсолютная деформация (равная шуму)	$3,5 \cdot 10^{-12}$ м
Минимальная регистрируемая относительная деформация (равная шуму)	$2,7 \cdot 10^{-10}$
Минимальная регистрируемая сила (равная шуму)	$0,29 \cdot 10^{-3}$ Н
Крутизна преобразования (чувствительность)	441 мкА/Н (36,6 мкА/нм)
Динамический диапазон	$3,9 \cdot 10^4$
Диапазон измеряемой силы	$0,29 \cdot 10^{-3}$ –11,3 Н
Диапазон измеряемой деформации	$3,5 \cdot 10^{-12}$ – $1,37 \cdot 10^{-7}$ м

$\Delta U/U$  — относительный выходной сигнал датчика,  $C$  — коэффициент тензочувствительности. Для тензорезисторных датчиков  $C$  определяется свойствами материала и лежит в диапазоне 2–6 [7].

В фотоупругом эффекте исходным сигналом является изменение фазы поляризации световой волны  $\Delta$ , прошедшей сквозь напряжённый материал (2), которое в схеме регистрации ПП приводит к изменению светового потока  $\Delta\Phi/\Phi \sim \Delta$ , прошедшего через напряжённый ФЭ и падающего на фотодетекторы. Это ведёт к пропорциональному изменению фототоков с фотодетекторов ( $I_1, I_2$ ) и выходного сигнала преобразователя  $\sim (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2) \sim \Delta$  [2]. Прямое измерение токов  $I_1, I_2$  дало величину  $C = 7340$ , что согласуется с оценками в работе [3] и на три порядка превышает коэффициенты тензочувствительности для тензорезисторных датчиков 2–6 [7]. Экспериментальные и расчётные параметры ПП приведены в таблице.

Полученная высокая чувствительность предложенного пьезооптического преобразователя обусловлена, во-первых, высокой чувствительностью к деформации пьезооптического эффекта по сравнению с тензорезистивным, во-вторых, возможностью сконцентрировать напряжения при фиксированной деформации (силе) в небольшом объёме ФЭ. Для пьезооптического эффекта важны величины напряжений в рабочем объёме ФЭ, а для тензорезистивного эффекта важна общая геометрическая деформация металлической полоски. Конструкции предложенных ФЭ и ПП позволяют сконцентрировать напряжение в небольшом рабочем объёме ФЭ благодаря тому, что плавный кварц, из которого изготовлен ФЭ, не имеет пластической деформации, а порог разрушения при сжатии очень высок. Максимальные деформации для тензорезисторных датчиков ограничены пластической деформацией структуры, представляющей собой полимерную плёнку с нанесённым слоем металла. Оба материала, особенно полимер, обладают весьма низким порогом пластической деформации, что приводит к эффекту гистерезиса и деградации параметров датчика со временем [7]. Данный пьезооптический преобразователь не содержит деградирующих материалов, таких как полимерные и тонкие металлические плёнки. Плавный кварц не имеет пластической деформации, а порог разрушения при сжатии на 2–3 порядка превышает номинальные нагрузки преобразователя, что обеспечивает его высокую устойчивость к перегрузкам по сравнению с тензорезисторными датчиками. Поэтому данный датчик не должен обладать такими эффектами, как гистерезис и деградация параметров со временем.

**Заключение.** Таким образом, экспериментально полученный коэффициент тензочувствительности пьезооптического преобразователя в предлагаемой работе более чем на три порядка превосходит известные в литературе величины для датчиков деформации. Результаты показывают хорошие перспективы пьезооптических преобразователей для высокоточных измерений напряжений и деформаций.

Авторы выражают благодарность генеральному директору ООО «Фирма ПОДИЙ» А. В. Пояркову за поддержку данной работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Nye J. F.** Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices. Oxford: Oxford University Press, 1985. P. 235–258.
2. **Fedorinin V. N., Paulish A. G., Levina A. S.** Optoelectronics in Measurement of Physical Magnitudes. N. Y.: Nova Science, 2011. 66 p.
3. **Слезингер И. И.** Пьезооптические измерительные преобразователи // Измерительная техника. 1985. № 11. С. 45–48.
4. **Paulish A. G., Zagubisalo P. S.** A photoelastic element for piezooptic strain gauges // Techn. Phys. Lett. 2015. 41, N 7. P. 632–634.
5. **Пат. 2552128 РФ.** Фотоупругий элемент /В. Н. Бараков, О. П. Маслов, А. Г. Паулиш, А. В. Поярков. Оpubл. 10.06.2015, Бюл. № 16.
6. **Пат. 2564691 РФ.** Тензометрический преобразователь /В. Н. Бараков, О. П. Маслов, А. Г. Паулиш, А. В. Поярков. Оpubл. 10.10.2015, Бюл. № 28.
7. **Handbook** on Experimental Mechanics /Ed. A. S. Kobayashi. Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall, 1987. 1002 p.

*Поступила в редакцию 22 августа 2017 г.*

---