

## Раздел IV. Стандартизация и управление качеством продукции

УДК 53.083

Ю.Г. Свинолупов, А.А. Машкин, Н.А. Брагин

### КОНСТРУКТИВНЫЕ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЯ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

*Приводятся результаты исследований по разработке конструкции и метрологических характеристик измерителя глубины погружения подводного аппарата. Особенности поставленной задачи по разработке измерителя глубины погружения аппарата заключаются, фактически, в предельных показателях точности (среднее значение погрешности не более 0,06 %) во всём диапазоне измерений (до 10000 метров) и в предельно минимальных весогабаритных параметрах. Немаловажным фактором является также и то, что главным условием разработки является применение отечественного сенсора давления. Выбор сенсора КНС типа объясняется наличием отечественных производителей данного типа приборов, высокими исходными метрологическими характеристиками, а также наличием у разработчиков эталонной и экспериментальной базы, прежде всего калибраторов давления класса 0,02 %, для проведения исследований и выпуска. Исследование и формирование конструкции проводится на основе моделирования напряжений и деформаций в корпусе датчика, оптимизации геометрических и весогабаритных параметров. В качестве критерия допустимых деформаций конструкции под действием объёмного сжатия корпуса принято значение перемещений в области сочленяемых деталей конструкции не более 0,1 мкм. Дальнейшее уменьшение габаритов предусматривает отказ от кабельной связи датчика с бортом, в этом случае нет необходимости в применении герметизированных контактов высокого давления, важных элементов при кабельной передаче. Формирование метрологических характеристик производится на основе разработанного подхода к созданию модели измерительного процесса, и прежде всего измерительного преобразователя давления на основе КНС сенсора, в виде полинома третьей степени, и дальнейшего ранжирования моделей по значению погрешности. Коэффициенты полинома определяются на основе решения регрессионной задачи на этапе калибровки измерителя глубины, (датчика). В качестве методов оценки суммарной погрешности измерения применены традиционные методы современной теории погрешности, оценки систематической и случайной составляющих. Высокая точность разработанного метода коррекции погрешности измерения подтверждена на малых значениях глубины погружения. Приведены результаты исследований временного дрейфа датчика глубины, позволяющего его длительное применение без проведения операций автоматической коррекции временного дрейфа. Для исключения влияния на точность измерения атмосферного давления и плотности морской воды предусмотрено получение данных об этих факторах по цифровому каналу передачи данных.*

*Конструкция; метрология, погрешность; датчик; глубина; калибровка; полином, давление.*

Yu.G. Svinolupov, A.A. Mashkin, N.A. Bragin

### CONSTRUCTIVE AND METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF MEASURING THE DEPTH OF IMMERSION UNDERWATER VEHICLE

*he results of research on the design and metrological characteristics of measuring the depth of immersion underwater vehicle. Especially the tasks for the development of measuring the depth of immersion of the administration are, in fact, in the limiting measures of accuracy (average error of not more than 0.06%) over the entire range of measurements( up to 10000метров ) and in a very minimum overall weight and dimensions parameters. Another important factor is the fact that the main condition of development is the use of the pressure sensor. The choice of sensor type CND due to the presence of domestic manufacturers of this type of devices, high initial metrological characteristics, as well as the presence of the developers reference and experimental base, primarily pressure calibrator class 0.02 %, for research and production. Research and development design is based on the modeling of stress and deformation in the sensor housing, optimizing geometrical and mass parameters. As a criterion of admissible deformations of the structure under the action of volumetric compression of the housing value movements in the field of connector parts construction is not more than 0.1 μm. Further reduction in size provides for the waiver cable connection of the sensor with the Board, in this case it is not necessary to use high-pressure hermetically sealed contacts, important elements in the transmission cable. The formation of metrological characteristics is performed on the basis of the developed approach to the creation of a model of the measurement process, and the first pressure transmitter on the basis of the SPS sensor in the form of a third-order polynomial, and further ranking of the models according to the value of the error. The coefficients of the polynomial are determined on the basis of the solution of the regression problem in the calibration of depth gauge,(gauge). As methods of assessing total measurement error applied traditional methods of the modern theory of errors, estimation of systematic and random components. High accuracy of the developed method of correction of error of measurement was confirmed for small values of depth. The results of studies on the temporal drift of the sensor depth, allowing its prolonged use without carrying out operations of automatic correction of temporary drift. To eliminate the influence on the measurement accuracy of the atmospheric pressure and the density of sea water is provided to obtain data on these factors via a digital data channel.*

*Design; metrology; accuracy; sensor; depth; calibration; polynomial; pressure.*

**Введение.** Для определения глубины погружения глубоководного подводного аппарата используется общепринятая формула гидростатического давления:

$$h = \frac{P}{\rho g}, \quad (1)$$

где  $h$  – глубина погружения,  $P$  – гидростатическое давление,  $\rho$  – плотность морской воды,  $g$  – ускорение свободного падения.

С учетом влияния атмосферного давления и плотности морской воды формула (1) приводится к виду (2).

$$h = \frac{P + \Delta P_a}{f_\rho g} \times (1 + \vec{v}) \quad (2)$$

где  $\Delta P_a$  – изменение атмосферного давления;  $f_\rho$  – функция плотности;  $\vec{v}$  – вектор, учитывающий погрешность от других дополнительных факторов, к примеру, волнений на водной поверхности, временной нестабильности сенсора, температурных изменений среды.

Из формулы (2) видно, что изменение плотности морской воды  $f_\rho$  изменения атмосферного давления  $\Delta P_a$ , напрямую вносят погрешность в измерение глубины погружения и должны быть учтены для обеспечения погрешности измерения глубины на уровне 0,06–0,08 %. Оговоренные факторы имеют значительное влияние на глубинах до 2000 метров, на больших же глубинах главной задачей стано-

вится точное измерение гидростатического давления. Погрешность от нелинейности характеристики преобразования сенсора давления обычно решают использованием аппроксимации характеристики на основе данных, полученных в результате эксперимента [1]. Дополнительную температурную погрешность уменьшают введением температурных коэффициентов в результаты вычисления давления, которые также получают на основе эксперимента. Во многом и конструктивные характеристики, и метрологические измерителя глубины определяются типом сенсора давления. В нашем случае измерение давления и, далее, глубины погружения достигается получением точной модели измерительного процесса, экспериментальным определением коэффициентов (калибровкой) полинома, представляющего модель сенсора, [2]. Надёжности конструкции измерителя, находящегося вне корпуса аппарата достигается моделированием нагрузки в виде объёмного давления среды на большой глубине.

**Типы сенсоров давления. Емкостный сенсор** [3, 4], в его современном варианте, представляет собой конденсатор, образованный диэлектрической оболочкой сенсора, помещенной внутри прочного металлического корпуса, диаметром 30-40 мм., измерительными электродами, выполняющими функцию обкладок конденсатора, и упругой металлической, или керамической, мембраной. Пространство между мембраной и электродами заполнено силиконовым маслом, служащим для передачи давления на мембрану и одновременно для увеличения емкости конденсатора. При подаче разности давлений на сенсор мембрана деформируется и емкости конденсаторов изменяются.

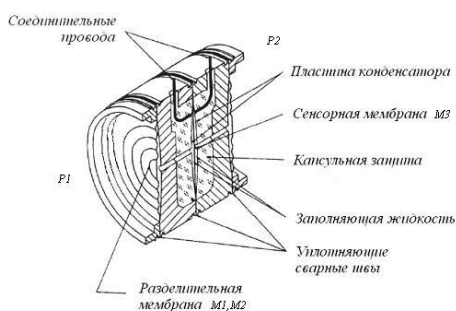


Рис. 1. Емкостной сенсор фирмы Эмерсон (США)

Примерами прецизионного сенсора давления такого типа является емкостной сенсор фирмы Эмерсон (США), приведённый на рис. 1.

В настоящее время серийное производство в России сенсоров подобного типа отсутствует. На рис. 2 приведена модель отечественного миниатюрного емкостного сенсора на кремниевых профилированных мембранах. Размер такого сенсора может быть 5х5х3 мм.

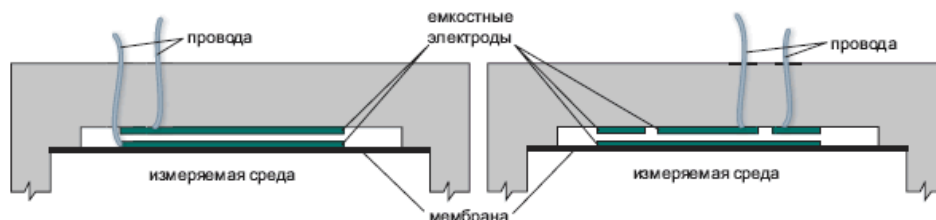
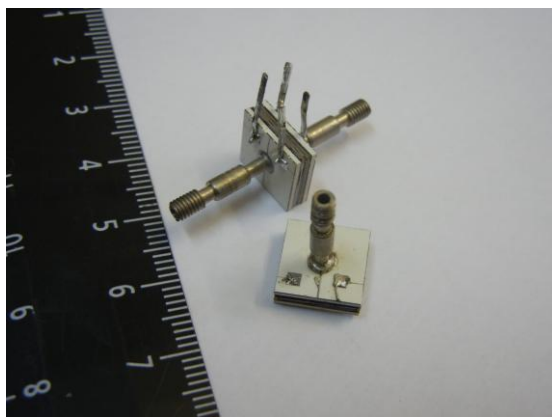


Рис. 2. Емкостной сенсор абсолютного давления

Достоинства: высокая чувствительность, малый вес и габариты, простота конструкции. В ходе исследований нами предложено новое техническое решение емкостного датчика глубины погружения на основе керамических композитов и пластин кремния. Изготовлены и исследуются макетные образцы сенсоров [5].



*Рис. 3. Внешний вид разработанных макетных образцов малогабаритных емкостных сенсоров.*

**Пьезорезонансный сенсор** [6] представляет собой кварцевый резонатор, конструкция которого состоит из измерительного металлического резонатора, размещенного на мембране, и помещенного в прямоугольный кварцевый корпус. Частота колебаний изменяется с изменением воздействующего на мембрану давления. Резонатор предназначен для работы в составе прецизионных электронных преобразователей, манометров и контроллеров давления с частотным выходом в качестве преобразователя текущих значений давления в частоту с погрешностью до 0,03%, в том числе и для исследований в океане.

Достоинства: малые габариты, возможность измерения быстропеременных нагрузок, надежность и простота конструкции, высокая стабильность. Ведущим производителем подобных сенсоров давления является СКТБ «ЭЛПА» города Углича [7].

В последнее время производство пьезорезонансных сенсоров освоено в ОАО «РАДАР ММС» г. Петербурга [8].

Ограничениями на сегодняшний день является не достаточный диапазон измерений – до 25 мПа, сложность конструкции глубоководного сенсора.

**Тензометрический сенсор КНС типа** [9]. Принцип действия основан на изменении сопротивления при деформации кремниевых тензорезисторов, нанесенных через слой диэлектрика (сапфир) на упругий металлический элемент, который деформируется под действием давления. Тензометрические КНС сенсоры наиболее глубоко изучены и получили широкое применение в практике отечественных измерений давлений и за рубежом, [10–14.]

Достоинства: отсутствие гистерезиса, безинерционность, стабильность, простота конструкции. На рис.4 приведён внешний вид преобразователя давления типа «Д», на основе КНС сенсора, со стандартной присоединительной резьбой М12х1.5.

Серийное производство КНС сенсоров и датчиков давления налажено в России на НПО «Автоматика» г. Екатеринбурга, ЗАО «ВИП», ЗАО «МИДИУС» г. Ульяновск. Нами произведена разработка прецизионного измерителя глубины погружения на основе серийно производимого КНС сенсора типа «Д» ЗАО «ВИП» [12].



Рис. 4. Тензорезистивный КНС сенсор давления

При исследовании прочностных характеристик корпуса датчика и выборе внешней и внутренней структуры использовалось моделирование перемещений и деформаций элементов конструкции с использованием программного пакета SolidWorks Simulation [15]. Нагружение конструкции производилось внешним давлением 150 Мпа, что соответствует глубине погружения 15000 метров. Отсутствием в базе данных материала OT4 (предел текучести  $\delta = 600$ ), применяемого в качестве материала конструкции, был выбран аналогичный материал – технически чистый титан CP-Ti UNS R50700 Сор 4 (предел текучести  $\delta = 550$ ). На рис. 5 представлены результаты моделирования: а) конструкции датчика с изображением воздействия внешнего давления, б) чертёж корпуса, на котором отсутствует деформация и перемещения; в), г) линейное перемещение штуцерной части на расстояние 1,5 мкм, и деформации размера корпуса на 1.0 мкм. Для получения положительного эффекта на рис. 5,б достаточно было применить конусообразное завершение штуцерной части датчика.

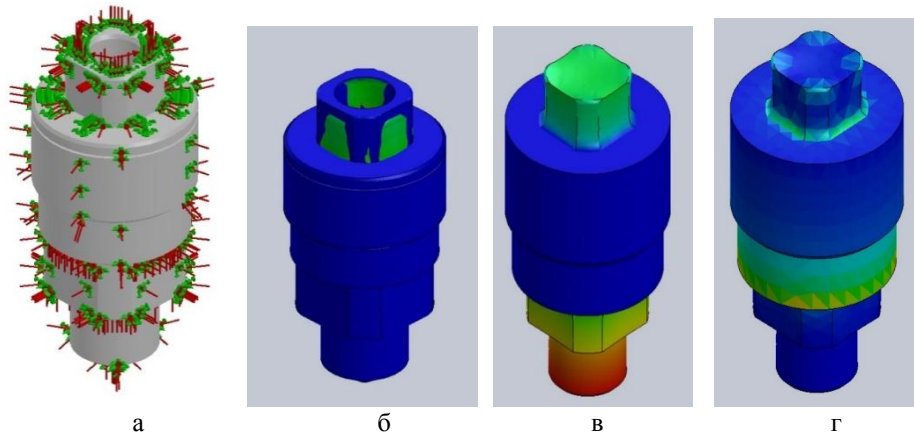


Рис. 5. Результаты моделирования: а – конструкции датчика с изображением воздействия внешнего давления; б – чертёж корпуса, на котором отсутствует деформация и перемещения; в, г – линейное перемещение штуцерной части на расстояние 1,5 мкм, и деформации размера корпуса на 1.0 мкм

На рис. 6 показан разрез датчика в сборе-компоновка, на рис. 7 приведён чертёж датчика с габаритными размерами и обозначением всех элементов конструкции. Пути уменьшения габаритных размеров и, как следствие, веса датчика очевидны. На рис. 8 показан чертёж малогабаритного датчика с экспериментальным КНС сенсором, в котором отсутствует резьбовая часть. Изменение коммуникаци-

онной части датчика также может дать существенное уменьшение веса и габарита. Применение беспроводного принципа передачи данных от датчика на борт аппарата позволит исключить из конструкции такую важную и проблемную деталь, как герметизированный контактный переход высокого давления (гермопроходник). Учитывая, что эта часть конструкции прошла глубоководные испытания, принято решение применить её без изменений. Масса датчика по рис. 5 равна 180 грамм.

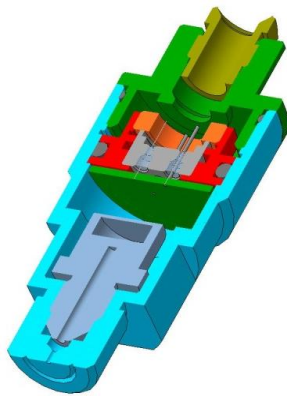


Рис. 6. Компоновка датчика

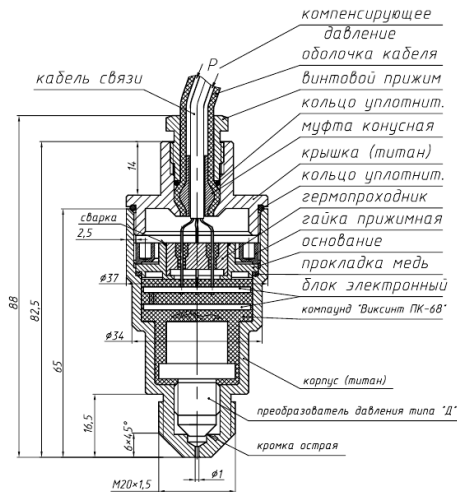


Рис. 7. Чертёж датчика

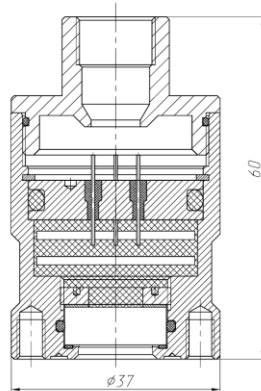


Рис. 8. Чертёж малогабаритного датчика

**Алгоритмический метода коррекции погрешностей преобразователя (сенсора) давления. Математическая модель измерения давления.** Задачей определения значения контролируемого давления  $P$  по выходному напряжению сенсора  $U_d$ , являющегося функцией давления и температуры,  $U_d = f(P, T)$ , является определение давления  $P$  по обратной функции, описывающей зависимость выходных напряжений  $U_d$  (напряжение в измерительной диагонали тензомоста) и  $U_m$  (напряжение в питающей диагонали тензомоста) от давления  $P$  и температуры  $T$ . Напряжения  $U_d$ ,  $U_m$  – являются функциями величин  $P$  и  $T$ , действующих на сенсор. Рассматриваемый сенсор упрощенно можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} Ud = f_1(P, T); \\ Um = f_2(P, T). \end{cases} \quad (3)$$

Преобразуя систему уравнений, заметим, что параметр  $P$  является функцией только выходных величин  $Ud, Um$ :

$$P = \Psi(Ud, Um), \quad (4)$$

Зависимость вида (4) – обратная передаточная функция тензопреобразователя, в цифровом преобразователе давления входными данными измерительно-вычислительного преобразователя являются именно напряжения  $Ud$  и  $Um$ , на основании которых необходимо вычислить действующее значение давления  $P$  – т.е. (4) является математическим выражением (математической моделью), результатом решения которой является значение измеряемого давления. При заранее известной функции метод обратной функции теоретически не дает погрешности. Для выбора вида многофакторной математической модели на практике используются два метода: метод последовательной графо-аналитической аппроксимации частных (базисных) функций отклика от отдельных факторов с последующей композицией их в общую многофакторную модель и противоположный ему метод эвристического назначения какой-либо формальной модели. Выбор одного из этих методов, прежде всего, обусловлен наличием априорных сведений о возможном виде искомой математической модели, а также степенью разброса исходных экспериментальных данных. Сделанный сравнительный анализ некоторых классов однофакторных аппроксимирующих функций: алгебраических полиномов, дробно-рациональных функций и функций, являющихся решением обыкновенного дифференциального уравнения, выявил, что оптимальными для решения этой задачи по всем выбранным нами критериям оценки являются аппроксимирующие функции в виде алгебраических полиномов 3-го порядка, либо дробно-рациональных функций 1-го порядка. Методами регрессионного анализа были получены коэффициенты ряда математических моделей, описывающих экспериментальные данные. Для правильной оценки моделей описывающих преобразователь с разными пределами измерения, значения установленного давления в исходных данных при расчете коэффициентов моделей были представлены в процентах от диапазона измерений, что дало дополнительное удобство при оценке качества моделей – погрешности описания в этом случае также представлены в процентах. Все модели (исследовано более 250 моделей) были ранжированы по сумме квадратов  $RSS$ , характеризующей неадекватность моделей. Рангу 1 соответствует модель с минимальным значением остаточной суммы квадратов  $RSS$ . Для определения математической модели, наилучшим образом описывающей экспериментальные данные, в табл. 1 представлена часть результатов ранжирования математических моделей, описывающих экспериментальные данные исследованных преобразователей. Усредненный ранг каждой модели рассчитывался как среднее арифметическое по совокупности рангов этой модели, полученных при оценке моделей, описывающих экспериментальные данные по исследованным преобразователям.

В результате определена «наилучшая», в смысле установленного критерия, модель вида:

$$P = a_0 + a_1 \cdot Ud + a_2 \cdot Um + a_3 \cdot Ud^2 + a_4 \cdot Um^2 + a_5 \cdot Ud \cdot Um + a_6 \cdot Ud^3 + a_7 \cdot Um^3 + a_8 \cdot Ud \cdot Um^2 + a_9 \cdot Ud^2 \cdot Um. \quad (5)$$

Калибровка датчика производилась по следующей методике: датчик помещался в температурную камеру и выдерживался на каждой фиксированной температуре:  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $23\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $50\text{ }^\circ\text{C}$  в течении трех часов до завершения температурных переходных процессов; на каждой указанной температуре на датчик подавалось эталонное давление с шагом  $10\text{ МПа}$  от  $0$  до  $100\text{ МПа}$ . В каждой точке фиксировались значения напряжения в сигнальной диагонали  $Ud$  и питающей диагонали  $Um$  тензомоста преобразователя. Полученные данные использовались для решения регрессионной задачи по вычислению коэффициентов полинома вида (5):

Таблица 1

## Определение усредненного ранга моделей

Модель	Ранг модели										Ранг ср.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
$a_0+a_1 \cdot Ud+a_2 \cdot Um+a_3 \cdot Ud^2+a_4 \cdot Um^2+a_5 \cdot Ud \cdot Um+a_6 \cdot Ud^3+a_7 \cdot Um^3+a_8 \cdot Ud \cdot Um^2+a_9 \cdot Ud^2 \cdot Um$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$a_0+a_1 \cdot Ud+a_2 \cdot Um+a_3 \cdot Ud^2+a_4 \cdot Um^2+a_5 \cdot Ud \cdot Um$	2	2	2	2	6	2	2	2	2	2	2
$a_0+a_1 \cdot Ud+a_2 \cdot Ud^2+a_3 \cdot Ud^3+a_4 \cdot Ud^4+a_5 \cdot Ud^5+a_6 \cdot Um+a_7 \cdot Um^2+a_8 \cdot Um^3+a_9 \cdot Um^4+k \cdot Um^5$	3	3	3	3	2	8	3	3	3	3	3

**Экспериментальная проверка.** Применение тщательной калибровки и использование модели цифровой коррекции позволило расширить диапазон точных измерений. В табл. 2 представлены данные, полученные на сенсоре с верхним пределом измерений 100 МПа, что соответствует глубине в 10 000 метров. Контрольная проверка осуществлялась по следующей методике [2]: прибор выдерживался при нормальной температуре 23 °С, после чего подавалось эталонное давление, показания в каждой точке снимались не менее 20 раз и фиксировалось среднее значение. Проверки проводились 10 раз в течении 48 часов, после чего все результаты также усреднялись. В табл. 2 приведены результаты метрологических исследований датчика.

Таблица 2

## Результаты метрологические исследования датчика

Эталонное давление Мпа	Показания прибора Мпа	Абсолютная погрешность Мпа	Относительная погрешность %
0	0,0016	0,0016	∞
3	3,0008	0,0008	0,0284
5	5,0034	0,0034	0,0699
7,5	7,5040	0,0040	0,0533
10	10,0065	0,0065	0,0654
12,5	12,5109	0,0109	0,0877
15	15,0105	0,0105	0,0701
17,5	17,5082	0,0082	0,0473
20	20,0082	0,0082	0,0412
30	30,0165	0,0165	0,0551
40	40,0118	0,0118	0,0295
50	50,0125	0,0125	0,0251
60	60,0134	0,0134	0,0224
70	70,0106	0,0106	0,0152
80	80,0104	0,0104	0,0131
90	90,0058	0,0058	0,0064
100	100,0074	0,0074	0,0074
Максимальное значение		0,0165	0,0877

**При установлении метрологических параметров датчика** использовались рекомендации, изложенные в [16–20]. Установление случайной погрешности заключалось в обработке многократных результатов измерения давления в одних и



тех же контрольных точках. При определении систематической составляющей погрешности сравнивались результаты измерений со значениями давления рабочего эталона-Калибратора фирмы Wika CPB5000HP, с диапазоном создаваемого давления 0–4000 bar, классом точности 0,02. В качестве контрольных точек измерения давления были выбраны значения давления  $P$ , приведенные в табл. 2, сгущение контрольных точек в начальной части диапазона измерения обусловлено дополнительным контролем метрологических характеристик в диапазоне глубины от 0 до 2000 м. Значение относительной погрешности показаний датчика, выраженной в процентах, определяется из выражения:

$$\gamma_{O_i} = \frac{100}{P_{зад}} \cdot [P_{изм_i} - P_{зад_i}], \quad (2)$$

За значение систематической погрешности принято среднее арифметическое значение относительной погрешности измерения по совокупности проверок датчиков во всех контрольных точках:

$$Q_s = \frac{\sum_i^n \gamma_{O_i}}{n}, \quad Q_s = 0,0398. \quad (3)$$

Среднеквадратическая оценка случайной погрешности определена как:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\gamma_i - Q_s)^2}{n-1}}, \quad \sigma_s = 0,00063. \quad (4)$$

Доверительные границы  $\varepsilon$  случайной погрешности определены по формуле:

$$\varepsilon = \pm t_c \cdot \sigma_s, \quad \varepsilon = \pm 0,0014, \quad (5)$$

$t_c = 2,228$  – коэффициент Стьюдента.

Границы  $\Theta$  не исключенной систематической погрешности:

$$\Theta = k_n \cdot \sqrt{\sum_1^z Q_i^2}, \quad \Theta = k_n \cdot \sqrt{(Q_{зд})^2 + (Q_s)^2}, \quad \Theta = 0,0467. \quad (6)$$

где  $z$  – число не исключенных систематических составляющих погрешностей результата измерения;  $k_n$  – коэффициент, принимаемый равным 1,1 при доверительной вероятности  $P_d = 0,95$ ;  $Q_{зд}$  – предел погрешности калибратора давления. Границы погрешности результата измерения, учитывая случайную и систематическую составляющие:

$$\gamma_\Sigma = \pm \frac{\varepsilon + \Theta}{\sigma_s + \sqrt{\frac{Q_{зд}^2 + Q_s^2}{2}}} \cdot \sqrt{\frac{Q_{зд}^2 + Q_s^2}{2} + \sigma_s^2}, \quad \gamma_\Sigma = \pm 0,0471. \quad (7)$$

Дальнейшее исследование потенциальной точности измерения глубины заключалось в исследовании погрешности измерения в точках, не вошедших в массив калибровочных в диапазоне глубин до 500 метров. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Исследование погрешности измерения глубины

Кол-во измерений	Среднее измеренное давление кгс/см <sup>2</sup>	Глубина погружения М	Среднее значение измеренной глубины М	Относительная погрешность измерения глубины %	Ошибка по глубине М	СКО. М
10	1,9430926	20	19,430926	2,84537	0,56907	0,0801919
	7,9685646	80	79,685646	0,3929425	0,31435	0,0756872
	25,000609	250	250,00609	-0,0024360	-0,00609	0,0451179
	49,982047	500	499,82047	0,035906	0,17953	0,0599581

**Исследование временного дрейфа датчика глубины.** Важной метрологической характеристикой, наряду с погрешностью, является временная стабильность. Были проведены исследования для проверки стабильности метрологических характеристик датчика глубины, при этом на вход подавалось избыточное давление, равное нулю и регистрировались показания приборов путем периодического опроса их по цифровому каналу. Временные диаграммы, рис. 9, 10, показывают относительное изменение регистрируемых параметров дрейфа во времени.

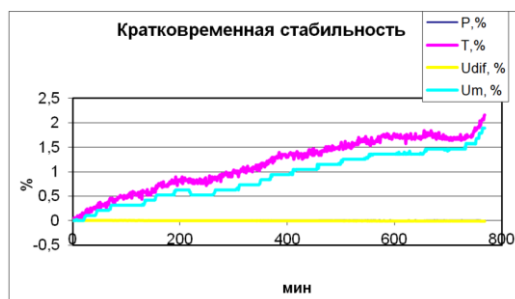


Рис. 9. Диаграмма 1 временного дрейфа

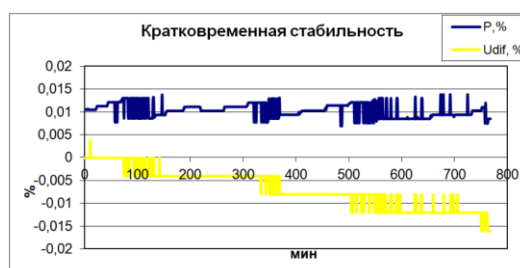


Рис. 10. Диаграмма 2 временного дрейфа

Проведенные испытания показали стабильность показаний на уровне 0.01 % за сутки, причем характер дрейфа не прогрессирующий. Уход «нуля» связан с изменением температуры, что показано на диаграммах. Подтверждена прямая зависимость  $U_m$  (напряжение на питающей диагонали моста) от температуры – графики температуры кристалла и  $U_m$  практически совпадают. С изменением температуры на 2 % (от диапазона 50 °С) наблюдается изменение  $U_{dif}$  (выходное напряжение моста) на 0.02 %, изменение же значения давления  $P$ , вызванное изменением температуры не превышает 0.008 %.

**Заключение.** Предложенные в процессе разработки датчика глубины погружения метод коррекции погрешности сенсора, методика калибровки датчика и конструкция позволили создать малогабаритный, прочный, массой не более 180 грамм, способный функционировать на борту глубоководного подводного аппарата, прецизионный измеритель глубины погружения. Дальнейшее уменьшение габаритов до значений 40–45 мм, снижение массы, возможно за счёт изменения вида коммуникации с бортом. Для снижения погрешности измерения в области малых глубин следует перейти на питание моста переменным током, а расширения функциональных возможностей – в виде совмещения измерений давления и температуры.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мазин В.Д.* Методы расчетной оценки погрешностей датчиков // Датчики и системы. – 2001. – № 2. – С. 2-5.
2. *Бычков В.В.* Высокоточные аналоговые и цифровые измерительные преобразователи давления: дисс. ... канд. техн. наук. – Томск, 2004. – 232 с.
3. *Ivanov E., Izaak T., Svinolupov Yu.* The capacitance sensor of differential pressure // The 16th Conf. on Solid-State Transducers 'EUROSENSOR XVI', Sept. 15 – 18, 2002, Prague. – P. 777-778.
4. *Masayoshi E., Shaichi Sh., Yosinori M. et al.* Capacitive pressure sensor // Trans. Instr. Electron., Inform. and Commun. Eng. – 1996. – Vol. 73, No. 2. – P. 91-98.
5. *Свинолунов Ю.Г., Криворотов Н.П., Бычков В.В.* Прецизионные цифровые измерители избыточного давления // Электронная промышленность. – 2002. – № 2/3.
6. *Малов В.В.* Пьезорезонансные датчики. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
7. ООО "СКТБ ЭлПА". – URL: <http://www.sktbelpa.ru> (дата обращения 10.02.2015).
8. *Савельев Ю.В.* Специализированные прецизионные пьезорезонансные датчики давления // Приборы. – 2013. – № 5. – С. 18-20.
9. *Стучебников В.М.* Структуры «кремний на сапфире» как материал для преобразователей физических величин // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50, № 6. – С. 678-696.
10. ЗАО «ВИП». – URL: <http://www.zaovip.ru/> (дата обращения 10.02.2015).
11. *Zhang Yan-Hong, Chen Yang, ZhaoHua Zhang.* A novel pressure microsensor with 30- $\mu\text{m}$ -thick diaphragm and meander-shaped piezoresistors partially distributed on high-stress bulk silicon region // IEEE Sensors Journal, December 2007. – Vol. 7, No. 12. – P. 1742-1748.
12. *Lijia Pan, Alex Chortos, Guihua Yu, Yaqun Wang, Scott Isaacson, Ranulfo Allen, Yi Shi, Reinhold Dauskardt, Zhenan Bao.* An ultra-sensitive resistive pressure sensor based on hollow-sphere microstructure induced elasticity in conducting polymer film // Nature Communications. – 2014. – No. 5: 3002.
13. *Ha-Duong Ngo, Biswajit Mukhopadhyay, Oswin Ehrmann, and Klaus-Dieter Lang.* Advanced Liquid-Free, Piezoresistive, SOI-Based Pressure Sensors for Measurements in Harsh Environments // Sensors (14248220). – Aug 2015. – Vol. 15, Issue 8. – 20305.
14. *Huiyang Yu, Jianqiu Huang.* Design and Application of a High Sensitivity Piezoresistive Pressure Sensor for Low Pressure Conditions // Sensors. – 2015. – No. 15 (9). – P. 22692-22704. Doi:10.3390/s150922692.
15. SolidWorks Simulation. – URL: <http://ascon.ru/> (дата обращения 10.02.2015).
16. *Вавилова Г.В.* Математическая обработка результатов измерения: учебно-методическое пособие. – Томск: ТПУ, 2013. – 160 с.
17. ГОСТ 8.0009-84 ГСИ. Нормируемые характеристики средств измерения.
18. ГОСТ 8.207-76 ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями.
19. ГОСТ Р 54500.1-2011. Руководство ИСО/МЭК98-1:2009 «Неопределенность измерения. Ч. 1. Введение в руководство по выражению неопределенности измерения».
20. ГОСТ Р 54500.3.1-2011. Руководство ИСО/МЭК98-3:2008. Дополнение 1: 2008 «Неопределенность измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределенности измерений».

## REFERENCES

1. *Mazin V.D.* Metody raschetnoy otsenki pogreshnostey datchikov [Methods of estimating errors of sensors], *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems], 2001, No. 2, pp. 2-5.
2. *Bychkov V.V.* Vysokotochnye analogovye i tsifrovye izmeritel'nye preobrazovateli davleniya: diss. ... kand. tekhn. nauk [High-precision analog and digital transducers pressure. Cand. of eng. sc. diss.]. Tomsk, 2004, 232 p.
3. *Ivanov E., Izaak T., Svinolupov Yu.* The capacitance sensor of differential pressure, *The 16th Conf. on Solid-State Transducers 'EUROSENSOR XVI'*, Sept. 15 – 18, 2002, Prague, pp. 777-778.
4. *Masayoshi E., Shaichi Sh., Yosinori M. et al.* Capacitive pressure sensor, *Trans. Instr. Electron., Inform. and Commun. Eng.*, 1996, Vol. 73, No. 2, pp. 91-98.
5. *Svinolupov Yu.G., Krivorotov N.P., Bychkov V.V.* Pretsizionnye tsifrovye izmeriteli izbytochnogo davleniya [Precision digital gauges gauge pressure], *Elektronnaya promyshlennost'* [Electronic Engineering], 2002, No. 2/3.
6. *Malov V.V.* P'ezorezonansnye datchiki [Piezoresonance sensors]. 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 272 p.
7. ООО "СКТБ ЕИПА" [LLC "SKTB ELPA"]. Available at: <http://www.sktbelpa.ru> (accessed 10 February 2015).
8. *Savel'ev Yu.V.* Spetsializirovannye pretsizionnye p'ezorezonansnye datchiki davleniya [Specialized precision piezoresonance pressure sensors], *Pribory* [Devices], 2013, No. 5, pp. 18-20.
9. *Stuchechnikov V.M.* Stuktury «kremniy na sapfire» kak material dlya preobrazovateley fizicheskikh velichin [the Structure of "silicon on sapphire" as a material for transducers of physical quantities], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 2005, Vol. 50, No. 6, pp. 678-696.
10. ЗАО «VIP» [CJSC "VIP"]. Available at: <http://www.zaovip.ru/> (accessed 10 February 2015).
11. *Zhang Yan-Hong, Chen Yang, ZhaoHua Zhang.* A novel pressure microsensor with 30- $\mu\text{m}$ -thick diaphragm and meander-shaped piezoresistors partially distributed on high-stress bulk silicon region, *IEEE Sensors Journal*, December 2007, Vol. 7, No. 12, pp. 1742-1748.
12. *Lijia Pan, Alex Chortos, Guihua Yu, Yaqun Wang, Scott Isaacson, Ranulfo Allen, Yi Shi, Reinhold Dauskardt, Zhenan Bao.* An ultra-sensitive resistive pressure sensor based on hollow-sphere microstructure induced elasticity in conducting polymer film, *Nature Communications*, 2014, No. 5: 3002.
13. *Ha-Duong Ngo, Biswajit Mukhopadhyay, Oswin Ehrmann, and Klaus-Dieter Lang.* Advanced Liquid-Free, Piezoresistive, SOI-Based Pressure Sensors for Measurements in Harsh Environments, *Sensors (14248220)*, Aug. 2015, Vol. 15, Issue 8, 20305.
14. *Huiyang Yu, Jianqiu Huang.* Design and Application of a High Sensitivity Piezoresistive Pressure Sensor for Low Pressure Conditions, *Sensors*, 2015, No. 15 (9), pp. 22692-22704. Doi:10.3390/s150922692.
15. SolidWorks Simulation. Available at: <http://ascon.ru/> (accessed 10 February 2015).
16. *Vavilova G.V.* Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov izmereniya: uchebno-metodicheskoe posobie [Mathematical processing of measurement results": textbook]. Tomsk: TPU, 2013, 160 p.
17. GOST 8.0009-84 IGG. Normiruemye kharakteristiki sredstv izmereniya [State Standard 8.0009-84 IGG. Normalized characteristics of measuring instruments].
18. GOST 8.207-76 IGG. Pryamyie izmereniya s mnogokratnymi nablyudeniyami [State Standard 8.207-76 IGG. Direct measurements with multiple observations].
19. GOST R 54500.1-2011. Rukovodstvo ISO/MEK98-1:2009 «Neopredelennost' izmereniya. Ch. 1. Vvedenie v rukovodstvo po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniya» [State Standard R 54500.1-2011. ISO/МЭК98-1:2009 "Uncertainty of measurement. Part 1. Introduction to the guide to expression of uncertainty of measurement"].
20. GOST R 54500.3.1-2011. Rukovodstvo ISO/MEK98-3:2008. Dopolnenie 1: 2008 «Neopredelennost' izmereniya. Ch. 3. Rukovodstvo po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniya» [State Standard R 54500.3.1-2011. Guide ISO/МЭК98-3:2008 amendment 1: 2008 "Uncertainty of measurement. Part 3. The guide to the expression of uncertainty in measurement].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Светлаков.

**Свинолулов Юрий Григорьевич** – Томский политехнический университет; e-mail: sjg@tpu.ru; 634061, Томск, пр. Ленина, 30; тел.: 99138891119; лаборатория ТПМГ; к.т.н.; доцент.

**Машкин Алексей Александрович** – Институт проблем морских технологий ДВО РАН; e-mail: alexej.maschkin@yandex.ru; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел.: 89609728056; лаб. 09; вед. конструктор.

**Брагин Никита Андреевич** – руководитель проекта.

**Svinolupov Yuri Grigor'evich** – Tomsk Polytechnic University; e-mail: sjg@tpu.ru; 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634061, Russia; phone: 99138891119; TPMG laboratory; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Mashkin Alexey Alexandrovich** – Institute of marine technology problems Feb RAS; e-mail: alexej.maschkin@yandex.ru; 690091, Vladivostok, 5A, Sukhanova street; phone: +79609728056; lab. 09; the vedas. constructor.

**Bragin Nikita Andreevich** – the leader of the project.

УДК 681.586

**В.В. Янчич, А.Е. Панич**

### **ДВУХПАРАМЕТРОВЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И УГЛОВОГО УСКОРЕНИЯ**

*С целью повышения точности и достоверности измерения параметров виброускорения проведены исследования и разработка двухпараметрового пьезоэлектрического датчика для систем виброконтроля и диагностики работающего промышленного оборудования. Датчик предназначен для одновременного измерения виброускорений поступательных и крутильных колебаний элементов и узлов контролируемого объекта. Многофункциональный механо-электрический преобразователь датчика установлен на основании его корпуса, содержит инерционный и пьезоэлектрический элементы. Работа датчика основана на возникновении в пьезоэлементе деформаций растяжения-сжатия и сдвига при воздействии поступательного и углового ускорений. Для выделения электрических сигналов, вызванных разными типами деформации, пьезоэлемент имеет два слоя с продольной и тангенциальной поляризацией. Характер распределения механических напряжений, электрических полей и зависимость основных технических характеристик датчика от размеров элементов преобразователя исследованы на математической модели методом конечных элементов. Полученные результаты использованы при разработке и оптимизации конструкции. Основные технические характеристики датчика: коэффициент преобразования поступательного ускорения  $5 \text{ нКл}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^2$ ; коэффициент преобразования углового ускорения  $0,135 \text{ нКл}\cdot\text{рад}^{-1}\cdot\text{с}^2$ ; частота продольного установочного резонанса 21 кГц; частота крутильного установочного резонанса 14 кГц; рабочий диапазон частот при измерении поступательного ускорения от 1 до 6000 Гц; рабочий диапазон частот при измерении углового ускорения от 1 до 4000 Гц; рабочий диапазон температур от минус 60 до +200 °С. Разработан также вариант со встроенным усилителем. Датчик предназначен для эксплуатации в промышленных условиях на нефтеперерабатывающем и энергоснабжающем оборудовании, железнодорожном транспорте, а также в других областях техники. Применение двухпараметрового датчика вместо двух однопараметровых позволяет проводить измерения поступательного и углового ускорений в единой точке контролируемого объекта.*

*Пьезоэлектрический; датчик; угловое и поступательное ускорение; вибрация; математическая модель.*