

УДК 681.2.087

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИДРОФОНА

М.Е. Ефимов^а, М.Ю. Плотников^а, А.В. Куликов^а^а Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, spbeok@hotmail.com

Аннотация. Предложена модель волоконно-оптического чувствительного элемента гидрофона. Конструкция гидрофона содержит податливый сердечник из полимерного материала с регламентированными упругими свойствами, на который намотано оптическое волокно. При моделировании использован встроенный модуль среды Comsol Multiphysics – Acoustic Solid Interaction, позволяющий оценить воздействие акустического поля различной частоты и амплитуды на величину деформации поверхности чувствительного элемента. Предложенная модель позволяет имитировать работу гидрофона в различных средах, материалы и размеры чувствительного элемента выбираются на этапе проектирования с целью обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик – частотной характеристики и чувствительности волоконно-оптического гидрофона.

Правильность построения модели проверена сопоставлением результатов компьютерного моделирования и экспериментального исследования макета в акустическом бассейне. Макет представлял собой волоконный фазовый интерферометрический гидрофон на брэгговских решетках. Чувствительный элемент выполнен в виде цилиндрического сердечника, на который намотано оптическое волокно. Характеристики сердечника: показатель затухания материала (damping) – 0,1, модуль Юнга сердечника – 6 МПа, коэффициент Пуассона – 0,49. Макет испытан в экспериментальном бассейне, конструкция которого позволяет проводить измерения на частотах выше 3000 Гц при отсутствии переотражений акустического сигнала. Оценка воздействия акустического поля проведена с помощью аттестованного пьезоэлектрического гидрофона: амплитуда акустического поля плоской волны 0,5 и 1 Па, частоты акустического воздействия 3000–8000 Гц. Согласно полученным результатам, чувствительность изготовленного макета составила 0,1 рад/Па на частоте 3000 Гц. Исследования показали, что чувствительность моделируемого волоконно-оптического гидрофона будет уменьшаться с ростом частоты гидроакустического воздействия. На частоте 8000 Гц чувствительность снижается до 0,01 рад/Па. Результаты макетных испытаний подтвердили адекватность компьютерной модели, что дает возможность рекомендовать предложенную модель при разработке и исследовании волоконно-оптических гидрофонов.

Ключевые слова: волоконно-оптический гидрофон, моделирование, Comsol Multiphysics, чувствительность.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект №02.G25.31.0044).

MODELING AND EXPERIMENTAL STUDY OF A FIBER OPTIC HYDROPHONE SENSING ELEMENT

M.E. Efimov^a, M.Yu. Plotnikov^a, A.V. Kulikov^a^a ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, spbeok@hotmail.com

Abstract. A model of the fiber-optic hydrophone sensor is suggested. Hydrophone construction comprises a malleable core made of a polymeric material with regulated elastic properties to which the optical fiber is wound. The built-in module of Comsol Multiphysics - Acoustic Solid Interaction is used in the simulation; it evaluates the impact of the acoustic field of different frequencies and amplitudes on the value of the sensor surface deformation. The proposed model gives the possibility for simulating the hydrophone in various environments; materials and dimensions of sensor are selected at the design stage to ensure the required performance: frequency response and sensitivity of fiber optic hydrophone. Correctness of the model construction was verified by results comparison of the computer simulation and experimental study in the acoustic pool. The prototype was represented as the phase interferometric fiber-optic hydrophone on the Bragg gratings. The sensing element is formed as a cylindrical core round which the optical fiber is wound. Core characteristics are: the material attenuation (damping) – 0.1, Young's modulus of the core - 6 MPa, Poisson's ratio - 0.49. The prototype was tested in the experimental pool, which design makes it possible to carry out measurements at frequencies above 3 kHz in the absence of reflections of the acoustic signal. The impact assessment of the acoustic field is carried out by means of an approved piezoelectric hydrophone: the amplitude of the acoustic field of a plane wave is 0.5 and 1 Pa, frequencies of the acoustic impact are 3000 - 8000 Hz. According to the findings fabricated prototype sensitivity was equal to 0.1 rad / Pa at the frequency of 3 kHz. Studies have shown that the sensitivity of the simulated fiber optic hydrophone will decrease with increasing frequency of hydroacoustic exposure. At 8 kHz frequency the sensitivity is decreased to 0.01 rad / Pa. Prototype testing results have confirmed the adequacy of the computer model that makes it possible to recommend the proposed model for the development and study of fiber optic hydrophones.

Keywords: fiber-optic hydrophone, modeling, Comsol Multiphysics, sensitivity.

Acknowledgements. The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project №02.G25.31.0044).

Введение

В настоящее время хорошо изучены и получили широкое распространение в гидроакустике пьезо-керамические чувствительные элементы [1]. Их главными недостатками являются большие массогабаритные параметры, сложность объединения их в гидроакустические комплексы (сложность их мультиплексирования) [2], высокая чувствительность к электромагнитному воздействию и небольшая акустическая чувствительность по сравнению с волоконно-оптическими гидрофонами.

Сегодня все более широкое распространение получают оптические датчики различных типов [3] благодаря высокой чувствительности измерений, большому динамическому диапазону, коррозионной стойкости, взрыво- и пожаробезопасности, а также устойчивости к электромагнитному излучению [4]. Эта тенденция коснулась и гидроакустики. Датчики, фиксирующие звуковое давление в водной среде, называются гидрофонами.

Целью настоящей работы является создание модели чувствительного элемента волоконно-оптического гидрофона (ВОГ) и сопоставление результатов моделирования в среде Comsol Multiphysics с результатами, полученными в ходе экспериментального исследования макета чувствительного элемента.

Волоконно-оптические датчики обладают рядом преимуществ по сравнению с пьезокерамическими чувствительными элементами. ВОГ обладают лучшими метрологическими параметрами, имеют более выгодные весогабаритные характеристики, малое энергопотребление, независимость от влияния электромагнитного поля. Все эти преимущества делают волоконно-оптические датчики более перспективными для использования в газонефтяной промышленности, а также в геолокационных и гидролокационных комплексах [5]. Моделирование в среде Comsol Multiphysics позволяет провести предварительную оценку частотной характеристики чувствительного элемента ВОГ без непосредственного изготовления опытного образца.

Фазовые интерферометрические датчики

В любых волоконно-оптических датчиках оптическое волокно может служить либо средой для передачи информации, либо чувствительным элементом. В последнем случае датчик обычно строится на основе волоконно-оптического интерферометра, одно волокно в котором служит сигнальным плечом, а другое – опорным. На рис. 1 представлена схема работы фазовых интерферометрических датчиков на брэгговских решетках с интерферометром Маха–Цендера.

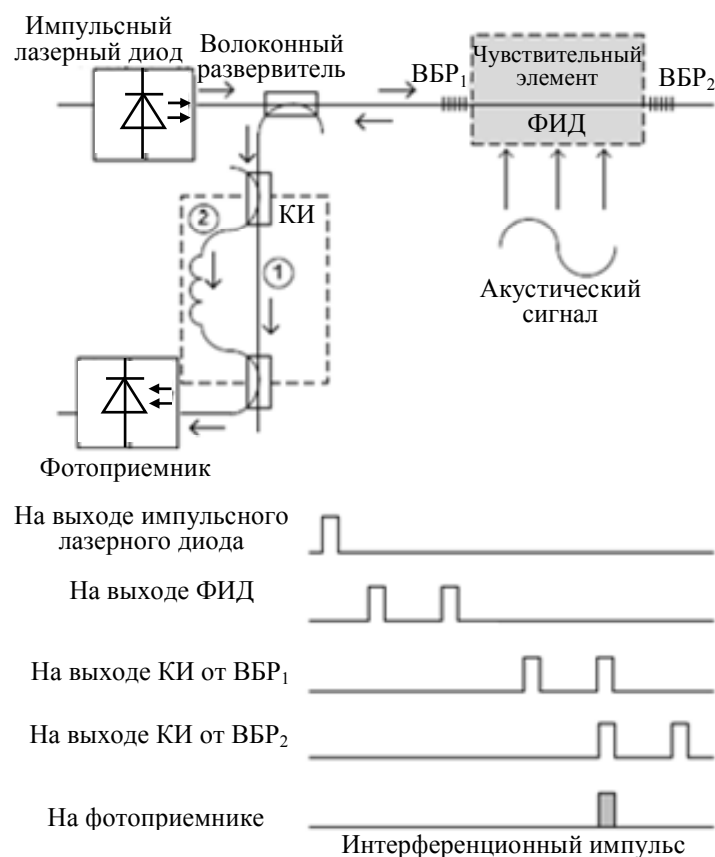


Рис. 1. Принцип действия фазовых интерферометрических датчиков на брэгговских решетках: КИ – компенсационный интерферометр; ВБР – волоконная брэгговская решетка; ФИД – фазовый интерферометрический датчик

Измерение параметров среды в этом случае осуществляется за счет изменения оптической длины пути волокна или фазы излучения в нем. Модуляция оптической длины или фазы при этом может происходить либо через вспомогательный элемент, связанный с волокном, либо через изменение параметров самого волокна. Например, в волоконно-оптических гидрофонах обычно используется интерферометр Маха–Цендера и когерентный источник излучения, свет из которого распространяется по обоим плечам

интерферометра. Намотанное на катушку оптическое волокно, выступающее в роли чувствительного элемента, подвергается акустическому воздействию, которое модулирует фазу проходящего по нему света. Изменение фазы света меняет итоговую интерференционную картину, что регистрируется фотоприемником (ФП) [6].

Акустическое воздействие изменяет диаметр сердцевины, длину и показатели преломления оболочки и сердцевины волокна, тем самым осуществляя фазовую модуляцию распространяющегося по волокну светового излучения. Изменение длины волокна в этом случае является преобладающим эффектом [7].

Изменение во времени деформации чувствительного элемента датчика и показателя преломления оптического волокна в результате внешнего воздействия вызывают изменение разности фаз между интерферирующими импульсами. Интерференционный сигнал преобразуется ФП в изменение величины тока, которое после демодуляции несет информацию об акустическом сигнале [8].

Моделирование чувствительного элемента ВОГ

Чувствительность волоконно-оптических датчиков давления зависит от многих факторов, таких как длина намотанного оптического волокна, физические свойства материала, из которого он изготовлен, конструкция чувствительного элемента и т.д. [9]. Под физическими свойствами материала подразумеваются такие его параметры, как модуль Юнга и коэффициент Пуассона, полностью характеризующие упругие свойства изотропного материала. Чувствительность гидрофона тем выше, чем больше модуль Юнга, коэффициент Пуассона должен быть примерно равен 0,5.

Так как чувствительность ВОГ зависит от упругих свойств материала изготовления, было проведено исследование деформации модели от частоты воздействия акустического поля. С этой целью была реализована модель в среде Comsol Multiphysics.

Моделируемый чувствительный элемент ВОГ представляет собой податливый цилиндрический сердечник, размеры которого задаются параметрически, покрытый более жестким полимерным материалом, на который наматывается оптическое волокно (рис. 2). Полученный чувствительный элемент с намотанным оптическим волокном для защиты покрывается тонким слоем более жесткого полимерного материала, толщина этого слоя также задается параметрически.

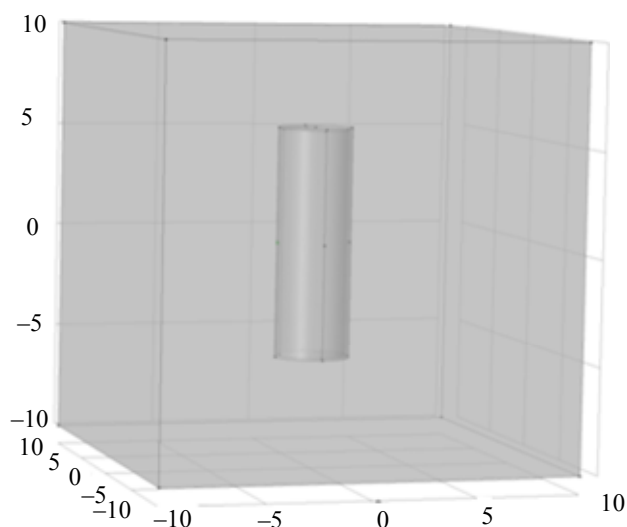


Рис. 2. Геометрическая модель ВОГ (масштаб: 5см/клетка)

Для построения модели был использован встроенный модуль среды Comsol Multiphysics – Acoustic Solid Interaction, Frequency Domain, позволяющий моделировать акустическое поле плоской волны заданной амплитуды в диапазоне частот и оценивать ее влияние на чувствительный элемент [10]. В модели использовались следующие параметры: амплитуда акустического поля плоской волны – 0,5 и 1 Па; частота акустического воздействия – 3000–8000 Гц; показатель затухания материала (damping) – 0,1; модуль Юнга сердечника – 6 МПа; коэффициент Пуассона сердечника – 0,49; модуль Юнга полимерного покрытия – 3,2 ГПа; коэффициент Пуассона полимерного покрытия – 0,35. При изменении этих параметров результат будет меняться соответственно. При уменьшении коэффициента Пуассона и (или) модуля Юнга величина деформации будет уменьшаться. При изменении геометрической формы будет меняться характер частотной характеристики. Частотная характеристика становится менее плавной при уменьшении показателя затухания материала и более плавной при его увеличении [11].

Параметры свойств сердечника и полимерного покрытия были заданы таким образом, чтобы они были максимально близки к имеющимся в лаборатории материалам, из которых позже планировалось изготовить экспериментальный образец. Диапазон исследуемых частот акустического воздействия был

выбран в соответствии с параметрами бассейна, в котором проводились испытания экспериментального образца. Показатель затухания был выбран в соответствии с используемыми параметрами (как у резины – 0,1). Амплитуды акустического воздействия соответствовали возможностям генератора, используемого для проведения экспериментального исследования.

На рис. 3, 4 представлены результаты моделирования. Рис. 3 отображает деформацию чувствительного элемента на частотах 3000 Гц (рис. 3, а) и 8000 Гц (рис. 3, б) при амплитуде акустического воздействия 1 Па. Из рис. 3 можно сделать вывод о большей деформации на 3000 Гц и о зонах максимальной деформации поверхности гидрофона. Рис. 4 отображает среднеквадратичную величину смещения центральной точки на боковой поверхности цилиндрической формы чувствительного элемента волоконного гидрофона при амплитуде акустического воздействия 0,5 и 1 Па.

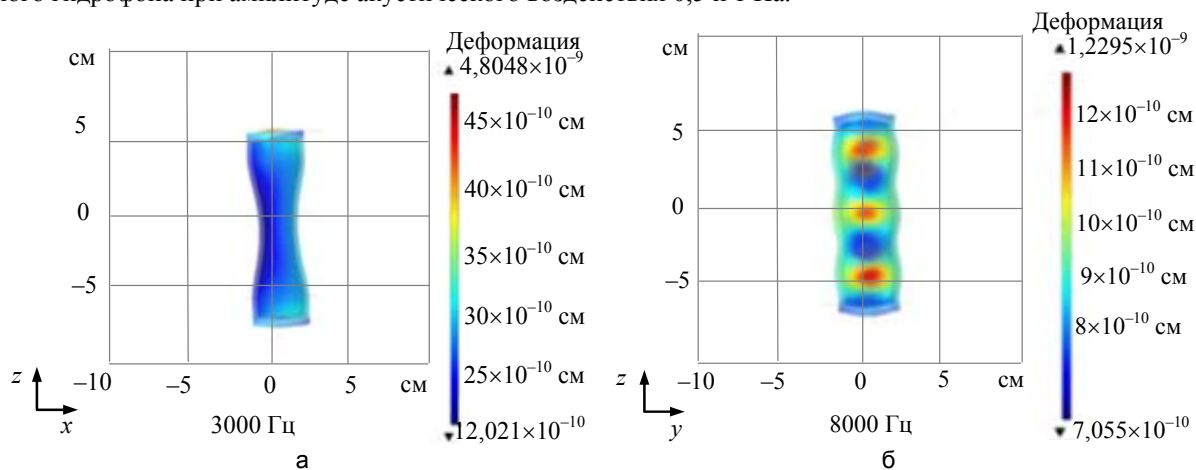


Рис. 3. Деформация поверхности ВОГ на частотах: 3000 Гц (а); 8000 Гц (б)

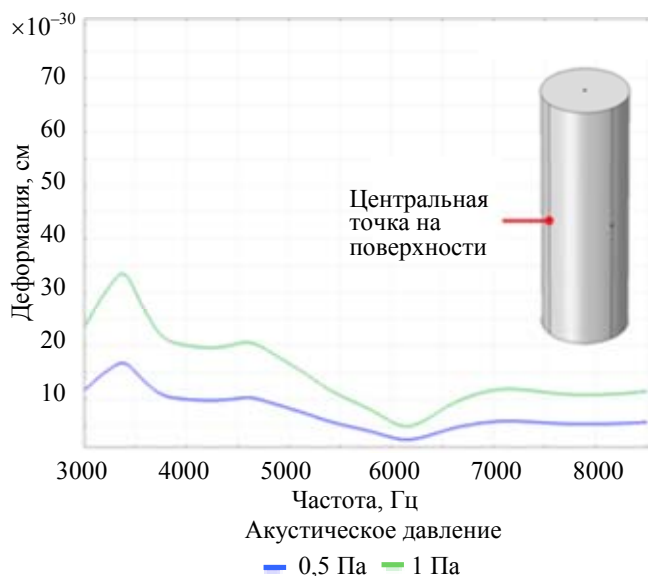


Рис. 4. Среднеквадратичная величина деформации в центральной точке на боковой поверхности цилиндрической формы чувствительного элемента

Для более детального анализа полученных результатов моделирования рассмотрим график зависимости среднеквадратичной величины смещения в центральной точке на боковой поверхности цилиндрической формы чувствительного элемента от частоты и амплитуды акустического поля (рис. 4). Представленная на рис. 4 частотная характеристика среднеквадратичной величины деформации в полосе частот 3000–8000 Гц показывает, что чувствительность ВОГ снижается с увеличением частоты воздействия акустического поля при амплитудах воздействия акустического поля 0,5 Па и 1 Па, а деформация поверхности модели гидрофона при амплитуде акустического воздействия 0,5 Па в два раза меньше, чем при амплитуде 1 Па.

Полученная частотная характеристика деформации модели ВОГ должна согласоваться с частотной характеристикой чувствительности экспериментального образца, полученной в ходе экспериментального исследования, что докажет достоверность предложенного метода разработки и исследования ВОГ.

Создание и экспериментальное исследование чувствительного элемента ВОГ

Для проверки полученных результатов моделирования был изготовлен макет волоконного фазового интерферометрического гидрофона [12] на брэгговских решетках (рис. 5). При изготовлении экспериментального образца чувствительного элемента ВОГ был залит цилиндрический сердечник, на который было намотано оптическое волокно [13]. Полученный чувствительный элемент с намотанным оптическим волокном для защиты покрывается тонким слоем более жесткого полимерного материала [14].

Изготовление чувствительного элемента ВОГ проходило в несколько этапов:

- заливка цилиндрического сердечника;
- намотка оптического волокна на цилиндрический сердечник;
- покрытие тонким слоем более жесткого полимера.



Рис. 5. Макет волоконно-оптического гидрофона

Изготовленный макет ВОГ был испытан в бассейне, конструкция которого позволяет проводить измерения на частотах выше 3000 Гц (из-за большого количества переотражений на более низких частотах). Для оценки воздействия акустического поля был использован аттестованный пьезоэлектрический гидрофон, располагающийся в одной плоскости с макетом ВОГ на расстоянии 0,2 м. Излучатель был установлен на расстоянии 6 м от испытуемого волоконного гидрофона. Результаты испытаний представлены на рис. 6 [15].

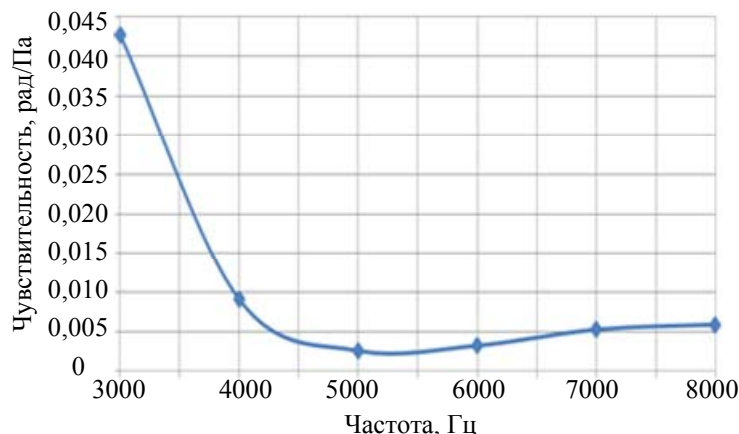


Рис. 6. График зависимости чувствительности гидрофона от частоты

Согласно полученной экспериментально частотной характеристике макета ВОГ, чувствительность составила 0,1 рад/Па на частоте 3000 Гц и снизилась до 0,01 рад/Па – на 8000 Гц. Приведенные значения чувствительности экспериментального образца в рад/Па соответствуют отношению величины фазового сдвига (рад) в чувствительном плече интерферометрического датчика к величине акустического давления (Па).

При сравнении полученных экспериментальных данных с результатами моделирования было установлено их хорошее совпадение. Некоторая рассогласованность полученных результатов может быть обусловлена небольшим различием свойств материалов макета-аналога и модели. Это позволяет утверждать о достоверности полученных результатов моделирования в среде Comsol Multiphysics и корректности модели. Полученные результаты представляют практический интерес с точки зрения разработки новых чувствительных элементов и могут быть использованы для создания чувствительных элементов волоконно-оптических гидрофонов.

Заключение

Предложена компьютерная модель ВОГ с заданными параметрами, позволяющая качественно оценить частотную характеристику чувствительности ВОГ без его изготовления и испытаний.

Для подтверждения результатов моделирования был изготовлен и экспериментально исследован

макет чувствительного элемента в диапазоне частот 3000–8000 Гц. Чувствительность макета волоконного гидрофона составила 0,1 рад/Па на частоте 3000 Гц и снизилась до 0,01 рад/Па на частоте 8000 Гц.

Результаты экспериментальных исследований показали, что характеристика чувствительности макета ВОГ качественно совпадает с результатами моделирования, что позволяет судить о правильности построенной модели и корректности полученных в результате моделирования данных.

Актуальность проведенных исследований определяется необходимостью построения адекватных моделей волоконно-оптических чувствительных элементов, востребованной для проектирования гидрофонов с заданными параметрами.

References

1. Rybjanets A.N., Sakhnenko V.P. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya p'ezoelektricheskoi keramiki za rubezhom [Current state and prospects of development of the piezoelectric ceramic abroad]. *Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2002, no. 3, pp. 16–22.
2. Varzhel S.V., Kulikov A.V., Brunov V.S., Aseev V.A. Metod ponizheniya koeffitsienta otrazheniya volokonnykh breggovskikh reshetok s pomoshch'yu effekta fotokhromizma [Reflection coefficient decreasing method of fiber Bragg gratings by the effect of photochromism]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 1 (77), pp. 151–152.
3. *Fiber Optic Hydrophones*. Stockbridge, 2011, 5 p.
4. Wurster C., Staudenraus J., Eisenmenger W. Fiber optic probe hydrophone. *Proc. of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 1994, vol. 2, pp. 941–944.
5. Cole J.H., Kirkendall C., Dandridge A., Cogdell G., Giallorenzi T.G. Twenty-five years of interferometric fiber optic acoustic sensors at the naval research laboratory. *Washington Academy of Sciences*, 2004, pp. 40–57.
6. Kulikov A.V. *Volokonno-opticheskie akusticheskie sensory na breggovskikh reshetkakh*. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. [Fiber-optic acoustic sensors on Bragg gratings. Thesis eng. sci. diss.]. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2012, 20 p.
7. Bucaro J.A., Lagakos N., Cole J.H., Giallorenzi T.G. Fiber optic acoustic transduction. *Physical Acoustics*, 1982, vol. 16, pp. 385–457.
8. Giallorenzi T.G., Bucaro J.A., Dandridge A., Sigel G.H. Jr., Cole J.H., Rashleigh S.C., Priest R.G. Optical fiber sensor technology. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, vol. QE-18, no. 4, pp. 626–665.
9. Guo K., Zhang M., Liao Y., Lai S., Wang Z., Tang J. Fiber-optic hydrophone with increased sensitivity. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2006, vol. 6293, art. 629312.
10. *Acoustic-Structure Interaction*. 2012. Available at: www.comsol.com/model/download/121005/models.aco.acoustic_structure.pdf (accessed 10.05.2014).
11. Wang Y., Wang C. Simulation of high-sensitivity hydrophone based on ANSYS. *Proc. of International Conference on Mechanical Engineering and Material Science, MEMS-2012*. China, 2012, pp. 697–699. doi: 10.2991/mems.2012.97
12. Jameson P., Jameson P., Burton T., Ordubadi A., Africk S. Design of rubber mandrel fiber optic hydrophones. *Journal of Acoustical Society of America*, 1981, vol. 70, pp. 100. doi: 10.1121/1.2018646
13. Aksarin S.M., Arkhipov S.V., Varzhel S.V., Kulikov A.V., Strigalev V.E. Issledovanie zavisimosti parametrov anizotropnykh odnomodovykh volokonnykh svetovodov ot diametra namotki [Study the dependence of the parameters of anisotropic single-mode fibers on the diameter of the winding]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 6 (88), pp. 22–26.
14. Balitskii V.A., Gorodetskii V.S., Lyamshev L.M. et. al. *Akusticheskii Zhurnal*, 1985, vol. 31, no. 5, p. 47.
15. Butusov M.M., Latinskii V.S., Tarasyuk Yu.F., Galkin S.L. *Volokonnaya Optika v Sudovom Priborostroenii* [Fiber Optics in the Ship's Instrument Making]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1990, 82 p.

- Ефимов Михаил Евгеньевич** – студент, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, spbeok@hotmail.com
- Плотников Михаил Юрьевич** – аспирант, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, plotnikov-michael@yandex.ru
- Куликов Андрей Владимирович** – соискатель, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, a.kulikov86@gmail.com
- Mikhail E. Efimov** – student, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, spbeok@hotmail.com
- Mikhail Yu. Plotnikov** – postgraduate, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, plotnikov-michael@yandex.ru
- Andrey V. Kulikov** – applicant, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, a.kulikov86@gmail.com

Принято к печати 30.06.14
Accepted 30.06.14