

УДК 556

МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ГИДРОФОН ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НИЗКОЧАСТОТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМОВ МИРОВОГО ОКЕАНА

© 2018 г. Д. Л. Зайцев^{1,*}, С. Ю. Авдюхина¹, В. М. Агафонов¹,
академик РАН А. С. Бугаев^{1,2}, Е. В. Егоров¹

Поступило 19.02.2018 г.

Исследование посвящено вопросам разработки инструментальной базы измерений для нужд низкочастотного зондирования шумов моря. Представлены экспериментальные результаты испытаний технических характеристик молекулярно-электронного гидрофона. Исследованы амплитудно-частотные и шумовые характеристики прототипов. Продемонстрирована работа гидрофона с полосой пропускания 0,02–200 Гц и чувствительностью 0,75 мВ/Па. Методом корреляционного анализа выполнено измерение собственных шумов.

DOI: 10.31857/S086956520003454-2

В современных науках о Земле исследованию собственных шумов Мирового океана отводится серьезная роль. Шумы природного происхождения возникают благодаря различным процессам, происходящим в океане, земле и атмосфере. Обобщение экспериментальных исследований шумов представлено в работе [1]. В то же время исследование низкочастотного шума моря, обусловленного такими процессами, как сезонные погодные изменения, тектонические процессы в литосфере Земли, приливы и изменения подводных течений, сталкивается с отсутствием необходимой элементной базы измерений, обладающей, с одной стороны, достаточной чувствительностью, а с другой, низким уровнем собственных шумов. Известен ряд технологий датчиков вариаций акустического давления: пьезоэлектрические [2], оптические [3], лазерные датчики на основе оптического отражения в волокне [4], решётках Брега [5], интерферометре Фабри–Перо [6, 7], тем не менее указанные технологии не всегда доступны по совокупности ценовых и технических параметров для исследования

слабых сигналов в области сверхнизких частот.

Успешно зарекомендовавшая себя технология, основанная на принципах молекулярно-электронного переноса (МЭП) заряда в области сейсмологии и геофизических исследований [8, 9], геодезии [10] и сейсмической безопасности [11], может быть применена для разработки датчиков давления. Отличительными особенностями датчиков на основе МЭП являются высокая чувствительность и низкий уровень собственных шумов.

В настоящем исследовании представлены результаты разработки широкополосного (0,02–200 Гц) молекулярно-электронного гидрофона с низким уровнем собственных шумов и высокой чувствительностью. Как и все устройства на основе МЭП, молекулярно-электронный гидрофон работает по принципу возникновения сигнального тока при протекании жидкости через преобразующую электрохимическую ячейку. Для достижения широкого динамического диапазона и высоких показателей стабильности характеристик в конструкцию гидрофона введена глубокая электродинамическая обратная связь.

Фундаментальные принципы работы систем на основе МЭП подробно изложены в учебных [12], научно-популярных [13] и периодических [14] изданиях. Основу устройств, работающего по технологии МЭП, составляет электрохимическая ячейка

¹Московский физико-технический институт, государственный университет, Долгопрудный Московской обл.

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской Академии наук, Москва

*E-mail: Dmitry_zaytsev@mail.ru

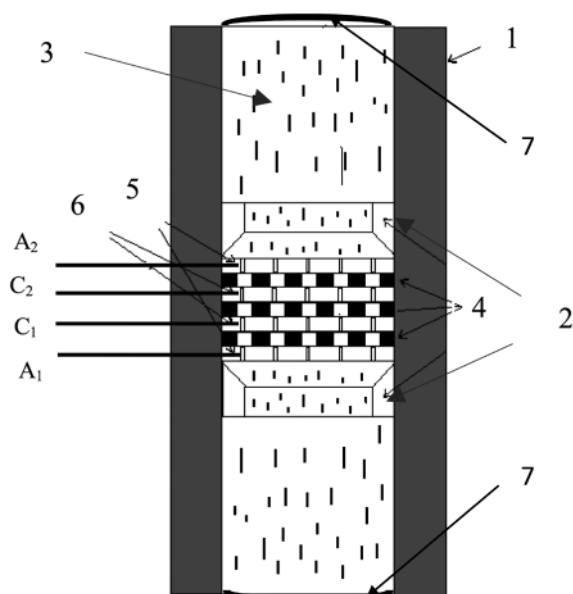


Рис. 1. Чувствительный элемент МЭП, на примере датчика линейных перемещений. 1 – стенки корпуса канала; 2 – резиновые уплотнители; 3 – электролит; 4 – пористые диэлектрические прокладки; 5 – внешние электроды (аноды A_1 , A_2); 6 – внутренние электроды (катоды C_1 , C_2), 7 – эластичные мембраны, ограничивающие канал.

(рис. 1). Электрохимическая ячейка преобразует поток электролита, протекающий через неё, в сигнальный ток сенсора. Традиционно практическая реализация устройств на основе МЭП использует в качестве рабочей жидкости высококонцентрированный водный раствор электролита на основе йодида

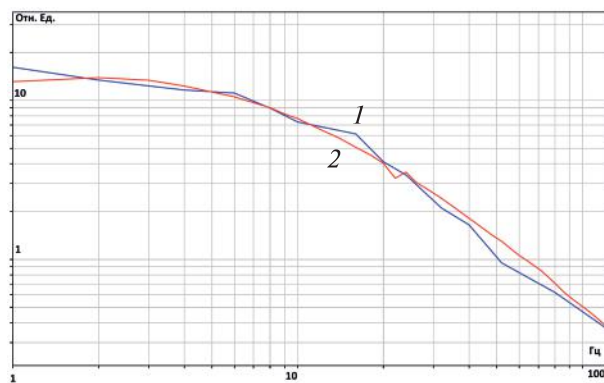


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика Сравнение АЧХ чувствительного элемента МЭП гидрофона при самокалибровке катушкой (1) и калибровке на стенде изменения давления (2).

калия KI или йодида лития LiI с небольшой добавкой молекулярного йода I_2 .

В растворе происходит почти полная диссоциация KI на отрицательно заряженные ионы I^- и положительные ионы K^+ , а молекулярный йод вступает в реакцию с ионами I^- , с образованием отрицательно заряженных ионов трийодида по схеме: . Если к помещенным в раствор электродам приложена некоторая небольшая разность потенциалов ($<0,9$ В), то на электродах протекают обратимые электрохимические реакции с переносом электронов через границу раздела – металл/раствор электролита, причем на катодах идет реакция в прямом направлении, а на анодах – в обратном. При этом в системе устанавливается распределение концентрации активного компонента. В стационарном случае в отсутствие внешних сигналов ток, текущий через электроды, полностью определяется диффузионной составляющей. При наличии гидродинамических потоков к диффузионному добавляется конвективный перенос, что приводит в зависимости от направления течения жидкости к увеличению или уменьшению тока в системе. Вариации электрического тока, обусловленные возникающими гидродинамическими потоками, и являются выходным сигналом МЭП. Конструкция гидрофона имеет сходство с датчиком линейных перемещений, схематично описанного выше, однако имеются и существенные отличия, которые позволяют использовать МЭП ячейку для измерения вариаций внешнего давления. Одна из мембран гидрофона открыта во внешнюю среду, вариации давления которой измеряются аналогично рис. 1. При этом вторая мембрана герметично накрывается твёрдым колпаком,

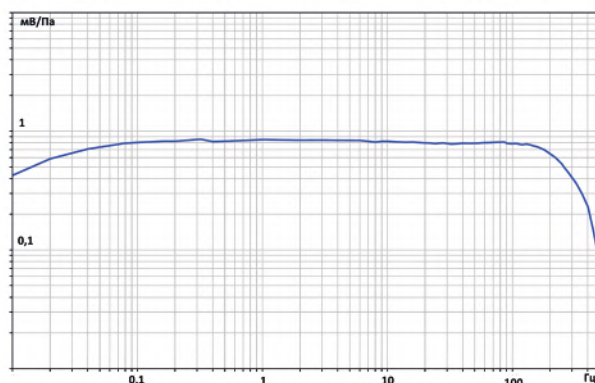


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика МЭП гидрофона.

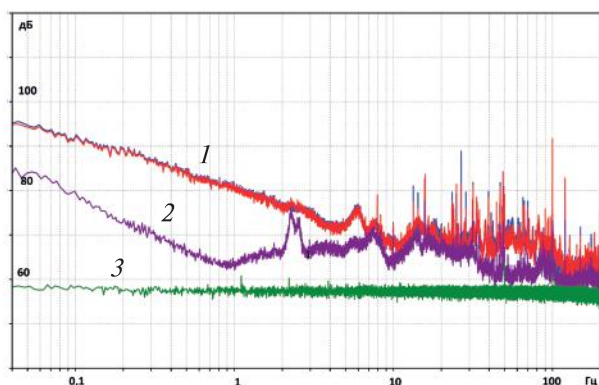


Рис. 4. Экспериментальный собственный шум МЭП гидрофона в дБ относительно 1 мкПа/.

запирающим небольшой объём воздуха под крышкой. Последнее позволяет измерять вариации давления, так как в сосуде с воздухом при деформации второй мембраны меняется давление.

В конструкцию экспериментального макета вошли элементы силовой электродинамической отрицательной обратной связи, введённой для стабилизации параметров и расширения динамического диапазона. При разомкнутой обратной связи на катушку можно подавать периодические сигналы и искусственно вызывать поток жидкости через ячейку, имитируя вариации внешнего давления. При известной передаточной характеристике каскада обратной связи указанный способ может быть использован для самокалибровки гидрофона в любых условиях, в том числе полевых. Экспериментально было показано, что частотная зависимость коэффициента преобразования чувствительной ячейки гидрофона, снятая с помощью самокалибровки катушкой обратной связи, соответствует стандартной калибровке давлением (рис. 2). Показанное соответствие существенно упрощает процесс настройки и проверки характеристик чувствительных элементов, особенно в полевых условиях. В рамках исследования удалось получить образцы МЭП гидрофонов с чувствительностью не менее 0,75 мВ/Па, в полосе частот от 0,02 до 200 Гц, с неравномерностью характеристики не более 0,5 дБ в полосе (рис. 3).

Экспериментальное исследование собственных шумов выполнено методом корреляционного анализа в соответствии с методикой, подробно описанной в [15]. Для этого использовались два идентичных близкорасположенных МЭП-гидрофона. На рис. 4 представлены спектральные плотности

мощности участка ночной записи двух молекулярно-электронных гидрофонов (кривые 1, 2); кривая 3 – собственный шум АЦП, фиолетовый некоррелированная часть спектральной плотности, имеющая смысл уровня собственного шума гидрофона.

Таким образом, результаты, представленные в настоящем исследовании, описывают принцип действия МЭП-гидрофона и демонстрируют прототип широкополосного устройства с чувствительностью 0,75 мВ/Па в полосе не менее 0,02–200 Гц.

Настоящее исследование выполнено в Московском физико-техническом институте при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.578.21.0243.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wenz G. M. Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources // J. Acoust. Soc. Amer. 1962. V. 34. № 12, P. 1936–19556
2. Пат. США №4178577, кл. 367-159 (H04B 13/00), 1979
3. Liu D., Liang Y., Jin L., Sun H., Cheng L., Guang B.-O. Highly Sensitive Fiber Laser Ultrasound Hydrophones for Sensing and Imaging Applications // Optics Lett. 2016. V. 41, № 19.
4. Shen B., Wada Y., Koyama D., Isago R., Mizuno Y., Nakamura K. Fiber-Optic Ultrasonic Probe Based on Refractive-Index Modulation in Water, in: SPIE7753 21st Intern.Con. on Optical Fiber Sensors. Ottawa, 2011, P.77539W.
5. Tan Y, Zhang Y., Guan B. Hydrostatic Pressure Insensitive Dual Polarization Fiber Grating Laser Hydrophone // IEEE Sens. J. 2011. V. 11, № 5, P. 1169–1172.
6. Kim K. S., Mizuno Y., Nakamura K. Fiber-Optic Ultrasonic Hydrophone Using Short Fabry-Perot Cavity with Multilayer 5 Reflectors Deposited on Small stub // Ultrasonics. 2014. V. 54, № 4, P. 1047–1051.
7. Ma J., Zhao M., Huang X., Chen H. B. Y., Yu M. Low Cost, High Performance White-Light Fiberoptic Hydrophone System with a Trackable Working Point // Opt. Express. 2016. V. 24. №17. 19008.
8. Deng T., Chen D., Chen J., Sun Z., Wang J. Microelectromechanical Systems-Based Electrochemical Seismic Sensors With Insulating Spacers Integrated Electrodes for Planetary Exploration // IEEE Sensors J. 2016. V. 16, № 3.

9. *Levchenko D.G., Kuzin I.P., Safonov M.V., Sychikov V.N., Ulomov I.V., Kholopov B.V.* Experience in seismic signal recording using broadband electrochemical seismic sensors // *Seism. Instruments.* 2010, V. 46, № 3, P. 250–264.
10. *Zaitsev D., Antonov A., Krishtop V.* Angular MET sensor for precise azimuth determination. Proc. Vol. 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016;102241H. Doi: 10.1117/12.2267073
11. *Antonovskaya G.N., Kapustian N.K., Moshkunov A. I., Danilov A. V., Moshkunov K.A.* New Seismic Array Solution for Earthquake Observations and Hydropower Plant Health Monitoring // *J. Seismol.* 2017. V.21: 1039. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9650-8>
12. *Lidorenko N. S., Ilin B.I., Zaidenman I.A., Sobol V.V., Shchigorev I.G.* An Introduction to Molecular Electronics. M. Energoatomizdat, 1984. 320 p.
13. *Agafonov V.M., Neeshpapa A.N., Shabalina A.S.* Electrochemical seismometers of linear and angular motion. in: *Encyclopedia of Earthquake Engineering.* B.: Springer-Verlag, 2015. P. 944–961.
14. *Shabalina A. S. et al.* Modern Measuring Instruments Based on Molecular Electronic Transducers // *Achievements Modern Radioelectron.* 2014. V. 9. P. 4–33. [Online]. Available: <http://www.radiotec.ru/catalog.php?cat=jr4&art=15249>
15. *Zaitsev D. L., Agafonov V., Egorov E., Antonov A., Shabalina A.* Molecular Electronic Angular Motion Transducer Broad Band Self-Noise // *Sensors.* 2015. V. 15. №11. P. 29378–29392.