

## Введение

Датчики являются ключевыми компонентами сейсморазведочных систем. В частности, гидрофоны используются в составе буксируемых кос и станций океанского дна. Широкополосное сейсмическое получение данных требует высокочувствительных гидрофонов с расширенной в сторону низких частот полосой пропускания. Между тем, пьезоэлектрические, электрострикционные, магнестрикционные и электростатические датчики не очень подходят для работы на низких частотах.

Альтернативный способ построения низкочастотного гидрофона может быть основан на технологии МЕТ (молекулярно-электронной передачи). Это научно-техническая концепция, которая за последние 10 лет привела к появлению ряда высокочувствительных датчиков. Разработанные устройства используются в сейсмологии (Deng et al, 2016, Levchenko et al, 2010), структурном мониторинге (например, Антоновская и др., 2017), навигации и управлении движением (Зайцев и др., 2016).

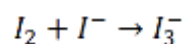
В настоящем документе сообщается о разработке гидрофона МЕТ (МЕТН), предназначенного для работы в широком диапазоне частот (0,1 – 100 Гц) и обеспечивающего очень высокую чувствительность и низкий уровень шума. Как и другие мет-устройства, принципы работы основаны на отклонениях электрического тока, проходящего через сигнал, покрывающий молекулярно-электронную передаточную (электрохимическую) ячейку. Кроме того, Силсбалансированный дизайн обратной связи был приложен для того чтобы достигнуть широкого динамического диапазона и лучшей стабильности ответа.

Результаты работы представлены в двух частях. В первой части обсуждаются принципы работы датчика акустического давления на основе технологии молекулярно-электронного переноса. Вторая часть посвящена экспериментальным исследованиям параметров мет. Наконец, приводятся выводы.

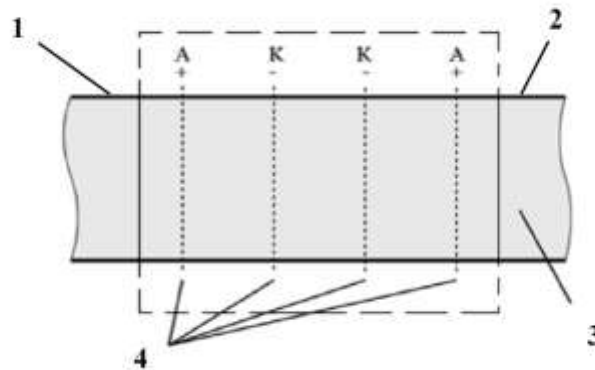
## Что такое МЕТ гидрофон?

Основы технологии и физические принципы работы датчиков МЕТ подробно анализируются в периодических изданиях (Huang et al, 2013, Agafonov et al, 2013).

Основным элементом мет является трансформирующая электродная ячейка, помещенная в концентрированный раствор электролита, рис. 1. Состав раствора подбирается таким образом, чтобы на электродах протекала обратимая электрохимическая реакция окисления-восстановления. Для этих целей чаще всего используется так называемый йодистый электролит. Примером такого электролита является концентрированный (~4 м/л) водный раствор KI с добавлением относительно небольшого количества молекулярного йода I<sub>2</sub>. В растворе происходит почти полная диссоциация KI на отрицательно заряженные ионы I<sup>-</sup> и положительные ионы K<sup>+</sup>, а молекулярный йод реагирует с I<sup>-</sup> ионами с образованием трийодида:

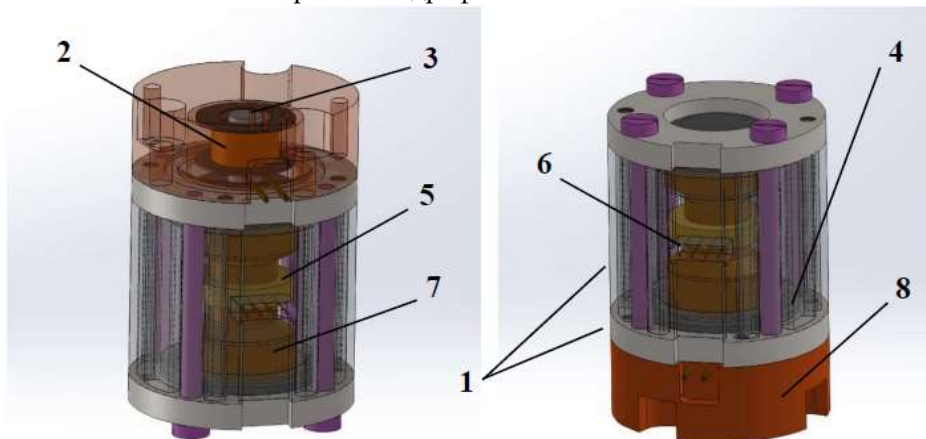


Ионы трийодида ответственны за прохождение электрического тока через поверхность электродов. При высокой концентрации KI поток трийодид-ионов полностью определяется диффузией. При наличии гидродинамических потоков в диффузионный поток добавляется конвективный транспорт, что приводит, в зависимости от направления потока жидкости, к увеличению или уменьшению межэлектродного тока. Вариации электрического тока, обусловленные гидродинамическими потоками, являются выходными сигналами преобразовательной ячейки мет.



**Рис. 1. Трансформирующая электродная ячейка (мет). 1-канальные стенки; 2 – электрический пакет; 3 – электролит; 4 – сетчатые электроды (внешние аноды а, внутренние катоды к).**

Конструкция и основные принципы работы короткозамкнутого молекулярного электронного гидрофона (мет) показаны на рис. 2. Преобразовательная ячейка сигнала помещается в канал, ограниченный резиновыми мембранами (4) и заполненный электролитом (7). (1) Внешний корпус датчика. К одной из резиновых мембран приклеен неодимовый магнит (3), который может свободно перемещаться внутри катушки (2). Катушка (2) жестко прикреплена к верхней крышке (8), так что под действием силы Лоуренса магнит может перемещаться внутри нее. Такая простая схема позволяет ввести в механическую систему замкнутый контур обратной связи, а также позволяет откалибровать гидрофон.



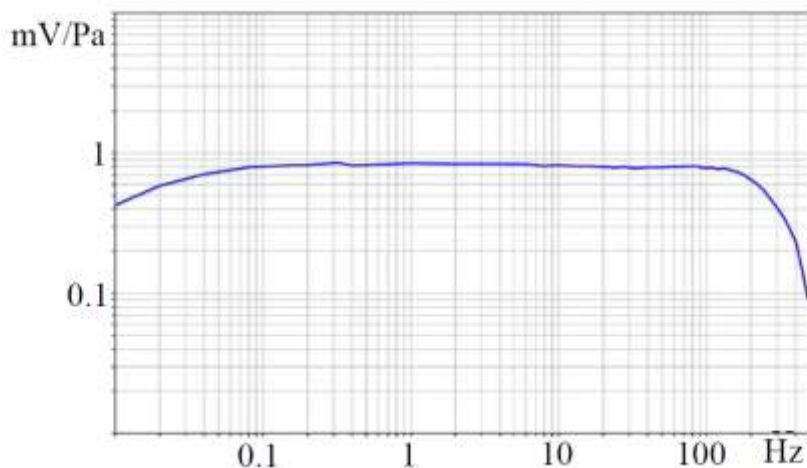
**Рис. 2. Конструкция гидрофона мет. 1-Внешний корпус; 2 - катушка; 3 - Магнит; 4 - мембраны; 5 - электрический пакет; 6 - электрические клеммы анодов и катодов; 7 - электролит; 8 – крышка с воздушным пузырем под ней**

Гидрофоны работают следующим образом. Если давление изменено в жидкости контактирующей с открытой мембраной МЕТН, то оно производит жидкостную подачу внутри канала, таким образом производя изменения течения электрода. Выходной ток обусловлен специальным электронным фильтром. Фильтр конструирован для того чтобы сформировать датчики вывел наружу максимум в середине ряда рабочей частоты и уменьшил dB в октаву как на низких, так и на более высоких частотах выключения. Такое частотное поведение необходимо для поддержания стабильности контура обратной связи. Выход фильтра приложен к водителю, обеспечивая течение обратной связи в катушку. И наконец, обратной связи тока, подаваемого к катушке вызывает появление электромагнитного поля в соленоиде, который взаимодействует с магнитом 3, и через жесткое соединение с мембраной создается противодействующая сила, которая уравнивает перепад давлений, вызванных внешними

акустическими воздействиями на корпус датчика. В конце выходной сигнал обрабатывается аналоговым фильтром Wfilter, обеспечивающим необходимую рабочую полосу частот.

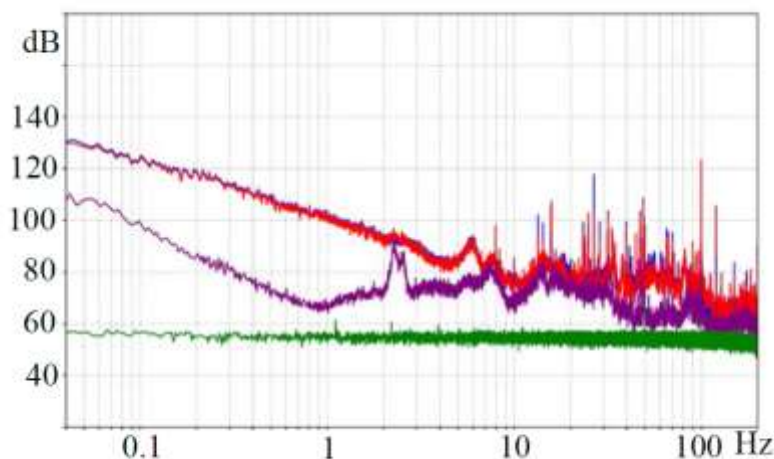
### Мет экспериментальная частотная характеристика и шум

Амплитудная и фазовая частотная характеристика мет замкнутого контура измерялась путем подачи калибровочного тока в катушку обратной связи (2). Экспериментальная частотная характеристика мет с замкнутой обратной связью показана на рис. 3. Абсолютное значение чувствительности мет измерялось путем прямого сравнения с эталонным гидрофоном, а его абсолютное значение составляло 0,8 МВ / па.



**Рис. 3. Частота откликов обратной связи короткозамкнутого витка МЕТН. Гц-по оси X, МВ / ПА – по оси Y.**

Для экспериментальных измерений шума были взяты два одинаковых гидрофона. Гидрофоны помещались близко друг к другу в металлический контейнер с толстыми стенками, заполненными водой, и этот контейнер покрывался пеной для уменьшения влияния температурных колебаний. Сигналы регистрировались в течение нескольких ночных часов с помощью 24-разрядной системы сбора данных НДСС-8226 ([http://www.r-sensors.ru/11\\_digitizers.shtml](http://www.r-sensors.ru/11_digitizers.shtml)). Спектральные плотности мощности сигналов показаны на рисунке 4 (красная и синяя кривые). Для дальнейшего анализа был использован самый тихий период ночной записи. По методу (Егоров и др., 2017) рассчитана некоррелированная часть сигналов ночного периода наблюдаемого прибора (фиолетовая кривая). Для справки, уровень собственного шума спектральная плотность мощности системы сбора данных показан зеленой



линией.

**Рис.4. Ночной тест. Красный, синий - PSD близкого METHs, зеленый – ADC self noise, фиолетовый-некоррелированная часть, соответствующая шуму. Ось Hz-X, dB (re 1  $\mu\text{Pa}$ ) - ось Y**

## Заключение

Результаты, представленные в этом исследовании, показывают, что можно построить мет-гидрофон с очень широкой рабочей полосой частот. Частотная характеристика плоская в диапазоне 0.02 – 200 Гц в пределах точности 3 дБ, а чувствительность-0.8 МВ / па . Конструкция проста и не требует каких-либо прецизионных деталей.

## Acknowledgments

This work was supported by the Russian Ministry of Education and Science. Project ID RFMEFI57817X0243.

## References

- Agafonov, V. M., Egorov, I. V. and Shabalina, A. S. [2013] Operating principles and specifications of small-size molecular electronic seismic sensor with negative feedback. *Seismic Instrum.*, vol. 49, no. 1, pp. 5–19
- Antonovskaya, G. N., Kapustian, N. K., Moshkunov, A. I., Danilov, A. V. and Moshkunov K. A. [2017] New seismic array solution for earthquake observations and hydropower plant health monitoring. *J Seismol*, 21: 1039. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9650-8>
- Deng, T., Chen, D., Chen, J., Sun, Z. and Wang, J. [2016] Microelectromechanical Systems-Based Electrochemical Seismic Sensors With Insulating Spacers Integrated Electrodes for Planetary Exploration. *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 16, NO. 3, FEBRUARY 1, 2016.
- Egorov, I. V., Shabalina, A. S. and Agafonov, V. M. [2017] Design and Self-Noise of MET Closed-Loop Seismic Accelerometers. *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 17, NO. 7, APRIL 1, 2017.
- Huang, H., Liang, M., Tang, R., Oiler, J. and Yu., H. [2013] Molecular Electronic Transducer-Based Low-Frequency Accelerometer Fabricated With Post-CMOS Compatible Process Using Droplet as Sensing Body. *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, VOL. 34, NO. 10, OCTOBER 2013, p. 1304-1306
- Zaitsev, D.L., Agafonov, V.M., Egorov, E.V., Antonov, A.N. and Krishtop, V.G. [2016] Precession azimuth sensing with low-noise molecular electronics angular sensors. *J. Sensors*, vol. 2016, Art. no. 6148019.