

## ИНФРАЗВУКОВОЙ ГИДРОФОН

© 2019 г. Е. В. Романенко\*

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН  
Россия, 119071, Москва, Ленинский просп., 33

\*e-mail: evromanenko33@mail.ru

Поступила в редакцию 01.03.2019 г.

После доработки 01.03.2019 г.

Принята к публикации 14.03.2019 г.

Разработан инфразвуковой гидрофон, работающий на пироэлектрическом принципе. Чувствительный элемент гидрофона выполнен в форме тонкой пластинки (пироэлемент), окруженной воздушной средой. Изменения давления в воздушной среде сопровождаются изменениями температуры, которые и воспринимаются пироэлементом.

DOI: 10.1134/S0032816219050100

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует ряд низкочастотных гидрофонов, основным недостатком которых — ограниченный снизу диапазон рабочих частот. Работа таких гидрофонов основана на пьезоэлектрическом принципе, и обычно они предназначены для работы в диапазоне частот выше 0.1 Гц. В качестве примера можно привести гидрофоны фирмы ZETLAB (типа ВС311 и др.), рабочий диапазон которых начинается с 3 Гц. Даже наиболее низкочастотные гидрофоны фирмы Vguel and Kjaer, Дания (типа 8101–8106) имеют частотный диапазон, начинающийся с 0.1 Гц. Однако в некоторых случаях необходимы гидрофоны с рабочим диапазоном частот существенно ниже 0.1 Гц, например, при изучении шумов Земли и океана [1, 2], а также шумности плавниковых движителей, землетрясений и явления “цунами”.

В статье представлен инфразвуковой гидрофон с рабочим диапазоном частот порядка сотых и тысячных долей герца. Работа гидрофона основана на использовании пироэлектрического эффекта [3, 4].

Обычно пироэффект используют для измерения малых изменений температуры. Однако его также можно использовать и для измерения звукового давления, если вспомнить, что звуковые волны сопровождаются не только изменениями давления, плотности и скорости частиц среды, но и изменениями температуры  $\Delta T$ , которые связаны с параметрами среды и звуковой волны следующим соотношением [5].

$$\Delta T = \frac{\beta T_0}{\rho C_p} \Delta P, \quad (1)$$

где  $\beta$  — коэффициент объемного расширения среды, в которой распространяется звук;  $T_0$  — средняя температура;  $\rho$  — плотность;  $C_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $\Delta P$  — колебательное давление в звуковой волне.

Оценка по формуле (1) показывает, что температурные изменения при распространении звука в воздухе на 4–5 порядков больше, чем при распространении в воде. Поэтому наилучший эффект может быть достигнут при использовании пироэлемента для измерения звуковых полей в воздухе. Тем не менее, этот принцип может быть использован и для измерений в воде, если обеспечить газовое (воздушное) окружение пироэлемента.

### ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ИНФРАЗВУКОВОГО ГИДРОФОНА

На рис. 1 показана принципиальная схема инфразвукового гидрофона на пироэлектрическом принципе при его работе в воде.

Гидрофон состоит из заполненной воздухом полости (резервуара) 1, имеющей в нижней своей части открытую снизу трубу 2, пироэлектрического элемента 3, усилительного 4 и регистрирующего 5 устройств. Усилительное устройство должно иметь входное сопротивление порядка  $10^9$ – $10^{10}$  Ом.

Гидрофон работает следующим образом. При его погружении в воду последняя проникает внутрь резервуара через нижнее отверстие трубы, заполняя трубу и часть резервуара. Остальная часть резервуара, где находится пироэлемент, остается заполненной воздухом. Переменное давление инфразвуковой частоты через трубу передается от окружаю-

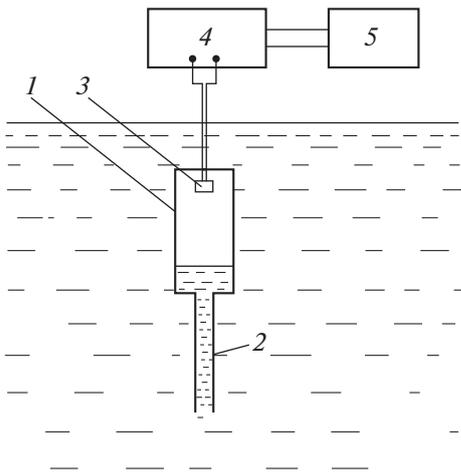


Рис. 1. Схема гидрофона. 1 – резервуар; 2 – труба; 3 – пирозэлемент; 4 – усилитель; 5 – регистрирующее устройство.

щей среды объему воздуха в резервуаре, который адиабатически сжимается и расширяется. Изменения температуры воздуха, имеющие место в этом случае, регистрируются пирозэлементом и, далее, измерительной аппаратурой.

Адиабатичность процесса сжатия и расширения воздуха в резервуаре гидрофона в заданном диапазоне частот обеспечивается выбором подходящих размеров резервуара.

Труба гидрофона предназначена для обеспечения резонансного режима работы системы “вода–воздух” в гидрофоне. В этом случае резервуар и труба представляют собой резонатор Гельмгольца, в котором в качестве упругости выступает воздух в резервуаре, а в качестве массы – вода в трубе. В случае цилиндрической формы резервуара собственная частота резонатора может быть оценена по формуле

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma S_1 P_0}{\rho_1 l_1 S_2 l_2}}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты, равный 1.41;  $\rho_1$  – плотность воды;  $l_1$  – длина трубы;  $l_2$  – длина резервуара;  $S_1$  и  $S_2$  – площадь поперечного сечения трубы и резервуара соответственно;  $P_0$  – начальное давление в резервуаре.

Подбором размера резервуара и трубы можно приблизить резонансную частоту гидрофона к рабочему диапазону частот и тем самым в известных пределах улучшить его частотную характеристику.

В принципе гидрофон может с тем же успехом работать и без трубы. В этом случае он все же будет обладать резонансными свойствами, однако в качестве трубы будет служить заполненная водой часть резервуара. Резонансная частота в этом случае будет выше, чем определяемая формулой (2).

Чувствительность гидрофона в режиме холостого хода можно оценить как отношение изменения потенциала на обкладках пирозэлемента к изменению давления по формуле (в международной системе единиц СИ)

$$\frac{\Delta V}{\Delta P} [\text{В/Па}] = \frac{4\pi h \beta T_0 \gamma_0 \cdot 10^{10}}{\varepsilon \rho C_p} \frac{m}{\sqrt{m^2 + \omega^2}}, \quad (3)$$

$$\text{где } m = \frac{\alpha S}{\rho_{\text{пиро}} V_{\text{пиро}} C_{p\text{пиро}}}.$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи, равный для спокойного воздуха 2–8 ккал/(м<sup>2</sup>·с·град),  $\rho_{\text{пиро}}$ ,  $C_{p\text{пиро}}$ ,  $S$  и  $V_{\text{пиро}}$  – соответственно плотность, удельная теплоемкость, поверхность и объем пирозэлемента;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость пирозэлемента;  $h$  – его толщина;  $\gamma_0$  – пироконстанта,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота.

В частности, если пирозэлемент выполнен из пьезокерамики на основе титаната бария ( $\text{BaTiO}_3$ ), пироконстанта  $\gamma_0 = -2 \cdot 10^{-4}$  кулон/(м<sup>2</sup>·град), диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon \approx 1200$ .

Формула (3) получена на основе соотношения (1) и известных соотношений для изменения потенциала

$$\Delta V = \frac{\Delta Q}{C_0}, \quad (4)$$

электрического заряда

$$\Delta Q = S \gamma_0 \Delta T \quad (5)$$

и электрической емкости плоского конденсатора

$$C_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{h} = \frac{\varepsilon S \cdot 10^7}{4\pi h c^2}. \quad (6)$$

В приведенных формулах  $S$ , м<sup>2</sup> – площадь обкладки конденсатора;  $\gamma_0$  – пироконстанта;  $c$  – скорость света в вакууме, близкая к  $3 \cdot 10^8$  м/с;  $\beta = 0.0037$  К<sup>-1</sup> – коэффициент объемного расширения воздуха;  $\rho = 1.29$  кг/м<sup>3</sup> – весовая плотность воздуха;  $C_p = 1005$  Дж/(кг·град) – удельная теплоемкость воздуха;  $C_{p\text{пиро}} = 800$ – $900$  Дж/(кг·град) – удельная теплоемкость пирозэлемента из титаната бария;  $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi c^2} \cdot 10^7 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная.

Описанный гидрофон имеет два ценных качества: достаточно высокую чувствительность и практически неограниченную глубину погружения. Второе качество объясняется тем, что при увеличении глубины погружения гидрофона вода будет проникать через трубу и сжимать воздух в резервуаре. Можно так рассчитать форму и размер резервуара и трубы, что при достаточно большой глубине погружения гидрофона пирозэлемент все время будет оставаться в воздушной сре-

де. А поскольку пирозлемент можно выбрать в форме тонкой плоской пластинки, большие давления практически не будут сказываться на ее работоспособности.

### ГРАДУИРОВКА ГИДРОФОНА

Градуировку инфразвукового гидрофона проще всего осуществить гидростатическим методом, который не требует применения излучателей звуковой энергии и может проводиться в отсутствие звукового поля. Этот метод может быть применен не только в лабораторных условиях, но и в полевых. Суть метода состоит в том, что градуируемый гидрофон погружают в воду на некоторую глубину и изменяют глубину погружения по определенному закону. Наиболее интересны два варианта:

1) глубину погружения изменяют на небольшую величину по гармоническому закону;

2) глубину погружения изменяют по линейному закону.

Изменения гидростатического давления в первом случае эквивалентны изменению инфразвукового давления, если частота изменений достаточно низка. Величина же изменений гидростатического давления очень просто определяется: каждый сантиметр изменения глубины погружения приводит к изменению гидростатического давления на 100 Па (с достаточной точностью).

Во втором случае чувствительность гидрофона определяется следующим соотношением [6]:

$$\frac{\Delta V}{\Delta P} = \frac{K}{(C + C_x)} \frac{\omega}{\sqrt{\{1/[R(C + C_x)]\}^2 + \omega^2}}. \quad (7)$$

Здесь  $K$  – константа гидрофона, которая должна быть предварительно определена в эксперименте;  $C + C_x$  – сумма электрических емкостей чувствительного элемента и входа измерительной схемы, к которой подключен чувствительный элемент;  $R$  – сопротивление нагрузки чувствительного элемента (входное сопротивление усилителя). Второй множитель в формуле (7) определяет частотную зависимость чувствительного элемента в области низких частот.

Эксперимент по определению константы  $K$  состоит в следующем. Гидрофон, погруженный в

воду, поднимают (или опускают) с постоянной скоростью. При этом на выходе гидрофона появляется электрический потенциал  $U$  постоянной величины, который усиливается усилителем постоянного тока и измеряется измерительным прибором. Тогда константа  $K$  вычисляется по формуле

$$K = \frac{U}{Rr}, \quad (8)$$

где  $r$  – скорость подъема (или опускания) гидрофона.

Здесь необходимо сделать одно уточнение. Формула (3) представляет собой чувствительность гидрофона, обусловленную только пирозлектрическим эффектом, так как в нее входит только пироконстанта  $\gamma_0$  (пьезоэлектрические свойства пирозлемента не учитываются). Формула (7) учитывает оба эффекта – пирозлектрический и пьезоэлектрический [6]. Но так как пирозлектрический эффект в воздушной среде на несколько порядков больше пьезоэлектрического, то в первом приближении последним можно пренебречь.

Действующая модель описанного гидрофона была успешно испытана в условиях открытого моря. В качестве пирозлемента использованы четыре пластинки из пьезокерамики титаната бария толщиной 0.1 мм, соединенные последовательно (для повышения чувствительности). Площадь каждой пластинки около 20 мм<sup>2</sup>, полная емкость датчика (пирозлемента) около 550 пФ. При этом была достигнута чувствительность порядка 100 В/Па.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Островский А.А.* // Океанология. 1982. Т. 22. № 6. С. 980.
2. *Фурдуев А.В.* // Акустика океана. М.: Наука, 1977. С. 615–691.
3. *Богуславская С.Н., Романенко Е.В., Холод Л.И.* // Акустический журнал. 1971. Т. 17. Вып. 2. С. 210.
4. *Романенко Е.В.* Физические основы биоакустики. М.: Наука, 1974.
5. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика сплошных сред. М.: ГТТИ, 1944.
6. *Raymond F.W.* // JASA. 1963. V. 35. № 1. P. 69.