

## **ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ КАНАЛ, СОДЕРЖАЩИЙ СФЕРИЧЕСКИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

### **Введение**

Развивающийся рынок подводных технологий требует наличия специализированных средств связи для размещения их на оборудовании находящемся под водой, для решения широкого класса задач по обмену данными с роботизированными подводными аппаратами, донными и дрейфующими океанографическими приборами, другим подводным оборудованием, которое требует дистанционного управления и являющегося источником или получателем информации. Так, например, такие средства связи используются для приведения в действие акустических размыкателей или переключения режимов работы подводного оборудования, которое применяется в нефтедобывающей промышленности в цепях дистанционного контроля и управления запорной аппаратурой трубопроводов [1]. Кроме этого, цифровые гидроакустические средства связи применяются при ведении под водой строительных, ремонтных и аварийно-спасательных работ. Первые упоминания о работах по цифровой гидроакустической связи появились в начале 80-х годов [2, 3]. Наибольшее распространение получили системы связи с амплитудной и фазовой манипуляцией, в которых значение цифрового сигнала задавалось разностью между текущим и предыдущим сигналом [4]. Отметим работы по данной тематике, вышедшие за последнее время [5, 6]. Подробный анализ и обобщение результатов, полученных в области цифровой гидроакустической связи на протяжении трех десятилетий, содержится в работе [7]. В состав такой аппаратуры связи в обязательном порядке входят пьезоэлектрические преобразователи. Один из преобразователей (излучатель) возбуждается нестационарным электрическим сигналом. Второй преобразователь является гидроакустическим приемником, который регистрирует возмущения, возникающие в жидкости. В прикладной гидроакустике указанный набор преобразователей, находящихся в жидкости, принято называть гидроакустическим информационным каналом, позволяющим с помощью этих преобразователей передавать через акустическую среду сообщения от одного из них к другому.

Типичная структурная схема тракта передачи речевой информации цифровой аппаратурой подводной связи приведена на рис. 1.

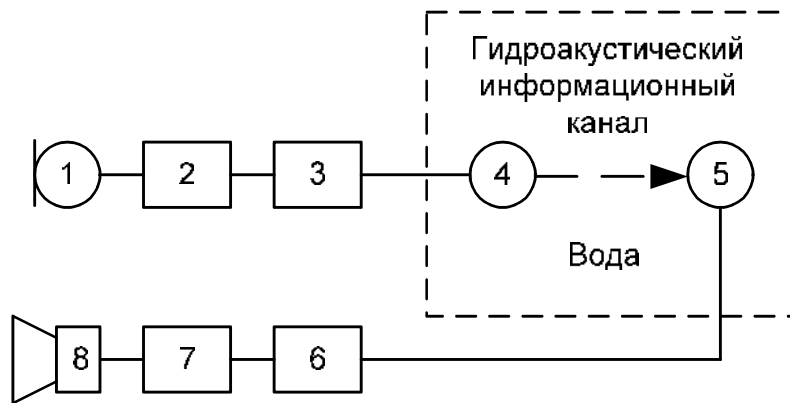


Рис. 1. Структурная схема тракта передачи речевой информации

- 1, 8 - микрофон и динамик, соответственно;  
 2 – блок оцифровывания речевой информации, который преобразовывает аналоговый сигнал в цифровой;  
 3, 6 – блоки компрессии и декомпрессии, соответственно, устанавливающие длительность и частоту следования дискретных сигналов, также они выполняют функцию согласования с входными (выходными) сопротивлениями излучателя (приемника);  
 4, 5 – излучатель и приемник, соответственно;  
 7 – блок, который переводит дискретный сигнал в аналоговый.

В данной работе в качестве преобразователей гидроакустического канала выбраны преобразователи сферической формы. Следует отметить, что моделирование гидроакустического информационного канала, построенного на пьезоэлектрических преобразователях цилиндрической формы, выполнено в работе [8]. Аналогичная задача для сферических пьезоэлектрических преобразователей ранее не рассматривалась.

Целью настоящей работы является математическая постановка и решение задачи излучения и приема акустических импульсов сферическими пьезокерамическими преобразователями.

### **Математическая постановка задачи**

Предполагается, что в безграничном пространстве жидкости на достаточно большом удалении друг от друга размещены два пустотелых сферических пьезоэлектрических преобразователя (излучатель и приемник), на таком расстоянии, что акустическим взаимодействием между ними можно пренебречь. Кроме этого, считается, что кривизна фронта акустической волны, которая набегаёт на приемник, настолько мала, что волну можно считать плоской. Преобразователи выполнены из пьезокерамики одного состава, поляризованы в радиальном направлении,

металлические электроды сплошные и полностью покрывают их наружную и внутреннюю поверхности.

На электроды излучателя подается электрический нестационарный сигнал

$$U_1(t) = Q(t)H(t), \quad (1)$$

где  $Q(t)$  – функция, которая описывает конфигурацию этого сигнала;

$H(t)$  – функция Хевисайда.

Пьезоэлектрические преобразователи представляют собой тонкостенные конструкции, динамическое поведение которых записывается в рамках линейной теории электроупругих оболочек с привлечением гипотез Кирхгофа-Лява [9].

Для описания возникающих в жидкости возмущений используются соотношения акустической модели [10].

Постановка и решение задачи выполнены в сферической системе координат. Причем, для приемника сферическая система координат выбирается таким образом, что фронт падающей волны перпендикулярен оси  $z$  ( $z = r \cdot \cos\theta$ ) (рис. 2). Приняты следующие обозначения:  $r$  – радиальная координата;  $\theta$  – угловая координата;  $p_1$  – акустическое давление в жидкости;  $c$  – скорость звука в жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости;  $R_2$ ,  $h_2$  – радиус серединной поверхности оболочки приемника и ее толщина;  $U_2(t)$  – электрическая разность потенциалов на электродах приемника.

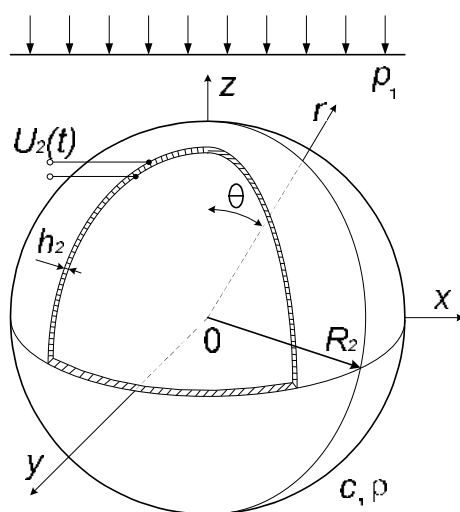


Рис. 2. Выбранная система координат для сферического приемника

В этом случае рассматриваемый динамический процесс в оболочке и окружающей среде – двумерный. В свою очередь, учитывая центрально-симметричное электрическое возбуждение излучателя, он будет совершать исключительно пульсирующие (одномерные) колебания. Для описания нестационарного поведения излучающего преобразователя, контактирующего с жидкостью, привлекаются:

– уравнение пульсирующих колебаний электроупругой оболочки [11]

$$-2 \left( 1 + \frac{C_{12}^E}{C_{11}^E} \right) w_1 + 2 \frac{e_{31} R_1}{C_{11}^E} E_r^{(1)} + \frac{R_1^2}{h_1 C_{11}^E} q_1 = \frac{R_1^2 \gamma \partial^2 w_1}{\partial t^2};$$

$$E_r^{(1)} = -\frac{Q(t)}{h_1}; \quad q_1 = -p_1|_{r=R_1};$$
(2)

– уравнение движения жидкости, записанное относительно волнового потенциала  $\phi_1$  [10]

$$\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \phi_1}{\partial r} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial t^2},$$
(3)

который связан с акустическим давлением равенством

$$p_1 = -\rho \frac{\partial \phi_1}{\partial t},$$
(4)

где  $C_{11}^E$ ,  $C_{12}^E$ ,  $e_{31}$  – модули упругости и пьезомодуль керамики, соответственно;  $w_1$  – нормальное перемещение (прогиб) оболочки;  $R_1$ ,  $h_1$  – радиус срединной поверхности оболочки излучателя и ее толщина;  $E_r^{(1)}$  – электрическая напряженность керамики;  $q_1$  – гидродинамическая нагрузка действующая на оболочку;  $\gamma$  – плотность керамики;  $t$  – время;  $\phi_1$  – волновой потенциал излученной волны.

– граничное условие, которое обеспечивает безотрывный контакт внешней поверхности излучателя с акустической средой

$$\left. \frac{\partial \phi_1}{\partial r} \right|_{r=R_1} = \frac{\partial w_1}{\partial t};$$
(5)

– условие затухания возмущений в среде

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \phi_1 = 0;$$
(6)

– нулевые начальные условия, которые предполагают состояние покоя среды и оболочки до возбуждения ее электрическим импульсом

$$\phi_1|_{t=0} = \frac{\partial \phi_1}{\partial t}|_{t=0} = w_1|_{t=0} = \frac{\partial w_1}{\partial t}|_{t=0} = 0. \quad (7)$$

Режим приема акустических импульсов пьезоэлектрической оболочкой описывается следующими соотношениями:

уравнениями движения оболочки, которые учитывают все формы ее колебаний (включая и изгибные) [12]

$$\begin{aligned} D_1 u_2 + D_2 w_2 &= \frac{e_{31} R_2}{C_{11}^E} \frac{\partial E_r^{(2)}}{\partial \theta} + \frac{R_2^2 \gamma}{C_{11}^E} \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2}; \\ D_3 u_2 + D_4 w_2 &= -2 \frac{e_{31} R_2}{C_{11}^E} E_r^{(2)} + \frac{R_2^2 \gamma}{C_{11}^E} \frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2} - \frac{R_2^2}{C_{11}^E h_2} q_2, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} D_1 &= (1 + \varepsilon) \left[ \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial}{\partial \theta} \operatorname{ctg} \theta - (\operatorname{ctg}^2 \theta + \xi) \right]; \\ D_2 &= -\varepsilon \left[ \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \operatorname{ctg} \theta - \frac{\partial}{\partial \theta} (\operatorname{ctg}^2 \theta + \xi) \right] + (1 + \xi) \frac{\partial}{\partial \theta}; \\ D_3 &= \varepsilon \left[ \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} + 2 \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \operatorname{ctg} \theta - \frac{\partial}{\partial \theta} (1 + \operatorname{ctg}^2 \theta + \xi) + (2 + \operatorname{ctg}^2 \theta - \xi) \operatorname{ctg} \theta \right] - \\ &\quad - (1 + \xi) \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} + \operatorname{ctg} \theta \right]; \\ D_4 &= -\varepsilon \left[ \frac{\partial^4}{\partial \theta^4} + 2 \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} \operatorname{ctg} \theta - \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (1 + \operatorname{ctg}^2 \theta + \xi) + (2 + \operatorname{ctg}^2 \theta - \xi) \frac{\partial}{\partial \theta} \operatorname{ctg} \theta \right] - \\ &\quad - 2(1 + \xi) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{h_2^2}{12 R_2^2}; \quad \xi = \frac{C_{12}^E}{C_{11}^E}; \quad E_r^{(2)} = -\frac{U_2}{h_2}; \quad q_2 = -p_2|_{r=R_2};$$

– уравнением относительно волнового потенциала  $\phi_2$ , которое описывает возмущения в жидкости [10]

$$\frac{\partial^2 \phi_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \phi_2}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial \phi_2}{\partial \theta} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial t^2}. \quad (10)$$

Акустическое давление  $p_2$  в жидкости связано с волновыми потенциалами падающей  $\phi_1$  и дифрагированной  $\phi_2$  волнами выражением

$$p_2 = -\rho \left[ \frac{\partial \phi_1}{\partial t} + \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \right]; \quad (11)$$

– условием затухания возмущений в среде на бесконечности

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \phi_2 = 0; \quad (12)$$

граничным условием, которое обеспечивает равенство нормальных составляющих колебательной скорости оболочки и колебательной скорости жидкости

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = \left[ \frac{\partial \phi_1}{\partial r} + \frac{\partial \phi_2}{\partial r} \right]_{r=R_2}; \quad (13)$$

– соотношением, учитывающим, что приемник подключен к электронному устройству с бесконечно большим входным электрическим сопротивлением. При выполнении этого условия ток смещения в керамике равен нулю [9]

$$I = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{2\pi} DR_2 d\theta = 0; \quad (14)$$

– нулевыми начальными условиями, в которых  $t=0$  соответствует времени, когда акустическая волна соприкасается с приемником

$$\phi_2|_{t=0} = \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \Big|_{t=0} = w_2|_{t=0} = \frac{\partial w_2}{\partial t} \Big|_{t=0} = u_2|_{t=0} = \frac{\partial u_2}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad (15)$$

где  $w_2$ ,  $u_2$  – нормальная и тангенциальная составляющая перемещений поверхности приемника;  $D$  – индукция керамики.

### Решение задачи

Выполненная постановка позволяет решать указанную задачу в два этапа. На первом этапе (излучение) определяется нестационарное давление в жидкости. Далее эти значения давления учитываются при решении задачи на втором этапе (прием).

Решение строится в области изображений с привлечением операционного преобразования Лапласа по времени. Раскладывая искомые величины по собственным формам колебаний оболочки (по полиномам Лежандра), удовлетворение граничных условий выполнено в области изображений с последующим переходом в область оригиналов. Для этого привлекается операция свертка, позволяющая свести рассматриваемый нестационарный процесс к интегральным уравнениям Вольтера второго рода. Решение этих уравнений и последующее нахождение искомым динамических характеристик системы осуществляется численно с привлечением квадратурных формул. Более подробно о разработанном

подходе к решению нестационарных задач гидроэластостатики сферических оболочек приведено в [11, 12].

Укажем формулы для расчета акустического давления  $p_1$  на поверхности излучателя при его нестационарном возбуждении и электрического напряжения  $U_2$ , снимаемого с электродов приемника. Следует отметить, что приведенные выражения записаны в безразмерном виде путем деления  $p_1$  на  $\gamma c^2$ ;  $U_2$  на  $\frac{d_{33}}{R_2}$ ;  $t$  на  $\frac{R_2}{c}$ ;  $R_i$ ,  $h_i$  на  $R_2$ ;  $E_r^{(i)}$  на  $d_{33}$  ( $i=1, 2$ ).

$$p_1(t) = -A(t) \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\rho}{\gamma}; \quad A(t) + \int_0^t A(t-x) F_0(x) dx - \frac{2\sqrt{2}e_{31}}{\sqrt{\pi}d_{33}\gamma c^2} \int_0^t E_r^{(1)}(t-x) dx = 0;$$

$$U_2(t) = -\frac{2e_{31}d_{33}}{h_2 R_2 \epsilon_{33}^s} \left( -\int_0^t A_1(t-x) F_1(x) dx - \int_0^t p_1(t-x) F_2(x) dx - \int_0^t p_1(t-2R_2-x) F_3(x) dx \right);$$

$$A_1(t) + \int_0^t A_1(t-x) F(x) dx = -\int_0^t p_1(t-x) \Phi_1(x) dx - \int_{2R_2}^t p_1(t-2R_2-x) \Phi_2(x) dx,$$

где

$$F_0(x) = \frac{\rho}{\gamma h_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{2(C_{11}^E + C_{12}^E)}{\gamma c^2 R_1^2} t + \frac{C_{11}^E + C_{12}^E}{\gamma c^2 R_1^3} t^2;$$

$$F_1(t) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} (1+t); \quad F_2(t) = \frac{t}{2} - \frac{t^2}{4};$$

$$F_3(t) = \frac{t}{2} + \frac{t^2}{4}; \quad \Phi_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[ 1 - \left( \frac{\rho}{\gamma h_2^2} + \frac{1}{R_2} \right) t + \frac{a}{2} t^2 - \frac{a}{6R_2} t \right];$$

$$F(t) = \left( \frac{\rho}{\gamma h_2^2} + \frac{1}{R_2} \right) + at + \frac{a}{2R_2} t^2;$$

$$\Phi_2(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[ 1 + \left( \frac{\rho}{\gamma h_2^2} + \frac{1}{R_2} \right) t + \frac{a}{2} t^2 + \frac{a}{6R_2} t \right];$$

$$a = 2 \frac{2 \frac{e_{31}^2}{\epsilon_{33}^s} + C_{11}^E + C_{12}^E}{\gamma c^2 R_2^2}.$$

## Численные результаты

На рис. 4–рис. 6 приведены результаты расчета, отнесенного к своим максимальным значениям электрического напряжения на приемнике

$U_{2omn}(t) = \frac{U_2(t)}{U_{max}}$  (сплошная кривая), а также давления на внешней

поверхности излучателя  $p_{1omn}(t) = \frac{p_1(t)}{p_{max}}$  (пунктирная кривая) при

возбуждении его нестационарным электрическим сигналом длительности  $\tau = 810$  мкс ( $U_{max}$  – максимальное значение электрического напряжения,

снимаемого с электродов приемника при  $R_2 = R_1$ ;  $p_{max}$  – максимальное значение акустического давления на внешней поверхности излучателя).

Электрический сигнал состоит из последовательности трех прямоугольных импульсов единичной амплитуды, длительность каждого из которых выбрана  $\tau_1 = 162$  мкс (рис. 3). Расстояние между этими импульсами  $\tau_2$

равно их длительности. Излучатель и приемник имеют относительные толщины  $\frac{h_i}{R_i} = 0,04$  ( $i = 1, 2$ ) и выполнены из пьезоэлектрической керамики

состава ЦТБС-3 [13]. Рис. 4 соответствует случаю, когда  $R_2 = R_1$ , рис. 5, когда  $R_2 = 5R_1$ , а рис. 6 – случаю, когда  $R_2 = 0,2R_1$ . На рис. 7, рис. 8

нанесены те же электроакустические характеристики (давление и электрическое напряжение) при  $R_2 = 0,2R_1$ . В этом случае подводимый к

излучателю электрический сигнал также представлял собой последовательный набор трех прямоугольных импульсов длительности  $\tau_1 = 52$  мкс (рис. 7) и длительности  $\tau_1 = 97$  мкс (рис. 8).

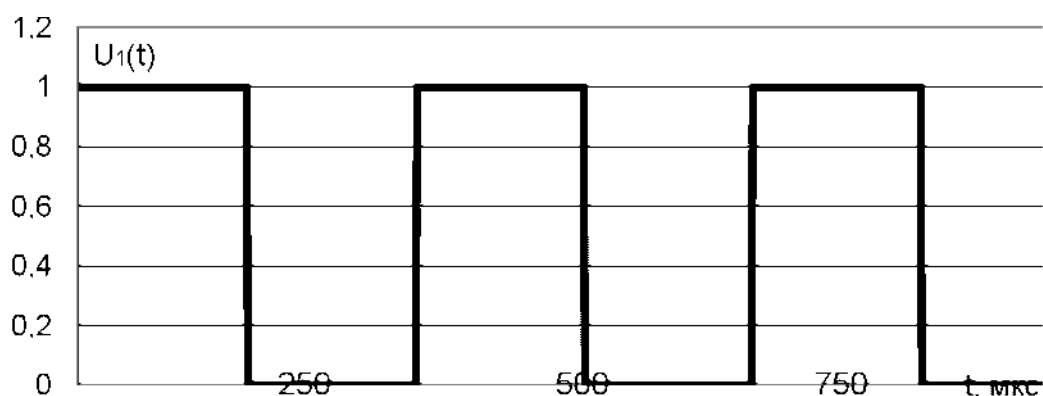


Рис. 3. Осциллограмма электрического нестационарного напряжения длительности  $\tau = 810$  мкс на излучателе ( $\tau_1 = \tau_2 = 162$  мкс)



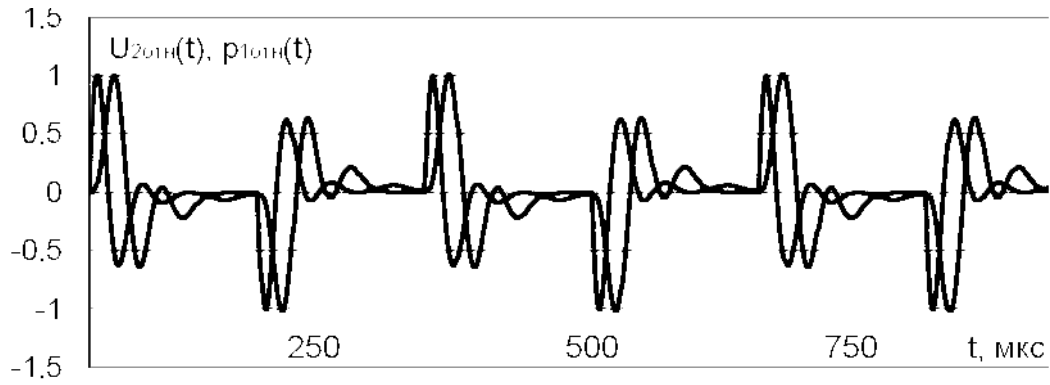


Рис. 4. Осциллограммы нормированного акустического давления на излучателе (пунктирная кривая) и нормированного электрического напряжения на приемнике (сплошная кривая) при  $R_2 = R_1$ ,  $\tau = 810$  мкс,  $\tau_1 = \tau_2 = 162$  мкс.

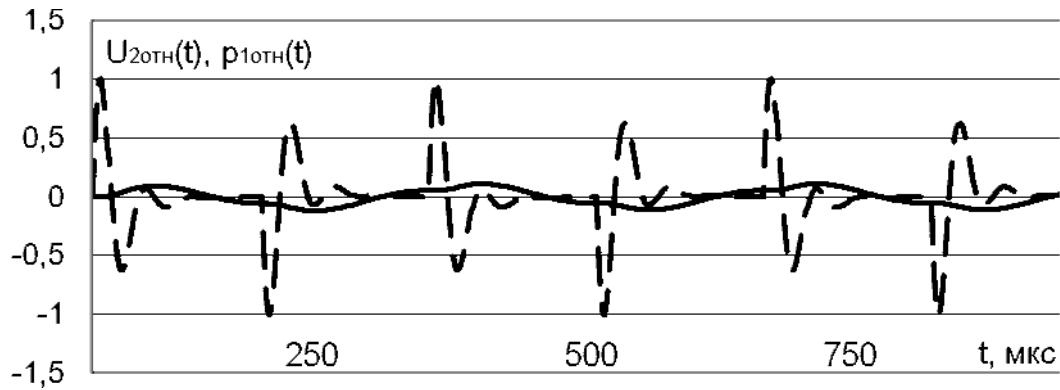


Рис. 5. Осциллограммы нормированного акустического давления на излучателе (пунктирная кривая) и нормированного электрического напряжения на приемнике (сплошная кривая) при  $R_2 = 5R_1$ ,  $\tau = 810$  мкс,  $\tau_1 = \tau_2 = 162$  мкс



Рис. 6. Осциллограммы нормированного акустического давления на излучателе (пунктирная кривая) и нормированного электрического

напряжения на приемнике (сплошная кривая) при  $R_2 = 0,2R_1$ ,  
 $\tau = 810$  мкс,  $\tau_1 = \tau_2 = 162$  мкс

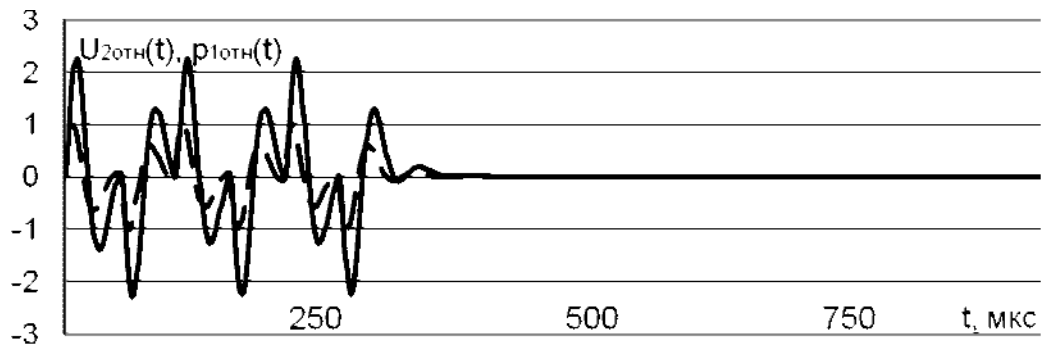


Рис. 7. Осциллограммы нормированного акустического давления на излучателе (пунктирная кривая) и нормированного электрического напряжения на приемнике (сплошная кривая) при  $R_2 = 0,2R_1$ ,  $\tau = 260$  мкс,  $\tau_1 = \tau_2 = 52$  мкс

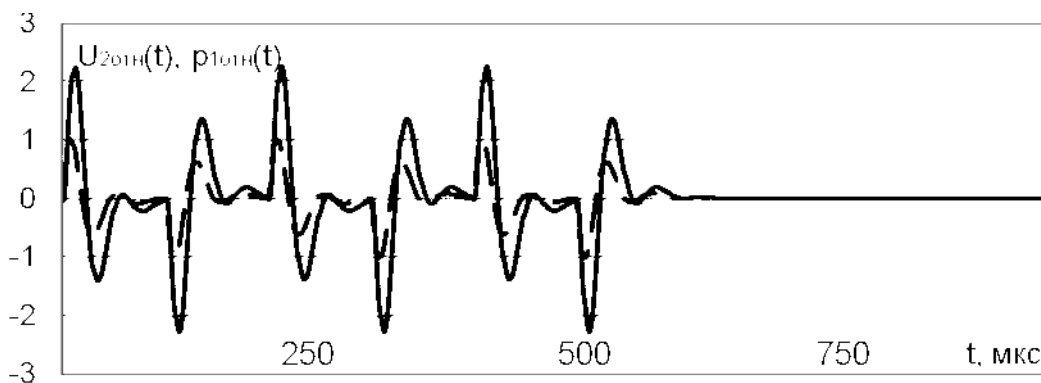


Рис. 8. Осциллограммы нормированного акустического давления на излучателе (пунктирная кривая) и нормированного электрического напряжения на приемнике (сплошная кривая) при  $R_2 = 0,2R_1$ ,  $\tau = 485$  мкс,  $\tau_1 = \tau_2 = 97$  мкс

Численное решение интегральных уравнений и отыскание искомых физических величин производилось путем разбиения временного интервала на равные отрезки. Варьируя длительностью временных отрезков, расчеты были проведены с контролируемой точностью (не хуже 2% в экстремальных точках). При выполнении расчетов для всех случаев шаг временного интервала составлял 0,01.

Расчеты показали, что чередующаяся последовательность переднего и заднего фронтов прямоугольных электрических импульсов вызывает в жидкости такую же последовательность акустических скачков давления (сжатия и разряжения). Осциллограмма возбуждающего электрического сигнала не совпадает с осциллограммами, как излученных акустических импульсов, так и электрических импульсов снимаемых с приемника. В

свою очередь следует отметить, что когда  $R_2 = R_1$  и  $R_2 = 0,2R_1$ , осциллограммы акустических и электрических импульсов на приемнике достаточно близки, однако за счет инерционности приемника имеет место некоторое затягивание переходных процессов в электрическом сигнале. В случае, когда  $R_2 = 5R_1$  инерционность приемника демпфирует эти скачки напряжений на осциллограмме снимаемого электрического сигнала.

При  $R_2 = 0,1R_1$  (этот график в работе не приведен) осциллограммы давления в жидкости и электрического напряжения на электродах приемника практически совпадают.

## Выводы

1. Выполнено математическое моделирование информационного гидроакустического канала, который содержит излучающий и принимающий акустические импульсы сферические пьезоэлектрические преобразователи.

2. Приведены выражения для расчета излучаемого акустического импульса и нестационарного электрического сигнала, снимаемого с электродов приемника.

3. Для выбранных параметров гидроэлектроупругой системы проведены численные исследования. Выбрав длительность и последовательность следования возбуждающих прямоугольных электрических импульсов равными 97 мкс (см. рис. 8), с помощью излучателя радиуса  $R_1 = 0,05$  м и приемника радиуса  $R_2 = 0,01$  м ( $R_2 = 0,2R_1$ ), можно обеспечить стандартный поток цифровых данных со скоростью 9,6 кбит/с.

4. Акустический информационный канал передачи нестационарных сигналов, построенный на двух сферических пьезоэлектрических преобразователях, можно использовать для передачи цифровой информации. Например, такой информацией может быть оцифрованная и сжатая стандартными электронными средствами человеческая речь (такие алгоритмы кодирования используются стандартом цифровой радиосвязи GSM Phase2+).

## Список использованной литературы

1. *Iarvis F. C.* Description of a secure reliable acoustic system for use offshore oil blowout preventer (BOP) or wellhead control // IEEE I. Ocean. Eng. – Piscataway, NJ, USA : IEEE Operations Center, 1984. – Vol. 9. – P. 253-258.
2. *Garrood D.* Applications of the MFSK Acoustic Communications System // D. Garrood. – IEEE Conference Proceedings Oceans, 1981 [Conference on the Ocean, an International Workplace], (Boston, Massachusetts, September

- 16-18, 1981). – Piscataway, NJ, USA : IEEE Operations Center, 1981. – P. 67-71.
3. *Baggeroer A., Koelsch D. E., Heydt K., Catipovic I.* DATS – a Digital Acoustic Telemetry System for Underwater Communications // IEEE Conference Proceedings Oceans, 1981 [Conference on the Ocean, an International Workplace], (Boston, Massachusetts, September 16-18, 1981). – Piscataway, NJ, USA : IEEE Operations Center, 1981. – P. 55-60.
  4. *Kilfoyle D. B., Baggeroer A. B.* The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry // IEEE I. Ocean. Eng. – Piscataway, NJ, USA : IEEE Operations Center, 2000. – Vol. 25, No. 1. – P. 4-27.
  5. *Chitre M., Shahabodeen S., Stojanovic M.* Underwater Acoustic Communications and Networking. Recent Advances and Future Challenges // Marine Technology Society Journal. – Sterrett Place, Columbia, USA: Marine Technology Society, 2008. – Vol. 42, No. 1. – P. 103-116.
  6. *Mani S.* Adaptive Modulations Techniques for Underwater Acoustic Channels. M.S. Thesis. – Tempe, AZ, USA: Department of Electrical Engineering, Arizona State University, 2008. – 85 p.
  7. *Кебкэл К. Г., Дидковский В. С.* Анализ путей развития средств цифровой гидроакустической связи. Монография. – Севастополь, 2010. – 168 с.
  8. *Бабаев А. Э.* Моделирование нестационарных режимов совместной работы электроупругих цилиндрических излучателя и приемника / А. Э. Бабаев, В. Г. Савин, Ю. Н. Рябуха // Контроль и управление в технических системах – практ. конф. 14-15 сент. 1995 г. : тезисы докл. – Винница, 1995. – С. 68.
  9. *Гринченко В. Т.* Механика связанных полей в элементах конструкций : в 5 т. / В. Т. Гринченко, А. Ф. Улитко, Н. А. Шульга. – Киев : Наук. думка, 1989 – . – Т. 5: Электроупругость. – 1989. – 280 с.
  10. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1978. – 736 с.
  11. *Савин В. Г.* Излучение акустических импульсов сферическим пьезовибратором / В.Г. Савин // Акуст. журн. – 1991. – Т. 37, № 6. – С. 1194–1198.
  12. Савин В.Г. Преобразование акустических импульсов в электрические сферической пьезокерамической оболочкой / В.Г. Савин, И.О. Моргун // Электроника и связь. – 2006. – №6. – С. 36–42.
  13. *Пугачев С.И.* Пьезокерамические преобразователи / С.И. Пугачев. – Л. : Судостроение, 1984. – 256 с.