

УДК 681.883.45

**НИЗКОЧАСТОТНЫЙ ПЕРЕДАЮЩИЙ ТРАКТ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ
МЕЖДУ ПОДВОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

СУХАРЬКОВ О.В.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

**LOW FREQUENCY TRANSMISSION PATH FOR DIGITAL COMMUNICATION
BETWEEN UNDERWATER OBJECTS**

SUKHARKOV O.V.

Odessa national academy of telecommunications n.a. O.S. Popov

***Аннотация.** Проведен анализ акустических свойств модифицированного жидкоструйного преобразователя как основного элемента низкочастотного передающего тракта. Разработан новый низкочастотный передающий тракт для цифровой связи между подводными объектами, находящимися на различной глубине океана.*

***Abstract.** The analysis of the acoustic properties of the modified fluid jet converter as a basic element of the low-frequency transmission path has been performed. A new low-frequency transmission path for digital communication between underwater objects located at different depths of the ocean is developed.*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не ослабевает интерес к созданию новых средств различного назначения для цифровой гидроакустической связи [1...3]. Для решения проблемы повышения эффективности низкочастотных передающих трактов перспективно включить в схему трактов жидкоструйные преобразователи с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием [4]. Достоинствами преобразователей такого рода являются: высокая энергоемкость (отношение излучаемой мощности к массе), дешевизна изготовления излучателей, незначительные массогабаритные характеристики, простота в эксплуатации и отсутствие вибрирующих элементов конструкции. Основными элементами данных преобразователей служат пульсирующий тороидальный вихрь с развитой кавитацией и колеблющаяся затопленная струя рабочей жидкости.

Раньше, на основе прямоточного жидкоструйного преобразователя, был разработан низкочастотный передающий тракт для цифровой связи между подводными объектами, находящимися в гидроакустическом волноводном канале [4]. В тракте несущая частота звукового импульсного сигнала жидкоструйного преобразователя, согласно компьютерной программе, модулируется передаваемым дискретным информационным сигналом. Однако недостатком этого передающего тракта является то, что рабочей жидкостью для питания прямоточного преобразователя служит морская вода. Морской воде свойственны следующие недостатки: наличие в составе воды непостоянного количества биогенных веществ, насыщенность приповерхностного слоя моря воздушными пузырьками, агрессивность соленой морской воды к внутренним поверхностям насоса и водозаполненного преобразователя. Все это может привести к некоторой нестабильности работы насоса, питающего жидкоструйный преобразователь, и, как следствие, к искажению генерируемого акустического сигнала при передаче дискретной информации между подводными объектами.

Важной задачей информационной гидроакустики является задача создания низкочастотных систем помехоустойчивой связи между надводными кораблями, подводными лодками и необитаемыми гидроакустическими комплексами, находящимися на различной глубине морей и океанов.

Целью данной статьи является разработка нового низкочастотного передающего тракта для цифровой связи между подводными объектами, находящимися на различной глубине океана.

**АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО
ЖИДКОСТРУЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Основным элементом разработанного передающего тракта служит модифицированный жидкоструйный преобразователь со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде со-

осных дисков (рис. 1). Его механизм звукообразования в целом аналогичен механизму звукообразования прямооточного жидкоструйного преобразователя [5].

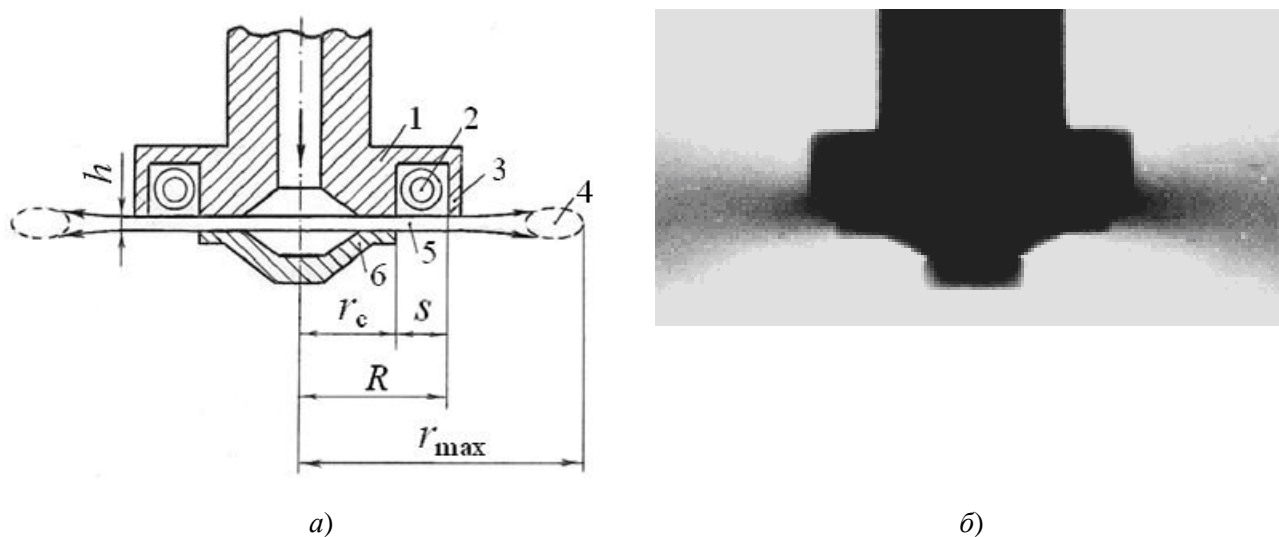
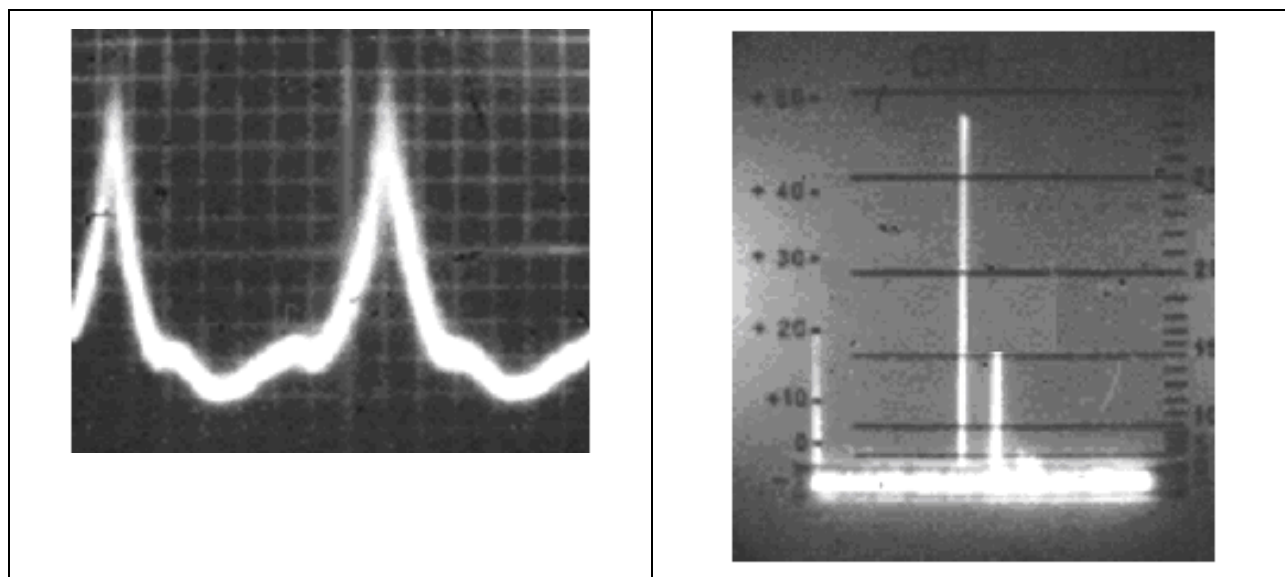


Рисунок 1 – Модифицированный жидкоструйный преобразователь: а) физическая модель, б) фотопреобразователя, работающего в оптимальном режиме

В качестве модели излучателя предложена динамика изгибных колебаний кольцевой струйной пластинки [6, 7]. Из кругового щелевого сопла (рис. 1, а), образованного соосными дисками корпуса 1 и обтекателя 6, перпендикулярно оси излучателя вытекает затопленная плоская осесимметричная струя 5. Кольцевая струйная пластинка характеризуется геометрическими параметрами: толщиной h , шириной s , внутренним радиусом r_c и внешним радиусом R , причем толщина h пластинки мала по сравнению с радиусом R . Геометрические параметры излучающей системы: ρ, E, V – плотность, эквивалентный модуль упругости затопленной струи и её скорость на выходе из сопла. Внутренний край кольцевой пластинки жестко защемлен на выходе из сопла, а наружный край свободно опирается на препятствие 3. Ступенчатое препятствие 3 способствует тому, что часть кинетической энергии струи расходуется на формирование в проточке корпуса 1 тороидального кавитационного вихря 2, пульсации которого возбуждают изгибные колебания в струйной пластинке 5. При совпадении частоты пульсаций вихря 2 и собственной частоты кольцевой струйной пластинки генерируется акустический сигнал максимального уровня. В области 4 происходит коллапс выброшенных кавитационных пузырьков. Фотография (рис. 1, б), позволяет оценить максимальный радиус r_{\max} зоны гидродинамического звукообразования модифицированного преобразователя. Можно сказать, что в рабочей зоне излучателя образуется своеобразная резонансная система [8], состоящая из упругой кавитирующей среды внутри кольцевой проточки корпуса 1, струйной пластинки 5 и присоединенной массы внешней среды. Эта резонансная система и обеспечивает обратную акустическую связь, навязывая струйной пластинке автоколебания со стабильной частотой.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что жидкоструйные излучатели с пульсирующей кавитационной областью генерируют негармонические акустические сигналы в виде коротких экспоненциальных импульсов [9, 10]. В спектре звука, кроме основной гармоники, присутствуют также высшие гармонические составляющие. На рис. 2 приведены фонограмма и спектрограмма типичных акустических сигналов, генерируемых модифицированным преобразователем при оптимальном режиме истечения струи [10]. Спектр генерируемых колебаний занимает широкую полосу частот, примерно от 0,2 до 25 кГц. При этом значительная доля звуковой энергии, излучаемой преобразователем, приходится на основную частоту f_0 .

В результате решения задачи описания собственных колебаний кольцевой струйной пластинки получена формула для расчёта частоты основного тона звукового сигнала, генерируемого модифицированным преобразователем [6]:



а)

б)

Рисунок 2 – Типичная фонограмма (а) и соответствующая ей спектрограмма (б) акустического сигнала модифицированного преобразователя

В результате решения задачи описания собственных колебаний кольцевой струйной пластинки получена формула для расчета частоты основного тона звукового сигнала, генерируемого модифицированным преобразователем [6]:

$$f_0 = \frac{\beta_0^2}{2\pi(R - r_c)^2} \sqrt{\frac{h^2}{36\rho} \left(1 - \frac{r_c}{R}\right) \cdot \sum_{i=1}^3 \chi_i (P^* + \Delta P_{ct})}, \quad (1)$$

где $\beta_0 = 4,611$ – первый корень соответствующего трансцендентного уравнения; ΔP_{ct} – избыточное, по сравнению с атмосферным давлением, статическое давление; в качестве внутреннего давления P^* предлагается использовать порог кавитации жидкости; χ_1, χ_2, χ_3 – коэффициенты эмпирической модели жидкости Тэта.

Для проверки соответствия предложенной математической модели параметрам реального устройства в акустическом бассейне исследовались частотные характеристики пяти излучателей, у которых радиус сопла принимал значения: $r_c = 8, 10, 13, 17, 21$ мм. В качестве рабочей жидкости служила отстоянная в течение трех недель водопроводная вода, имеющая плотность $\rho = 10^3$ кг/м³ и порог кавитации $P^* = 0,51$ МПа. Глубина погружения преобразователей соответствовала $\Delta P_{ct} \approx 5$ кПа. За счет регулировки скорости струи на выходе из сопла излучатели настраивались на оптимальный режим, соответствующий максимальному уровню акустического сигнала. Толщина кольцевой струйной пластинки оставалась постоянной и равной: $h = 0,5$ мм, а её ширина s изменялась в интервале от 1,5 мм до 8 мм. Для этого был изготовлен набор корпусов излучателя с различными по ширине кольцевыми проточками. При расчете частоты основного тона сигнала в формуле (1) значения параметров модели Тэта принимали следующие значения: $\chi_1 = 7,5$; $\chi_2 = 8 \cdot 10^{-6}$ Па⁻¹; $\chi_3 = 1,2 \cdot 10^{-11}$ Па⁻² [7].

Исследования показали, что все испытываемые жидкоструйные излучатели начинают генерировать тональный акустический сигнал при ширине кольцевой струйной пластинки $s_1 = 2,0$ мм. На рис. 3 представлено семейство кривых зависимости частоты основной гармоники сигнала от соотношения радиусов внутреннего и наружного контуров струйной пластинки в интервале значений $1,5 \leq s/s_1 \leq 4$. Здесь маркеры соответствуют экспериментальным измерениям частоты основного тона генерируемого сигнала, сплошные линии – результаты теоретического расчета по формуле (1).

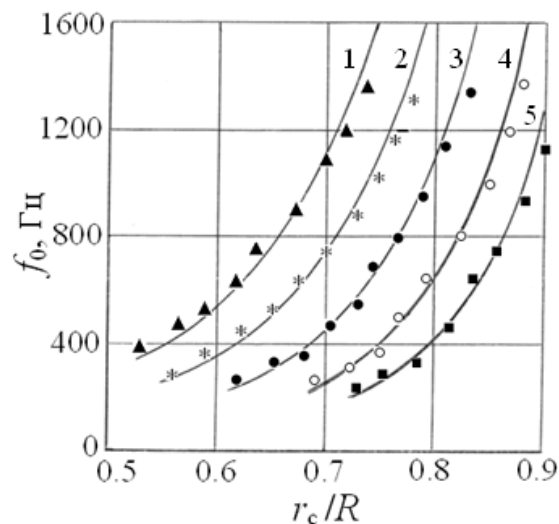


Рисунок 3 – Зависимость частоты основной гармоники звукового сигнала от радиусов внутреннего и наружного контуров кольцевой струйной пластинки:

1 – $r_c = 8,0$ мм; 2 – $r_c = 10,0$ мм; 3 – $r_c = 13,0$ мм; 4 – $r_c = 17,0$ мм; 5 – $r_c = 21,0$ мм

Из графика видно, что с увеличением безразмерного параметра r_c/R частота основного тона акустического сигнала монотонно возрастает для всех испытуемых преобразователей. При этом следует отметить, что с увеличением радиуса сопла r_c при постоянной ширине s плоской струи частота основной гармоники f_0 уменьшается. Возможно, это связано с увеличением площади поверхности колеблющейся плоской струи. Так, для жидкоструйного излучателя звука с $s/s_1 = 3$ при $r_c = 8$ мм частота низшей гармоники составляет $f_0 = 475$ Гц, при $r_c = 13$ мм при той же ширине пластинки – $f_0 = 380$ Гц, а при $r_c = 21$ мм – $f_0 = 328$ Гц.

Решена задача вынужденных колебаний кольцевой струйной пластинки [11]. Это позволило определить формулу для расчета амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) модифицированных излучателей. Функция амплитуды вынужденных колебаний свободного края струйной пластинки имеет вид [11]:

$$W(\lambda s) = \frac{Q_0}{\lambda^4 \tilde{D}} \left[1 - \frac{J_0(\lambda s) \cdot I_1(\lambda s) + I_0(\lambda s) \cdot J_1(\lambda s)}{J_1(\lambda s) + I_1(\lambda s)} \right], \quad (2)$$

где Q_0 – амплитуда удельной возбуждающей силы со стороны пульсирующего кавитационного вихря, \tilde{D} – эквивалентная цилиндрическая жесткость струйной пластинки. Для волнового числа λ справедливо выражение $\lambda^4 = \omega^2 \rho h / \tilde{D}$, где ω – круговая частота акустического сигнала. В формуле (2) $J_0(\lambda s)$ и $J_1(\lambda s)$ – функции Бесселя первого рода 0-го и 1-го порядка, $I_0(\lambda s)$ и $I_1(\lambda s)$ – модифицированные функции Бесселя первого рода 0-го и 1-го порядка. Расчеты по формуле (2) показали, что в случае, когда параметр $\lambda s = \lambda_0 s = 4,611$, то значение амплитуды колебаний свободного края струйной пластинки $W(\lambda s)$ становится максимальным. Явление резонанса характеризуется совпадением частоты пульсаций кавитационного вихря с собственной частотой вынужденных колебаний кольцевой струйной пластинки.

На рис. 4 маркерами отражены результаты экспериментальных измерений амплитудно-частотных характеристик для одного из пяти преобразователей в относительных единицах звукового давления $P/P_{\max}(f)$. Там же сплошными линиями представлены в относительных единицах теоретические АЧХ изгибных колебаний струйных пластинок $W/W_{\max}(f)$, рассчитанные по формуле (2).

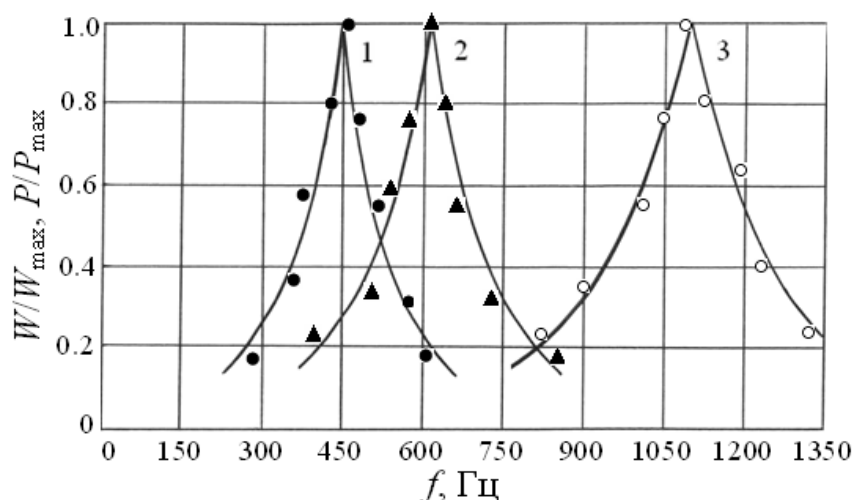


Рисунок 4 – АЧХ жидкоструйного преобразователя с радиусом сопла $r_c = 8,0$ мм:
 1 – $s = 6,0$ мм; 2 – $s = 5,0$ мм; 3 – $s = 3,5$ мм

Из графика видна хорошая корреляция АЧХ преобразователей и функции изгибных колебаний свободного края затопленной струйной пластинки. Объяснение следует из физической модели жидкоструйного излучателя (рис. 1). В исследуемом преобразователе затопленная плоская осесимметричная струя является границей пульсирующего кавитационного вихря. Динамика кольцевой струйной пластинки определяет как частоту её колебаний, так и интегральный уровень сигнала. Чем больше амплитуда деформации изгиба $W(\lambda s)$ свободного края струйной пластинки, тем выше будет интегральный уровень генерируемого струей сигнала. Наибольшая часть кинетической мощности затопленной струи преобразовывается в интенсивность акустического поля именно при резонансной частоте. Этому соответствует оптимальная скорость струи, при которой частота пульсаций кавитационного вихря совпадает с собственной частотой кольцевой струйной пластинки. Установлено также, что, регулируя скорость струи на заданной глубине погружения излучателя, можно в диапазоне частот, близком к резонансной частоте, изменять частоту высокоамплитудного сигнала.

Экспериментально исследованы энергетические и частотные характеристики преобразователей различного типоразмера в широком диапазоне (0,5 м...240 м) глубины погружения излучателей [10]. При увеличении статического давления и одновременном подборе оптимальной скорости струи установлено существенное возрастание интегрального уровня акустического поля, а также обнаружена закономерность повышения частоты основного тона генерируемого сигнала. Установлено, что данный излучатель является источником мощных акустических волн в диапазоне низких звуковых частот (0,22...4,85) кГц.

Известно, что для обеспечения широкой равномерной частотной характеристики излучения, позволяющей воспроизводить без искажений акустический сигнал на электрической стороне (в приемниках) добротность излучателей должна быть невелика (≤ 10) [12]. На основании проведенных исследований АЧХ для преобразователей различного габарита [11] расчёт добротности 1 показал, что данный излучатель эффективно использовать в качестве основного элемента для низкочастотных передающих трактов.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТА ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ

При проектировании передающего тракта были поставлены следующие задачи: формирование характеристики направленности гидроакустической рупорной антенны в вертикальной плоскости, повышение надежности ее работы при передаче дискретной информации между подводными объектами, усовершенствование конструкции антенны.

Схема передающего тракта цифровой связи, разработанного на основе рупорной антенны вертикальной ориентации [13], представлена на рис. 5. Тракт включает в себя следующие конструктивные элементы (находящиеся на надводном корабле или на подводной лодке): компьютер 1, исполнительный механизм 2 для регулирования расхода рабочей жидкости, основной насос 3, модуля-

тор 4, образцовый манометр 5, емкость 14 с рабочей жидкостью, вспомогательный насос 15, исполнительный механизм 16 для создания и регулирования статического давления во внутренней полости антенны, клапан 17.

Основным элементом передающего тракта служит заборное устройство – рупорная антенна вертикальной ориентации [13]. Антенна представляет собой герметичную емкость и содержит преобразователь 9, цилиндрическую камеру 6 для компенсации гидростатического давления окружающей морской среды, предрупорную камеру 10 в виде цилиндрического волновода с фланцем, выполненную совместно с рупором 11 катеноидальной формы, звукопрозрачное окно 12. Преобразователь 9 выполнен в виде модифицированного жидкоструйного преобразователя [6] и установлен на штуцере 8 внутри предрупорной камеры 10. При этом зона звукообразования преобразователя 9 расположена на оси волновода на расстоянии от фланца камеры 10 равном четверти длины волны, соответствующей частоте основного тона f_0 генерируемого сигнала (первой гармонике продольного резонанса заполненного рабочей жидкостью волновода [14, с. 51– 61]).

Камера 6 герметично установлена на фланце предрупорной камеры 10. С целью компенсации статического давления во внутренней полости антенны во фланце камеры 10 выполнено центральное отверстие, диаметр которого составляет 0,90...0,94 наружного диаметра корпуса преобразователя 9. При этом отношение диаметра штуцера 8 преобразователя к наружному диаметру его корпуса равно 0,52...0,58. Камера 6 содержит патрубки 7 для соединения с входом аксиально-поршневого насоса 3, с выходом вспомогательного насоса 15 и для соединения с емкостью 14 рабочей жидкости. В апертуре рупора 11 с помощью прижимного кольца 13 установлено круглое звукопрозрачное окно 12, изготовленное из акустически прозрачной резины [13].

Все конструктивные металлические элементы предлагаемой гидроакустической антенны и соединительные трубопроводы изготавливаются из нержавеющей стали, например, X18H10T. Для питания модифицированного преобразователя [6] в качестве рабочей жидкости используется трансформаторное масло. Наиболее важным свойством трансформаторного масла является его стабильность против окисления, т. е. способность сохранять свои параметры при длительной работе. В нерабочем состоянии внутренняя полость антенны полностью заполнена предварительно отфильтрованным и дегазированным трансформаторным маслом, при этом апертура антенны герметично закрыта стальной крышкой (на рис. 5 не показана).

Работа передающего тракта осуществляется следующим образом. При включении электропитания центральный процессор компьютера 1 (рис. 5) выполняет специально разработанную программу, управляющую исполнительными механизмами 2 и 16. С помощью механизма 16 вначале включается вспомогательный насос 15, который создает в камере 6 и, соответственно, во всей внутренней полости антенны статическое давление равное по величине гидростатическому давлению окружающей морской среды на глубине погружения антенны. Регулировку статического давления осуществляет механизм 16, управляющий регулируемым клапаном 17. Избыточное трансформаторное масло поступает в емкость 14. Статическое давление внутри рупорной антенны контролируется образцовым манометром 5. После этого автоматически открывается крышка, закрывающая апертуру антенны. Механизм 2 включает насос 3 и устанавливает величину расхода жидкости, соответствующую оптимальной скорости истечения струи из сопла преобразователя 9. В этом случае преобразователь 9 генерирует тональный звуковой сигнал, состоящий из последовательности отдельных экспоненциальных импульсов. Уровень генерируемого сигнала зависит от режима истечения струи, геометрических параметров преобразователя и величины гидростатического давления на заданной глубине [10].

Затем выполняется считывание передаваемого дискретного сигнала с дискового носителя информации компьютера 1. Манипуляция несущей частоты звукового сигнала реализуется путём регулирования оптимальной скорости струи за счёт программируемого управления процессором компьютера 1 работой модулятора 4. При этом несущая частота звукового импульсного сигнала преобразователя 9 модулируется передаваемым дискретным информационным сигналом. В результате генерируемый акустический сигнал превращается в комбинацию импульсных последовательностей с разными звуковыми частотами, одна из которых соответствует уровню логического "нуля", а вторая соответствует уровню логической "единицы" в фиксированные интервалы времени [4]. Рупорная антенна выполняет направленное в вертикальной плоскости излучение модулированного звукового сигнала.

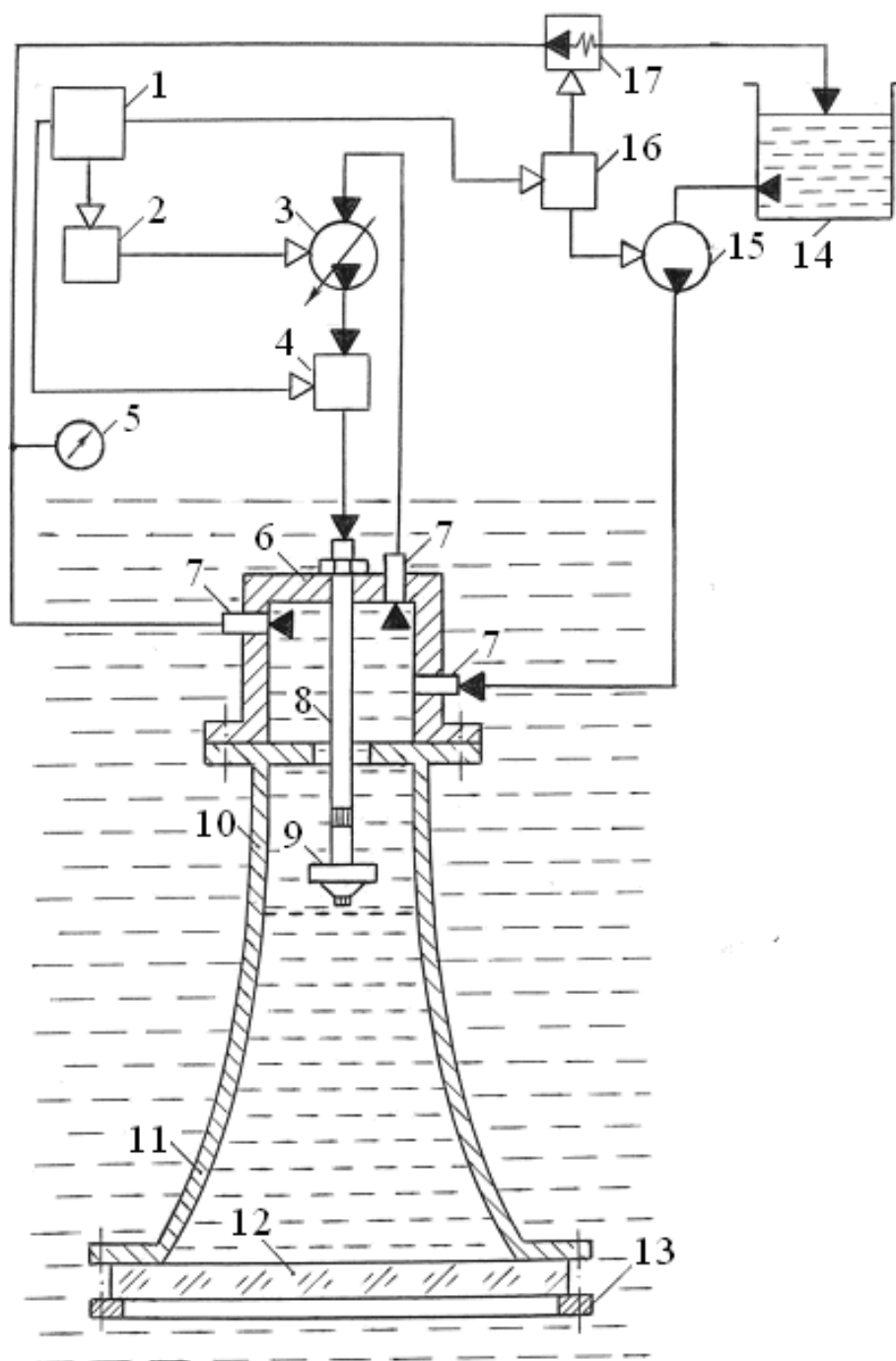


Рисунок 5 –Схема низкочастотного передающего тракта

В приёмно-усилительном тракте выполняются операции над принятым акустическим сигналом, обратные тем, которые производились при передаче. Звуковые сигналы, с помощью приемной антенны, принимают из вертикального канала связи, преобразуют их в электрические сигналы и измеряют периоды импульсных последовательностей этих сигналов в четко определенные интервалы времени. Далее осуществляют идентификацию единиц и нулей кодовой комбинации и записывают принятую информацию на носитель приемной аппаратуры. Конечный этап обработки включает в себя декодирование и представление информационного сообщения в удобном для слухового или зрительного восприятия виде.

С целью формирования характеристики направленности антенны в вертикальной плоскости в разработанной гидроакустической антенне используется рупор катеноидальной формы. Достоинством катеноидального рупора является плавное сопряжение с цилиндрической предрупорной камерой, поэтому в плоскости перехода отраженной волны не возникает [13]. Для повышения эффектив-

ности излучения сигнала в предлагаемой антенне установлено звукопрозрачное окно четвертьволновой толщины. При этом волновое сопротивление акустически прозрачной резины, из которой изготовлено окно, равно среднему геометрическому волновых сопротивлений трансформаторного масла и морской воды. Поскольку волновое сопротивление трансформаторного масла $\rho_1 c_1 = 1,28 \times 10^6 \text{ кг/м}^2 \text{с}$, волновое сопротивление морской воды $\rho_3 c_3 = 1,57 \times 10^6 \text{ кг/м}^2 \text{с}$, то волновое сопротивление звукопрозрачного окна должно иметь значение $\rho_2 c_2 = \sqrt{\rho_1 c_1 \cdot \rho_3 c_3} = 1,42 \times 10^6 \text{ кг/м}^2 \text{с}$. В этом случае влияние промежуточного слоя минимально: в нем существует резонанс продольных колебаний и акустическая волна практически полностью проходит через звукопрозрачное окно [14, с. 89–92].

С целью проектирования различных по частоте антенн вертикальной ориентации проведены экспериментальные исследования акустических характеристик модифицированного жидкоструйного преобразователя различного типоразмера. Рабочей жидкостью служило трансформаторное масло, плотность которого составляла $\rho_{\text{тр}} = 940 \text{ кг/м}^3$. Поскольку вязкость трансформаторного масла приблизительно в семь раз выше, чем у воды, то для достижения преобразователем оптимального режима работы необходимо увеличивать кинетическую энергию (соответственно, скорость) струи [15]. Проведённые исследования позволили уточнить оптимальную скорость струи $V_{\text{опт}}$ и разработать по методике статьи [16] три рупорные антенны с частотами генерируемого сигнала в диапазоне (520–1050) Гц. В табл. 1. представлены параметры и характеристики антенн для цифровой связи между надводным кораблём и необитаемым гидроакустическим комплексом, находящимся на дне океана.

Таблица 1 – Параметры и характеристики рупорных антенн

Рабочая частота f_0 , Гц	1050	830	520
Типоразмер модифицированного излучателя s/r_c , мм	3,5/8	4/10	5/13
Оптимальная скорость струи $V_{\text{опт}}$, м/с	37	43	48
Радиус и длина предрупорной камеры R/l , см	6/33	6/44	6/65
Показатель расширения рупора β , м ⁻¹	2,0	2,0	2,0
Диаметр апертуры и длина катеноидального рупора D_A/L , м	0,9/1,4	0,9/1,4	0,9/1,4
Критическая частота рупора $f_{\text{кр}}$, Гц	478	478	478
Уровень излучаемого сигнала относительно 20 мкПа, дБ	178	182	185
КНД (коэффициент концентрации) антенны	15	14	12
Глубина погружения антенны H , м	1... 3	1... 3	1... 3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен анализ акустических свойств модифицированного жидкоструйного преобразователя как основного элемента низкочастотного передающего тракта. Генерируемый излучателем тональный звуковой сигнал состоит из последовательности отдельных импульсов экспоненциальной формы. В качестве модели преобразователя предложена динамика изгибных колебаний затопленной кольцевой струйной пластинки. Экспериментально подтверждено, что полученные в результате теоретического анализа формулы для расчета частоты основного тона и АЧХ сигнала преобразователя обеспечивают надежный расчет этих характеристик при проектировании передающих трактов.

Проведенные исследования позволили разработать новый низкочастотный передающий тракт для цифровой связи между подводными объектами, находящимися на различной глубине океана. Для передающего тракта цифровой связи между надводным кораблём и необитаемым гидроакустическим

комплексом, находящимся на дне океана, разработано семейство рупорных антенн с частотами генерируемого сигнала в диапазоне (520...1050) Гц. Достоинством разработанного передающего тракта является то, что частотно-импульсная модуляция акустического сигнала обладает повышенной помехоустойчивостью по сравнению с модуляцией непрерывной синусоидальной несущей частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кебкал К.Г. Анализ путей развития средств цифровой гидроакустической связи / К. Г. Кебкал, В.С. Дидковский. – Севастополь: Изд. центр СТУЯЭиП, 2010. – 168 с.
2. Waheed-uz-Zaman M. Design And Construction of Very Low Frequency Antenna / M. Waheed-uz-Zaman, M.A.K. Yousufzai // Journal of Basic and Applied Sciences. – America, 2011. – Vol. 7, No. 2. – P. 141–145.
3. Zhang H. The Impact of Antenna Design and Frequency on Underwater Wireless Communications / Hao Zhang // PacificRim Conference IEEE, 23 Aug. 2011. – P. 868–872.
4. Сухарьков О.В. Передача дискретной информации в гидроакустический канал связи с использованием жидкоструйных преобразователей / О.В. Сухарьков // Цифрові технології. – 2011. – № 9. – С. 100–110.
5. Dudzinski Yu.M. Axial-symmetric hydrodynamic radiators used for fluid cavitation threshold measurement / Yu.M. Dudzinski, O.V. Sukharkov, N.V. Manicheva // The IVth International Hutsulian Workshop on Mathematical Theories and their Applications in Physics & Technology, 28 October – 02 November 2002: The materials of conf. – K.: TIMPANI, 2004. – P. 275–286.
6. Сухарьков О.В. Модель жидкоструйного излучателя с круговым щелевым соплом в виде соосных дисков / О.В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2011. – № 2. – С. 107–113.
7. Сухарьков О.В. Динамика затопленной плоской осесимметричной струи / О.В. Сухарьков // Акустичний вісник. – 2012. – 15. – № 1. – С. 59–64.
8. Вовк И. В. О возможном механизме автоколебаний в струйных гидродинамических излучателях с развитой кавитацией / И. В. Вовк, В. Т. Гринченко, Ю. М. Дудзинский // Акустичний вісник. – 2008. – 11, № 2. – С. 16–23.
9. Дудзинский Ю. М. Ближнее поле осесимметричного гидродинамического излучателя / Ю. М. Дудзинский // Акустичний вісник. – 2004. – 7. – № 4. – С. 48–51.
10. Сухарьков О. В. Акустические свойства модифицированного жидкоструйного преобразователя в условиях гидростатического давления / О. В. Сухарьков // Электроника и связь. – 2012. – № 5(70). – С. 77–87.
11. Сухарьков О. В. Амплитудно-частотные характеристики модифицированного жидкоструйного преобразователя / О. В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2012. – № 2. – С. 55–62.
12. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / [науч. ред. Голямина И.П. и др.]. – М. : Советская энциклопедия, 1979. – С. 132–133.
13. Пат. 100212 Україна, МПК' В06В 1/00, Н04R 1/00. Гідроакустична рупорна антена / Сухарьков О. В.; заявник і патентовласник Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова. – № а 2011 15013; заявл. 19.12.11, опубл. 26.11.12, Бюл. № 22.
14. Тюлин В. Н. Введение в теорию излучения и рассеяния звука / В. Н. Тюлин. – М. : Наука, 1976. – 256 с.
15. Жукова А. В. Вплив параметрів зануреного струменя на рівень звуку гідродинамічного випромінювача / А. В. Жукова // Акустичний вісник. – 2009. – 12, № 4. – С. 23–28.
16. Иваницкий А. М. Гидроакустические антенны дальней цифровой связи для волноводных каналов Черного моря / А. М. Иваницкий, О. В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2013. – № 1. – С. 34–42.