

История создания измерительной базы

УДК: 534.6

**СЕРИЙНЫЕ ГИДРОФОНЫ ВНИИФТРИ И
ИСТОРИЯ ИХ СОЗДАНИЯ****А.М. Еняков**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., enyakov@vniiftri.ru

Приведен анализ 50-летнего опыта создания (разработок и серийного изготовления) во ВНИИФТРИ измерительных гидрофонов различного назначения. Рассмотрены конструктивные особенности, технологические решения и метрологические характеристики созданных гидрофонов.

An analysis is presented of 50 years' experience in the creation (development and serial manufacturing) of measurement hydrophones for various purposes at VNIIFTRI. Design features, technology solutions, and metrological characteristics of the created hydrophones are considered.

Ключевые слова: гидрофоны, гидроакустические измерения, разработка, технические решения.

1. Введение – этап становления

В феврале 2016 года исполнилось 50 лет со дня образования во ВНИИФТРИ ряда подразделений для разработки мобильной гидроакустической системы измерения шумов кораблей, порученной Госстандарту по Постановлению ЦК КПСС и Совета Министров СССР. Среди этих подразделений был создан и сектор, основной задачей которого являлась разработка первичных измерительных преобразователей (гидрофонов), который впоследствии переформировывался в отдел, затем лабораторию, но сохранил направленность своей деятельности до настоящего времени.

Следует вспомнить ситуацию, при которой начиналось создание гидрофонов:

1) во ВНИИФТРИ не производилось никаких гидрофонов, даже единичными экземплярами или в виде макетов;

2) все солидные предприятия судостроительной промышленности (например, ЦНИИ «Морфизприбор», Волгоградский завод «Ахтуба», Ленинградский завод «Водтрансприбор», Таганрогский завод «Прибой»), занимающиеся разработкой и выпуском гидроакустической аппаратуры, имели технологические возможности для производства пьезокерамических элементов требуемых типо-размеров;

3) электронная промышленность только начинала производство высокоэффективных сегнетоэлектрических материалов, еще не освоенных ни одним из перечисленных выше предприятий;

4) стандартного, доступного для покупки оборудования для изготовления

пьезоэлементов (вакуумные мешалки, печи для высокотемпературного обжига, литьевые машины, поляризационные установки и пр.) тогда не существовало.

Для решения поставленных перед ВНИИФТРИ задач было принято решение развернуть в цокольных помещениях одного из корпусов экспериментально-технологическую базу для собственного производства пьезоэлементов сотрудниками нашего сектора. Уникальные элементы оборудования изготавливались на Опытном заводе ВНИИФТРИ, некоторое оборудование было закуплено на специализированных предприятиях в режиме «second hand» и затем дорабатывалось. В итоге было установлено несколько десятков единиц оборудования для выполнения около 30 операций технологического цикла изготовления гидрофонов. В дальнейшем это оборудование модернизировалось, а его состав становился более оптимальным.

За прототип разрабатываемых гидрофонов было решено взять сферические гидрофоны, разработанные и выпускаемые ЦНИИ «Морфизприбор», не изменяя их конструкцию, а только заменив применяемые в них сферические элементы из пьезокерамики титаната бария и кальция - $(\text{Ba}, \text{Ca})\text{TiO}_3$ (по тогдашней классификации – III состав) на сферы из пьезокерамики ЦТС, только что освоенной электронной промышленностью. Такая замена потребовала освоения новых технологических процессов формирования (горячее литье под давлением) и обжига полуфабриката, обеспечивающих заданные свойства пьезокерамических изделий, и эта задача была решена в течение 1 – 2 лет. В итоге были созданы гидрофоны 1ПИ-2, 1ПЗ и 1П4, чувствительность которых оказалась примерно в 2 раза выше, чем у прототипа. Обрезиненный хвостовик гидрофонов (см. рис. 1) обеспечивал требуемое отстояние чувствительного элемента от конструкции носителя (при измерениях по прямому назначению) или координатно-поворотного устройства (при их использовании в бассейне).

Однако конструкция этих гидрофонов не была лишена недостатков: например, интегрированный с гидрофоном кабель был очень жестким. Тем не менее, в течение последующих 10 лет эти гидрофоны выпускались в достаточно большом количестве и широко использовались не только в подводных измерительных устройствах, но и в метрологических работах в качестве эталонных и вспомогательных преобразователей. В качестве модификации выпускались и разработанные нами сферические гидрофоны типа ПР без кабеля (см. рис. 1), а низкочастотный диапазон обеспечивал плоский гидрофон ПР-1 с чувствительным элементом в виде двух дисков, собранных по конструкции биморфа. В последующем этот гидрофон был заменен разработанным нами более эффективным гидрофоном с тангенциально-поляризованным

цилиндром, который позже использовался во многих приемных системах в качестве излучателя.



Рис. 1. Гидрофоны

Слева: 1ПН2, 1ПН3 и 1ПН4 со сферическими элементами. Справа: ПР-1 (плоский биморф), ПР-2 (сфера 40), ПР-3 (сфера 7)

Первые измерительные приемные устройства были громоздкими и тяжелыми (около 2 тонн), неудобными в эксплуатации. Чтобы оценить их размеры, на рис.2 представлена фотография только одного из блоков предусилителей такого устройства. Пространственная стабилизация измерительной системы в воде при качке судна была реализована с помощью оригинального, но громоздкого устройства с поплавками на гибких подвесах, существенно затрудняющего постановку и подъем на борт всей системы. К тому же метрологические характеристики этой системы уже не удовлетворяли требованиям к измерениям слабых сигналов, характерных для первичного гидроакустического поля перспективных морских объектов.



Рис.2. Фото гидрофона 1ПН-2 с блоком предварительных усилителей.
О масштабе можно судить по руке, держащей гидрофон

Поэтому в 1973 г. было принято решение о постановке работы по исследованию возможностей создания новых приемных устройств с существенно низкими массо-габаритными характеристиками и уровнем собственных шумов.

2. Новые задачи – новые решения

Перед сектором была поставлена задача по разработке измерительных гидрофонов для новых приемных устройств, а именно: широкополосных ненаправленных приемников высокой чувствительности для измерений подводного шума в диапазоне частот от единиц герц до 200 кГц. Для ее решения было необходимо в первую очередь оценить потенциальные возможности пьезокерамических преобразователей известных конструкций: в виде цилиндрических и сферических оболочек, стержневых пакетных, диафрагменных, биморфного типа и пр. Анализ этих конструкций показал, что наиболее перспективным является все-таки применение тонкостенных замкнутых оболочек – сферических или цилиндрических, использующих механическую трансформацию внешнего давления в одноосное или двухосное механическое напряжение с коэффициентом трансформации, равным отношению среднего радиуса оболочки к толщине ее стенки. Теоретические основы их работы были известны [1, 2]. В [2] было показано, что наибольшую чувствительность можно получить на тангенциально-поляризованных оболочках, в которых электроды расположены по образующим цилиндра. Однако практическое использование тонкостенных цилиндрических пьезоэлементов с тангенциальной поляризацией для создания измерительных гидрофонов с равномерными чувствительностью и направленностью в широкой полосе частот потребовало решения целого ряда научно-технических задач, основными из которых являлись:

- оценка влияния соотношения размеров преобразователя на собственные частоты его колебаний;
- выбор оптимального соотношения размеров преобразователя для обеспечения минимальной неравномерности его диаграмм направленности (ДН) в рабочем диапазоне частот;
- обоснованный выбор оптимального количества электродов пьезоэлемента для минимизации собственных шумов приемного тракта;
- разработка наиболее рациональной конструкции гидрофона (выбор способа герметизации, материала и толщины герметизирующего покрытия, способа закрепления пьезоэлемента и его виброразвязки от корпуса, материала корпуса, общей компоновки гидрофона с предварительным усилителем и пр.);
- разработка технологии всего цикла производства гидрофонов с системой пооперационных проверок для обеспечения качества и

Альманах современной метрологии, 2016, №7

повторяемости свойств продукции для ее серийного производства на Опытном заводе.

Приведем основные результаты этих исследований, выполненных в 1970-х г.г.

3. Широкополосность и характеристики направленности

Вопрос о колебаниях полых цилиндров произвольных размеров является сложным, методика расчета их резонансных частот базируется на приближенных одномерных моделях, справедливых лишь в некоторых предельных случаях: например, для тонкого кольца (толщина t и высота h значительно меньше его диаметра d) или бесконечно длинного цилиндра. На практике для расчета резонансной частоты цилиндрического преобразователя, ограничивающей сверху его частотный диапазон, рассматривают, прежде всего, радиальную моду его собственных колебаний из равенства длины звуковой волны λ_k в керамике длине окружности цилиндра πd . Однако применение цилиндрических преобразователей с высотой, соизмеримой с диаметром, требует уточнения этого равенства, справедливого лишь для случая, когда высота цилиндра много меньше его диаметра. Известные модели для расчета резонансных частот таких цилиндров не учитывали многих существенных условий (например, анизотропии упругих и электрофизических свойств конкретного материала) и не позволяли получить действительных значений резонансных частот. Поэтому наиболее достоверную оценку наличия и положения резонансов на частотной характеристике чувствительности преобразователя удалось получить лишь путем экспериментального исследования частотных зависимостей модуля электрической проводимости цилиндров с различным соотношением h/d [3]. Для устранения влияния варибельности упругих и пьезоэлектрических свойств, а также относительной толщины цилиндров все измерения выполнялись на одном и том же образце с постепенным уменьшением его высоты (методом мокрой шлифовки). На рис.3 для примера показана записанная на самописце частотная характеристика модуля проводимости исследованного образца высотой 24 мм, на которой видны три резонанса его свободных колебаний. Первый резонанс ($f_1 = 44,6$ кГц) условно можно считать резонансом по высоте цилиндра, т.к. для более высоких образцов зависимость f_1 от высоты носит характер, близкий к теоретическому ($f_p = c/2h$, т.е. $f_p \cdot h \approx \text{const}$). С уменьшением высоты сдвиг f_1 в сторону более высоких частот замедляется, а после слияния с f_2 первый резонанс не прослеживается вовсе. Резонансная частота f_2 практически не меняется с высотой и определяет радиальную моду колебаний, что подтверждается результатами измерений на образцах малой высоты. Изменение резонанса f_3 с высотой незначительно для высоких цилиндров,

Альманах современной метрологии, 2016, №7

для низких сильно возрастает.

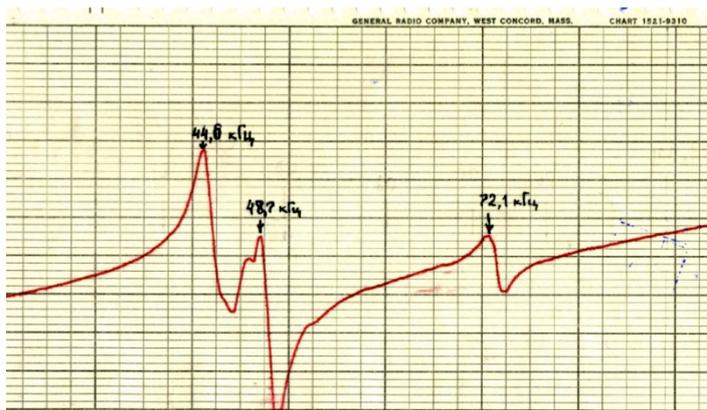


Рис.3. Частотная характеристика модуля проводимости тангенциально-поляризованного цилиндра диаметром 20 мм и высотой 24 мм

Представляется удобным изобразить полученные зависимости этих резонансов в координатах $f_p \cdot d$ и $f_p \cdot h$ (рис.4), где f_p – одна из резонансных частот. Тогда теоретические зависимости произведения резонансной частоты на размер цилиндра для некоторых крайних случаев – радиального резонанса тонкого кольца и продольного резонанса длинного цилиндра – в таком представлении будут являться вертикальной и горизонтальной асимптотами соответственно. Полученные таким образом экспериментальные значения хорошо группируются в плавные кривые, соответствующие f_1 , f_2 и f_3 (слева направо). Значения $f_p \cdot d$ и $f_p \cdot h$ для каждого образца лежат на пересечении построенных кривых с лучом, соответствующем отношению h/d этого образца. Эти зависимости дают представление о наличии резонансов на тонкостенных цилиндрах с различным отношением h/d [3].

Для проверки универсальности полученных зависимостей были исследованы частотные характеристики модуля проводимости на тангенциально-поляризованных цилиндрах различных габаритных размеров, но с примерно одинаковой относительной толщиной стенки. Результаты этих измерений представлены на том же рис.4 и отмечены значками. Хорошее совпадение этих данных с построенными ранее кривыми свидетельствует о достаточной универсальности полученных зависимостей. Итогом этих исследований стала реальная оценка предела увеличения высоты цилиндра без существенного ухудшения его широкополосности, а именно до значений, когда продольная мода колебаний цилиндра совпадает с радиальной.

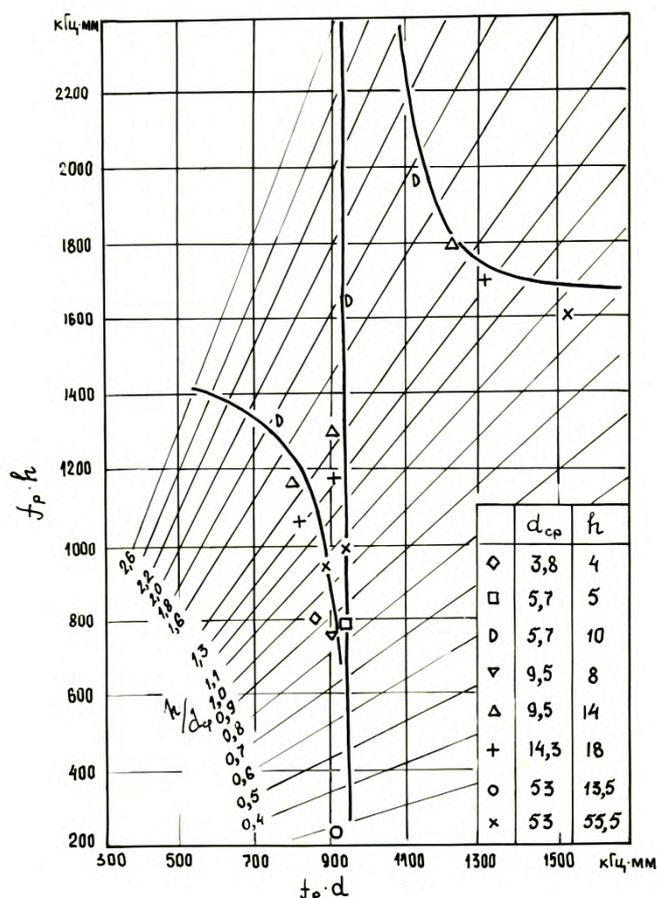


Рис. 4. Резонансные частоты цилиндрических тангенциально-поляризованных элементов

Выявленные ограничения не являются столь жесткими по сравнению с тем, которое накладывает на высоту пьезоэлемента требование к неравномерности его направленности. В связи с этим был проведен анализ теоретического вида диаграмм направленности (ДН) цилиндрического преобразователя в плоскости, совпадающей с его осью (в вертикальной плоскости). Очевидно, что в плоскости, перпендикулярной его оси, теоретическая ДН цилиндра, являющегося осесимметричной оболочкой, будет круговой, по крайней мере, на частотах ниже его первого резонанса. При исследованиях ДН обратимых преобразователей обычно пользуются расчетами в режиме излучения как менее трудоемкими. В силу принципа взаимности ДН обратимых преобразователей в режиме приема и излучения совпадают.

Рассмотрим звуковое поле цилиндра радиуса a и высоты h , совершающего осесимметричные колебания. Цилиндр с торцов находится в

Альманах современной метрологии, 2016, №7

жестком экране такого же радиуса, что соответствует требованию, чтобы цилиндр не излучал торцами (модель, реализуемая в большинстве случаев). Решение такой задачи для цилиндра произвольной высоты и с произвольным распределением колебательной скорости по высоте цилиндра было известно по литературным данным. При равномерном распределении колебательной скорости на поверхности цилиндра давление p , генерируемое таким цилиндром в дальнем поле на расстоянии r , выражается как

$$p(\theta) = \frac{-\rho c \omega h}{\pi r H_1^{(1)}(ka)} e^{ikr} D_h(\theta) D_o(\theta), \quad (1)$$

где θ - угол между осью цилиндра и направлением излучения;

ρc – удельный импеданс среды распространения;

ω – круговая частота;

$H_1^{(1)}$ – функция Ганкеля первого рода первого порядка;

k – волновое число;

D_h и D_o – параметры направленности, определяемые как

$$D_h(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \cos \theta\right)}{\frac{kh}{2} \cos \theta} \quad \text{и} \quad D_o(\theta) = \frac{H_1^{(1)}(ka)}{\sin \theta H_1^{(1)}(ka \sin \theta)}. \quad (2)$$

Из (1) видно, что характеристика направленности гидрофона является комплексной функцией. Поскольку в большинстве случаев оперируют амплитудной характеристикой направленности D , в дальнейшем будем рассматривать лишь модули сомножителей $D = |D_h| \cdot |D_o|$. Анализируя формулы (2), можно заметить на вертикальной ДН в общем случае имеют место провалы, соответствующие обращению в ноль D_h при θ_i , так как

$$\sin\left(\frac{kh}{2} \cos \theta\right) = 0, \text{ если } \frac{kh}{2} \cos \theta = n\pi, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots, \quad \text{и}$$

$$\theta_i = \arccos \frac{2\pi n}{kh} = \arccos \frac{n\lambda}{h}, \quad (3)$$

где λ – длина волны в среде, соответствующая ω .

Из формул (3) следует, что на цилиндре с $h = \lambda$ при $n = 1$ в направлении его оси ($\theta = 0$) появляется первый провал на вертикальной ДН. С ростом h или с увеличением частоты угол θ увеличивается, постепенно приближаясь к 90° . При $h = 2\lambda$ на оси появляется второй провал, который тоже начинает смещаться к нормали оси цилиндра, затем при $h = 3\lambda$ появляется третий провал и т.д. Отсюда ясно, что для получения равномерных ДН следует, прежде всего, выбирать в качестве чувствительного элемента цилиндры с высотой, меньшей λ , т.е.

$$h < c/f_{\text{в}}, \quad (4)$$

где $f_{\text{в}}$ - верхняя частота рабочего диапазона гидрофона.

Для иллюстрации сделанного вывода на рис.5 представлены диаграммы направленности цилиндров радиусом 3 мм и высотой 5, 7,5 и 10 мм, рассчитанные по формулам (2) для 4-х частот: 100, 125, 160 и 200 кГц [4]. Ввиду симметрии ДН относительно оси цилиндра и нормали к ней имеется возможность при представлении ДН ограничиться только четвертью полного угла, как это и сделано на рис. 5.

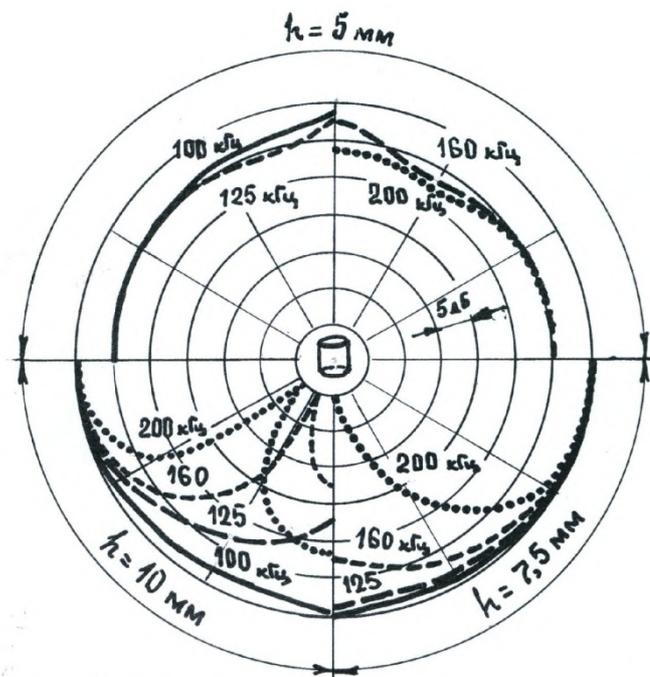


Рис.5. Диаграммы направленности в вертикальной плоскости цилиндров радиусом 3 мм различной высоты

Из рисунка видно, что отсутствие провалов на ДН цилиндра с $h = 7,5$ мм на частотах ниже 160 кГц и цилиндра с $h = 5$ мм на всех представленных частотах радикальным образом снижает неравномерность их направленности, что подтверждает обоснованность условия (4) выбора максимальной высоты цилиндрического преобразователя.

Но требование (4) ограничивает высоту цилиндра только сверху. Более существенным является вопрос оптимизации его высоты по критерию минимума неравномерности его направленности в вертикальной плоскости. Правомочно поставить задачу нахождения определенного значения kh/a , соответствующего минимальной неравномерности направленности цилиндра в вертикальной плоскости. Эта задача решалась следующим

образом [4]:

1) Вначале определялись выраженные через k/a углы θ_1 и θ_2 , соответствующие максимальной $|D_h \cdot D_o|_{\max}$ и минимальной $|D_h \cdot D_o|_{\min}$ чувствительностям, т.е. находились корни уравнения

$$\frac{d}{d\theta} \left| \frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \cos \theta\right)}{\frac{kh}{2} \cos \theta} \cdot \frac{H_1^{(1)}(ka)}{\sin \theta H_1^{(1)}(ka \sin \theta)} \right| = 0. \quad (5)$$

2) Затем после подстановки вместо θ_1 и θ_2 найденных значений определялось оптимальное отношение h/a (в зависимости от k), соответствующее минимальной разности $|D_h \cdot D_o|_{\max} - |D_h \cdot D_o|_{\min}$, т.е. решалось относительно h/a уравнение

$$\frac{\partial}{\partial \left(\frac{h}{a}\right)} \left\{ \left| \frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \cos \theta_1\right)}{\frac{kh}{2} \cos \theta_1} \cdot \frac{H_1^{(1)}(ka)}{\sin \theta_1 H_1^{(1)}(ka \sin \theta_1)} \right| - \left| \frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \cos \theta_2\right)}{\frac{kh}{2} \cos \theta_2} \cdot \frac{H_1^{(1)}(ka)}{\sin \theta_2 H_1^{(1)}(ka \sin \theta_2)} \right| \right\} = 0. \quad (6)$$

3) Однако точное аналитическое решение трансцендентных уравнений (5) и (6) весьма затруднительно, если возможно вообще, и необходимые результаты можно получить лишь приближенным методом, а именно: для конкретного значения радиуса цилиндра и для нескольких значений частоты в верхней части рабочего диапазона гидрофона определить ДН целого ряда цилиндров с $h = (0,1—1,0)\lambda$. Вычислив неравномерность направленности (как разность между максимальным и минимальным ее значениями в пределах углов θ от 0 до $\pi/2$ каждого цилиндра, можно построить графики зависимости неравномерности ДН цилиндра от его высоты для различных частот. Положения минимумов на этих графиках и дадут искомые значения оптимальной высоты цилиндра.

В качестве иллюстрации на рис.6 приведены ДН направленности цилиндров радиусом 3 мм и высотой от 3 до 7 мм, рассчитанные для частот 160 и 200 кГц. Как и на рис. 5, представление ДН здесь ограничено четвертью полного угла. На этом рисунке достаточно отчетливо видна динамика изменения ДН с ростом высоты цилиндра. Неравномерность ДН, определяемая как разность в дБ между максимальным и минимальным значениями чувствительности в пределах углов от 0 до $\pi/2$, с уменьшением высоты цилиндра сначала падает, затем проходит через минимум и возрастает.

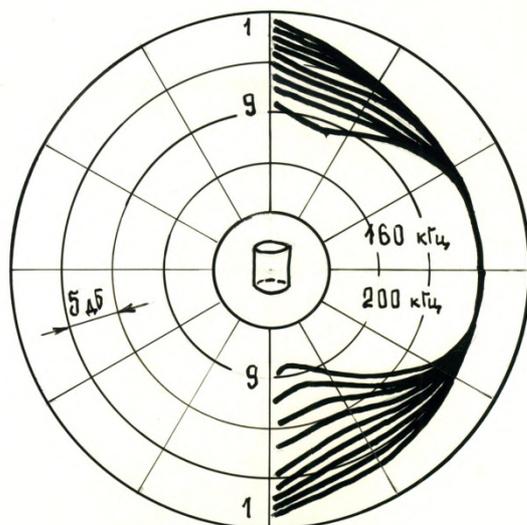


Рис.6. Рассчитанные ДН цилиндров радиусом 3 мм и высотой 3 (1), 3,5 (2), 4 (3), 4,5 (4), 5 (5), 5,5 (6), 6 (7), 6,5 (8) и 7 (9) мм на частотах 160 и 200 кГц

По предложенной методике на ЭВМ ЕС-1022 (в 1975 г.) были рассчитаны зависимости неравномерности ДН от высоты (для целого ряда цилиндров с различными значениями диаметра и высоты для частот от 100 до 200 кГц). Некоторые результаты расчетов представлены на рис. 6 -10. На рис. 7 построены 4 графика (для частот 100, 125, 160 и 200 кГц) зависимости неравномерности ДН от высоты цилиндра радиусом 2 мм, а на рис. 8 – те же зависимости для цилиндра радиусом 3 мм [4].

Из этих рисунков видно, что зависимости неравномерности ДН от высоты имеют минимум, положение которого зависит от частоты измерения и радиуса цилиндра. В результате анализа этих зависимостей для цилиндра радиусом 2 мм целесообразно выбрать в качестве оптимальной его высоту, равную 4 мм, т.к. это обеспечит минимальную неравномерность ДН не только на частоте 200 кГц, если она выбрана в качестве верхней частоты рабочего диапазона такого гидрофона, но и достаточно низкие ее значения на остальных исследованных частотах. Подобные соображения приводят к выводу, что для цилиндров радиусом 3 мм (рис.8) оптимальная высота несколько выше и составляет 5 мм при верхней границе частотного диапазоне 160 кГц.

Семейства кривых на рис. 9 и 10 являются частотными зависимостями неравномерности вертикальных ДН для цилиндров различной высоты радиусом 2 и 3 мм соответственно.

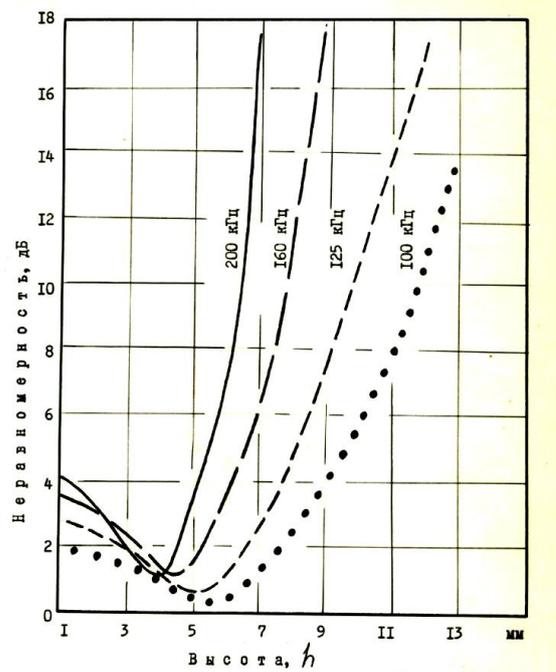


Рис.7. Зависимость неравномерности ДН от высоты цилиндра радиусом 2 мм

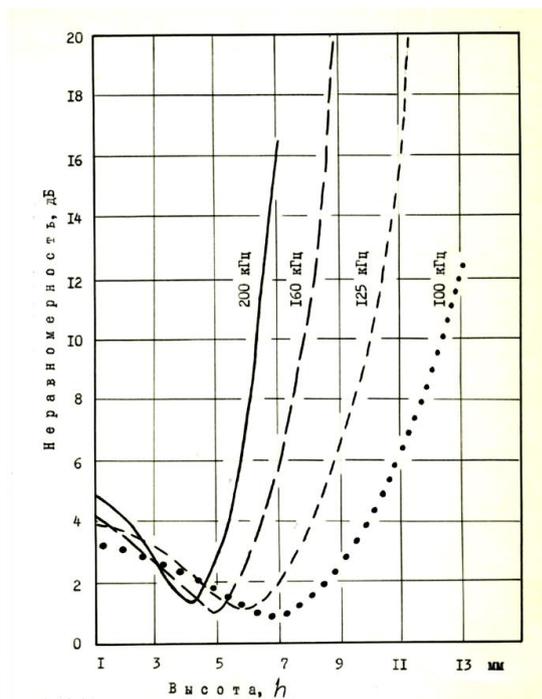


Рис.8. Зависимость неравномерности ДН от высоты цилиндра радиусом 3 мм

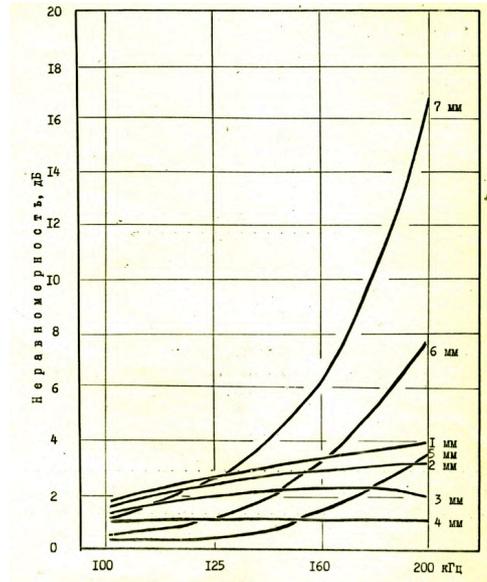


Рис. 9. Частотные характеристики неравномерности ДН цилиндров радиусом 2 мм различной высоты

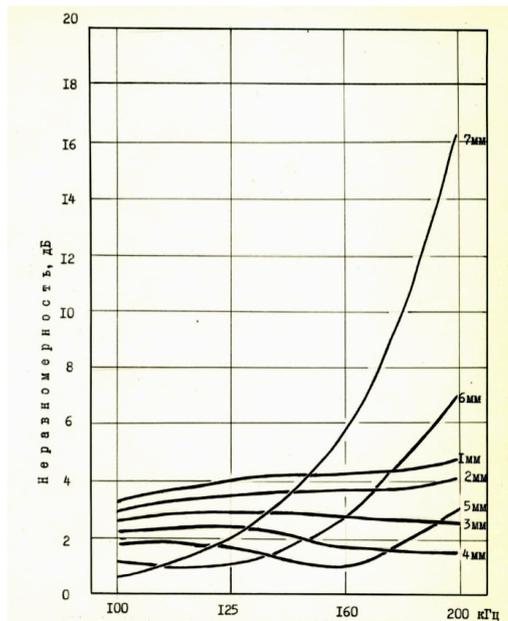


Рис. 10. Частотные характеристики неравномерности ДН цилиндров радиусом 3 мм различной высоты

Как видно из этих рисунков, характер частотных зависимостей меняется с высотой: для цилиндров сравнительно большой высоты неравномерность

ДН с частотой возрастает, а для низких цилиндров падает. Наименьшие (менее 1 дБ) частотные изменения неравномерности направленности имеют место как раз для цилиндров, имеющих найденную выше оптимальную высоту. На рис. 11 построено семейство кривых, определяющих размеры пьезоэлементов, обеспечивающих минимальную неравномерность ДН для различных частот. Пользуясь этими графиками, можно найти требуемые значения h для любого значения радиуса цилиндра в зависимости от верхней частоты рабочего диапазона ультразвукового гидрофона.

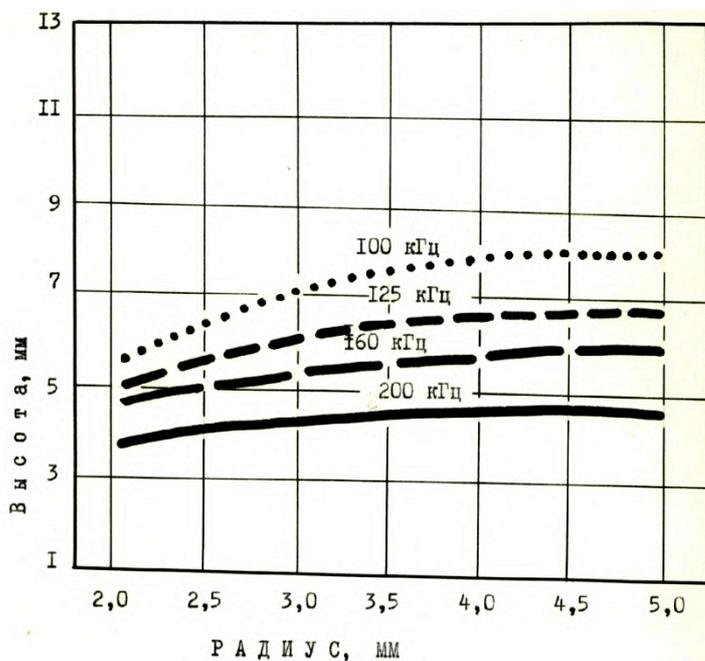


Рис.11. Соотношения размеров цилиндра, обеспечивающие минимальную неравномерность ДН на различных частотах

Исследованиям характеристик направленности цилиндрических преобразователей в настоящей статье уделено так много внимания еще и потому, что анализ полученных зависимостей приводит к достаточно неожиданному выводу о возможности создания широкополосных цилиндрических гидрофонов с характеристиками направленности более равномерными, чем в существующих конструкциях сферических гидрофонов. Дело в том, что реальные конструкции последних используют не идеальную сферическую форму пьезоэлемента, а только ее подобие. Как правило, сфера имеет относительно большое технологическое отверстие, что предопределяет наличие на ее частотной характеристике дополнительных (паразитных) резонансов на частотах значительно ниже резонанса радиально

моды колебаний. Например, гидрофон 1П4 имеет относительно большое отверстие (более половины диаметра сферы), и поэтому на некоторой частоте внутри его рабочего диапазона неравномерность ДН существенно превышает значение неравномерности на верхней частоте гидрофона. А вот гидроакустическая головка ГГ-3 с цилиндрическим чувствительным элементом радиусом 3 мм и высотой 5 мм (рабочий диапазон до 200 кГц) паразитных резонансов не имеет, и ее ДН существенно равномернее, что и показано на рис. 12.

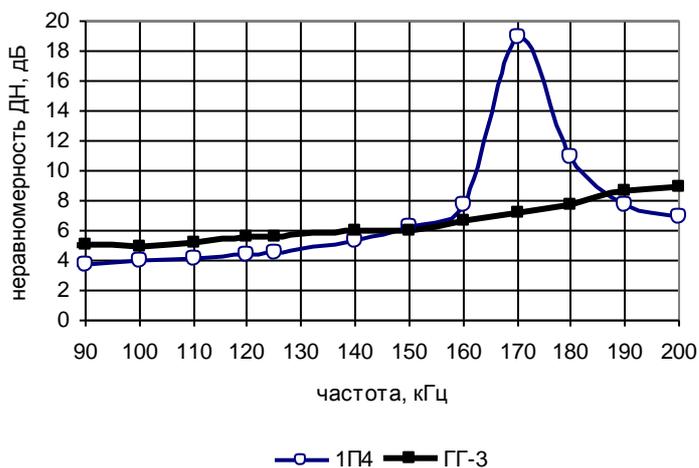


Рис.12. Частотные зависимости неравномерности измеренных ДН гидрофонов 1П3 и ГГ-3

Заметим, что представленные на рис. 12 результаты обычно не проявлялись при градуировке гидрофонов, т.к. в 1970-х годах измерения выполняли на градуировочном комплексе КОГС-1, который работал только на 1/3-октавных частотах. Но разработка новых гидрофонов потребовала применения другой аппаратуры с большим разрешением как по частоте, так и по амплитуде. Для обеспечения измерений характеристик направленности гидрофонов (макетов, прототипов и пр.) с требуемым разрешением силами сектора в инициативном порядке в цокольном помещении одного из корпусов был отрыт (вручную лопатами!) бассейн размерами 3×2×2 м, в яму которого был опущен кожух из нержавеющей стали. Дно и стенки бассейна были покрыты листами специальной звукопоглощающей резины. В этом «малом» бассейне была установлена современная аппаратура фирмы Брюль и Кьер, Дания, (самописец, генератор, усилитель, координатно-поворотное устройство, стробирующий модуль и пр.), что существенно повысило воспроизводимость результатов измерений. В 90-е годы, когда гидрофоны почему-то перестали быть нужными, аппаратуру сняли, а акустически

заглушенный бассейн был законсервирован и, к сожалению, не используется до сих пор.

4. Собственные шумы тангенциально-поляризованных гидрофонов

Применение тонкостенных цилиндрических пьезоэлементов с тангенциальной поляризацией, имеющих относительно малую электрическую емкость, позволяет существенно повысить чувствительность гидрофона, но требует применения интегрированного с пьезоэлементом преобразователя импеданса, чтобы обеспечить работу гидрофона на длинный кабель. Поэтому одновременно с разработкой пьезоэлемента оптимальной конструкции перед подразделением стояла задача создания малошумящего предварительного усилителя. В результате исследований В.З. Черникова и Л.П. Фещенко удалось разработать линейку таких предусилителей на полевых транзисторах с дистанционным переключением коэффициента усиления [5–7]. Конструктивно предусилитель размещался в отдельном унифицированном корпусе, устанавливаемом в герметичном корпусе гидрофона с возможностью доступа к предусилителю при необходимости его ремонта, замены и пр. В [8] выведены инженерные формулы для расчета собственных шумов тангенциально-поляризованных цилиндрических преобразователей, подтвержденные экспериментальными результатами, а в [9] получено выражение для оптимального количества электродов на тангенциально-поляризованном цилиндре по критерию минимума собственных шумов системы пьезопреобразователь-усилитель. Остановимся кратко на результатах этих исследований [8, 9].

Для рассмотрения собственных шумов гидрофона воспользуемся рис. 13, где пьезопреобразователь представлен генератором с напряжением $e_{пр}$ и емкостью $C_{пр}$, а усилитель – истоковым повторителем; C_0 и $C_{п}$ – входная емкость транзистора, включенного по схеме с общим стоком, и паразитная емкость входной цепи усилителя соответственно; R – сопротивление утечки усилителя; r – сопротивление нагрузки в истоковой цепи.

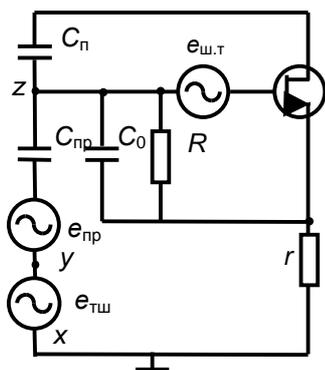


Рис. 13. Источники собственных шумов в гидрофоне с предварительным усилителем [9]

Эквивалентное шумовое давление $P_{шс}$ системы (гидрофон с предусилителем), под которым подразумевается акустическое давление плоской звуковой волны, вызывающее на входе предварительного усилителя (точки x и z на рисунке) напряжение, равное напряжению шумов системы в частотной полосе 1 Гц, можно выразить через эквивалентное шумовое давление преобразователя $P_{шпр}$ и усилителя $P_{шу}$:

$$\overline{P_{шс}^2} = \overline{P_{шпр}^2} + \overline{P_{шу}^2}. \quad (7)$$

В [8] получено выражение для квадрата эквивалентного шумового давления цилиндрического тангенциально-поляризованного преобразователя в виде

$$P_{шпр}^2 = \frac{B}{f} \left(\frac{F}{\gamma^2} - 1 \right) + Df^2, \quad (8)$$

где $B = \frac{kT \operatorname{tg} \delta}{\pi} \cdot \frac{m E_{ю} t}{\pi h a^3}$; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь материала преобразователя; $m = S_{11}/S_{33}$ – соотношение между податливостями материала; $E_{ю}$ – модуль Юнга; t – толщина стенки цилиндра; h и a – его высота и средний радиус; f – частота, на которой определяют $P_{шпр}$;

$F = (2\pi h a^3)/(C_{пр} m E_{ю} t)$; $C_{пр} = (\varepsilon t h n^2)/(2\pi a)$; ε – диэлектрическая проницаемость материала; $\gamma = (2\pi a^2 d_{33})/(n t \varepsilon)$ – чувствительность пьезопреобразователя; d_{33} – его пьезомодуль; $D = kT4\pi\rho/c$; ρ и c – плотность воды и скорость звука в ней.

Эквивалентное шумовое давление усилителя складывается из эквивалентного шумового давления из-за напряжения тепловых шумов $e_{тш}$, приведенного к зажимам x и y генератора (см. рисунок), эквивалентного шумового давления, вызванного током утечки затвора I_3 , и эквивалентного шумового давления из-за теплового шума канала полевого транзистора $e_{штр}$ и его части, прошедшей во входной цепи через емкость затвор-канал. Из [5, 6] и рис. 13 в предположении, что сопротивление, обуславливающее шум, наведенный во входной цепи через емкость затвор-канал, практически равно нулю, получаем

$$\overline{P_{шу}^2} = \frac{1}{\gamma^2 C_{пр}^2} \left\{ \frac{4kT}{\omega^2 R} + \frac{2eI_3}{\omega^2} + \overline{e_{штр}^2} \left[(C_{пр} + C_0 + C_{п})^2 + \frac{1}{\omega^2 R^2} \right] \right\}, \quad (9)$$

где ω – круговая частота, e – заряд электрона.

Следует отметить, что сопротивление утечки R и емкость преобразователя $C_{пр}$ определяют частоту среза $\omega_c = (RC_{пр} rS)^{-1}$, где S – крутизна транзистора. После подстановки (8) и (9) в (7) получим

$$\overline{P_{шс}^2} = \frac{4kT \operatorname{tg} \delta t}{\omega^2 h a^3} \left(\frac{\varepsilon}{d_{33}^2} - m E_{ю} \right) + \frac{kT \rho \omega^2}{\pi C} + \frac{1}{a^2 h^2 n^2 d_{33}^2} \times \left\{ \frac{2kT \omega_c r S \varepsilon t h n^2}{\omega^2 \pi a} + \frac{2e I_3}{\omega^2} + \right. \\ \left. + e_{штр}^2 \left[\left(\frac{\varepsilon t h n^2}{2\pi a} + C_0 + C_n \right)^2 + \frac{\varepsilon^2 t^2 h^2 n^4 r^2 S^2 \omega_c^2}{4\pi^2 a^2 \omega^2} \right] \right\}. \quad (10)$$

Анализируя (10) в отношении минимизации шумов, следует иметь в виду следующее: диаметр и высоту чувствительного элемента гидрофона увеличивать нельзя, поскольку эти параметры выбираются из соображений обеспечения заданной равномерности частотной характеристики и диаграммы направленности гидрофона [3, 4]; уменьшать толщину стенки цилиндра беспрельдно также нельзя из технологических соображений и заданной прочности гидрофона к гидростатическому давлению; все параметры выбранного транзистора и характеристики пьезокерамики известны.

Таким образом, чтобы обеспечить наименьшие собственные шумы гидрофона, следует определить оптимальное число электродов тангенциального пьезопреобразователя. Эту задачу можно решить нахождением минимума зависимости $\overline{P_{шс}^2}$ от n . На заданной нижней частоте ω_n рабочего диапазона гидрофона, т.е. при $\omega_n = \omega_c = \omega$ искомое число n_0 равно

$$n_0 = \left(\frac{2\pi a}{\varepsilon t h} \right)^{1/2} \left[\frac{2e I_3}{e_{штр}^2 \omega_n^2 (r^2 S^2 + 1)} + \frac{(C_0 + C_n)}{r^2 S^2 + 1} \right]^{1/4}. \quad (11)$$

Согласно (11) n_0 не зависит от пьезоактивности материала, а определяется при известных параметрах транзистора лишь размерами пьезопреобразователя и диэлектрической проницаемостью материала, из которого он сделан.

В [8] было рассчитано эквивалентное шумовое давление цилиндрического преобразователя из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 6 мм, высотой 5 мм и толщиной стенки 0,3 мм, имеющего четыре электрода [8]. Предварительно измеренные значения его электрофизических параметров составляли: $\operatorname{tg} \delta = 0,017$, $C_{пр} = 33$ пФ и $\gamma = 550$ мкВ/Па (на частотах от 10 Гц до 100 кГц). По расчетным данным построена зависимость эквивалентного шумового давления этого пьезоэлемента от частоты (кривая 1 на рис. 15). Правильность расчета оценивалась по результатам измерений собственных шумов усилителя $P_{шс} = e_{шс} / K_y \gamma$ (K_y – коэффициент усиления

усилителя; γ – чувствительность пьезоэлемента) и гидрофона в целом $P_{шс}$. Измерения выполняли на установке, блок-схема которой показана на рис.14.

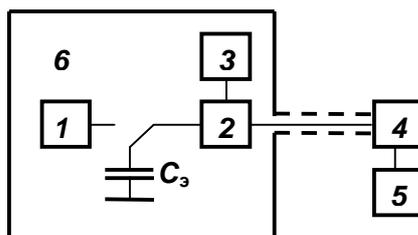


Рис. 14.– Блок-схема установки для измерения собственных шумов [8]

1 – преобразователь (гидроакустическая головка); 2 – предусилитель гидрофона; 3 – аккумуляторы; 4 – анализатор спектра V&K 2114; 5 – осциллограф; 6 – экранированная акустически заглушенная камера; C_3 – малозумящая электрическая емкость КМ-5а-НЗО

Спектральную плотность собственных шумов усилителя измеряли при подключении к его входу емкости, равной емкости преобразователя $C_{пр}$, а при подключении преобразователя измеряли спектральную плотность шумов $P_{шс}$ гидрофона в целом. Эквивалентное шумовое давление преобразователя получали в предположении некоррелированности его шумов и шумов усилителя как

$$P_{шпр} = \sqrt{e_{шс}^2 - e_{шy}^2} / K_y \gamma. \quad (12)$$

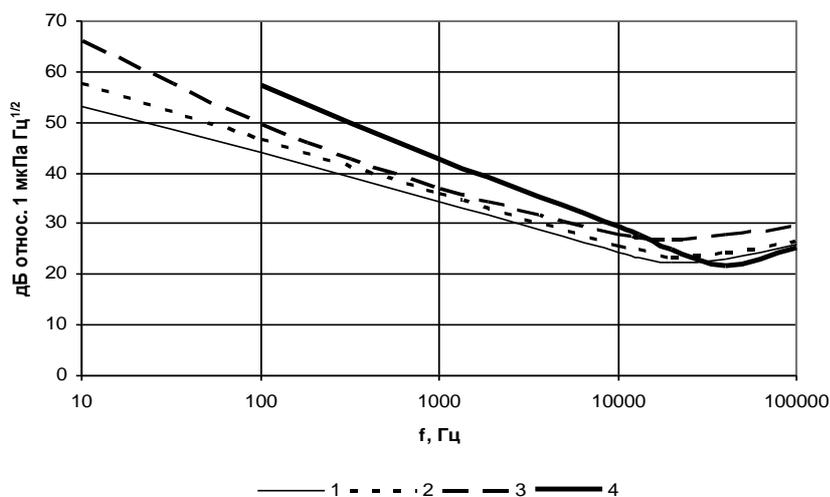


Рис. 15. Спектральная плотность расчетных собственных шумов преобразователя (кривая 1), их измеренных значений (кривая 2), шумов гидрофона в целом (кривая 3) и шумов моря (кривая 4) [8]

По измеренным значениям построена частотная зависимость $P_{ш}$ пр (кривая 2 на рис. 15), которая свидетельствует о хорошем совпадении теоретических (кривая 1) и экспериментальных (кривая 2) результатов. Кривая 3 на рис. 15 характеризует измеренную частотную зависимость шума гидрофона в целом. Ее сопоставление с кривой 4, представляющей шум глубокого моря при отсутствии волнения (шумы Кнудсена [10]), показывает возможности исследованного гидрофона.

Проведенный в 1970-х годах [5–9] анализ показал пути минимизации собственных шумов системы преобразователь – усилитель, т.е. гидрофона в целом, и позволил устранить неопределенность, существовавшую в практике конструирования высокочувствительных преобразователей с тангенциальной поляризацией и связанную с произвольным выбором числа его электродов. Обоснованное применение полевых транзисторов с улучшенными шумовыми характеристиками и грамотное конструктивное исполнение предусилителя, интегрированного с гидроакустической головкой, позволили создать широкополосные высокочувствительные гидрофоны, собственный шум которых был существенно ниже шумов окружающей среды. Найденные технические решения практически не превзойдены до сих пор. Последующие разработки предварительных усилителей в других подразделениях ВНИИФТРИ спустя и 20, и даже 35 лет, основанные на применении новой элементной базы (в основном, импортных микросхем) [11, 12], не привели к значимому прорыву в снижении их шумовых характеристик, а значит, и к существенному повышению чувствительности гидрофонов для измерения ими слабых сигналов.

5. Гидрофонно-кабельное устройство ГКУ-75

Создание гидрофонно-кабельного устройства ГКУ-75 стало логичным завершением описанных выше поисковых работ по выбору и обоснованию основных решений построения высокочувствительного широкополосного гидрофона. Разрабатываемые гидрофоны были предназначены для комплектации переносных гидрофонно-кабельных устройств ГКУ-75 и приемной системы, опускаемой на лебедке с судна. Разработка ГКУ-75 полностью была возложена на наше подразделение, а приемной системы – на подразделение, возглавляемое Г.А. Розенбергом. Это означало, что, помимо собственно гидрофонов, нам необходимо было разработать и систему постановки гидрофона в море для их работы по прямому назначению.

Реализация найденных решений по выбору пьезоэлементов и разработке малошумящего предварительного усилителя потребовала создания надежной конструкции гидрофона.

Стоит напомнить, что гидрофоны такой конструкции были новы для отечественного гидроакустического приборостроения, подобных гидрофонов в нашей стране не выпускалось.

В результате упорного макетирования по выбору конструкции и компоновки гидрофонов (см. рис. 16) мы остановились на унифицированной конструкции гидрофона.

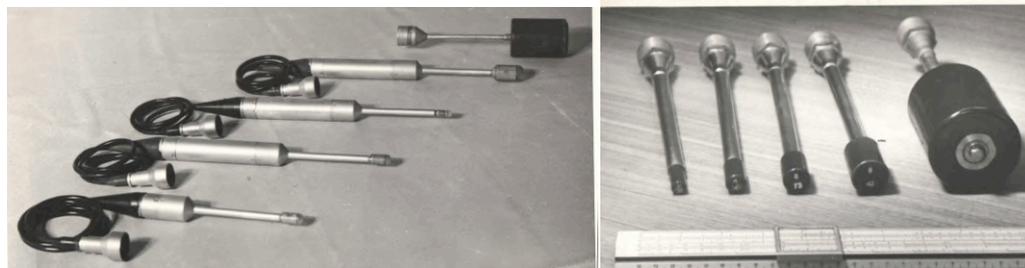


Рис. 16. Макеты гидрофонов для ГКУ-75

На рис. 17 представлены фотографии разработанных гидроакустических головок ГГ-4, ГГ-3, ГГ-2, ГГ-1, ГГ-2А и ГГ-3А, серийно выпускавшихся, а на рис. 18 – гидрофоны ГИ-1, ГИ-2, ГИ-3 и ГИ-4, вошедшие в состав ГКУ-75. Гидрофоны поставлялись комплектами в составе до 5 экземпляров разного типа (см. рис. 19).



Рис. 17. Гидроакустические головки ГГ-4, ГГ-3, ГГ-2, ГГ-1, ГГ-2А и ГГ-3А (слева направо)

Одной из проблем, которую необходимо было решить, была разработка системы постановки одиночного гидрофона на заданную позицию с дрейфующего судна. Дрейф судна исключал возможность постановки гидрофона на грунт, что практиковалось ранее при подобных измерениях. Подвешенный же гидрофон подвергается в воде вертикальным перемещениям из-за естественной качки судна, вызванной морским волнением. Поэтому физическая компенсация качки гидрофона, подвешенного с борта судна, представлялась особенно актуальной.



Рис. 18. Гидрофоны ГИ-1, ГИ-2, ГИ-3 и ГИ-4



Рис. 19. Один из вариантов комплекта поставки гидрофонов для ГКУ-75

Нами были проведены многочисленные эксперименты различных способов демпфирования вертикальных колебаний гидрофона. В итоге остановились на простом и удобном в реализации способе, при котором вертикальные колебания трос-кабеля трансформируются в горизонтальные перемещения гидрофона (автор идеи – В.З. Черников). Схема постановки ГКУ-75 показана на рис. 20.

ГКУ-75 был принят в эксплуатацию и серийно выпускался ОЗ ВНИИФТРИ в течение около 10 лет. Основные конструктивные решения, принятые при его создании, были в той или иной мере тиражированы практически во всех приемных системах, разрабатываемых ВНИИФТРИ позднее.

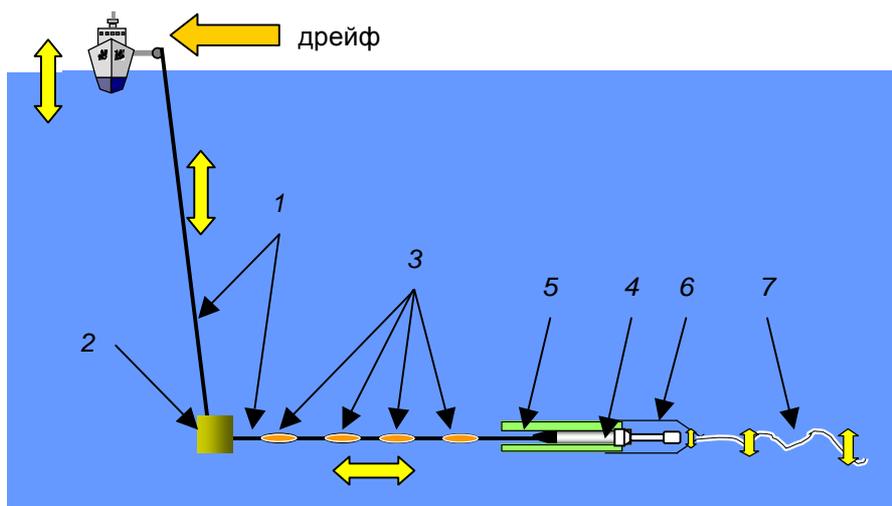


Рис. 20. Схема постановки ГКУ-75 с дрейфующего судна

1 – трос-кабель; 2 – груз с барабаном для закрепления трос-кабеля; 3 – съемные поплавки; 4 – гидрофон; 5 – поплавок для гидрофона; 6 – ограждение гидрофона; 7 – гибкий стабилизатор

6. Серийное производство и авторский надзор

В 1970–80-годы большинство выполняемых нами опытно-конструкторских работ заканчивалось приемочными (межведомственными) испытаниями и передачей конструкторской документации в производство (Опытный завод – ОЗ). Для серийного изготовления разработанных нами гидрофонов на ОЗ был создан специальный цех (участок № 4), реализующий весь цикл их производства – от изготовления пьезоэлементов до герметизации собранных гидрофонов.

Этот цикл включал около 30 операций, каждая из которых имеет свои особенности, зависящие не только от сути самого процесса, но и от типа изготавливаемых гидрофонов. Обучение работников участка № 4 новым технологическим приемам, предварительно разработанным и освоенным сотрудниками нашего сектора, проводилось при нашем непосредственном участии; работники ОЗ стажировались на опытно-технологической базе нашего подразделения, а наши специалисты проводили отладку производственных процессов на оборудовании участка № 4. Впоследствии эти отношения закрепились в виде авторского надзора за серийным производством разработанных нами гидрофонов. Несомненная заслуга в налаживании этого эффективного взаимодействия между научными и производственными подразделениями принадлежит Г.И. Белашенко.

Альманах современной метрологии, 2016, №7

Конструкторская документация на гидрофоны разрабатывалась СКБ ВНИИФТРИ по нашим эскизам, и его работников называли конструкторами. А нас – «разработчиками». Ну и ответственность за качество изготавливаемой на ОЗ продукции, в основном, возлагалась не на конструкторов, а на разработчиков, поэтому все готовые чертежи визировали мы. Автору этих строк неоднократно приходилось выезжать к потребителям для рассмотрения рекламаций. Чтобы снизить их до минимума пришлось разработать систему пооперационных проверок и испытаний изготавливаемой продукции на всех стадиях ее производства [14]. Эта система сопровождалась ведением технологического паспорта на каждый экземпляр изготавливаемого гидрофона, в котором расписывались исполнители каждой операции и результаты испытаний (проверки) по ее окончанию представителем ОТК. Такая система действует до сих пор, только уже не на заводе, а в нашем подразделении.

Не могу здесь не упомянуть об Опытном заводе ВНИИФТРИ. Его структура позволяла реализовывать «в металле» практически любые «задумки» научных подразделений института без привлечения других производственных контрагентов. ОЗ постоянно расширял свои технологические возможности. Технологический отдел завода имел классных специалистов, способных разработать эффективные технологические процессы станочного, полимерного, вакуумного, гальванического и прочих производств. Инструментальный цех изготавливал высокоточные технологические формы для литья (пьезокерамики, пластмасс и пр.), заливки гидрофонов компаундом, опрессовки изделий резиновыми смесями, изготовления различных резинотехнических изделий и пр. Поэтому нам, как разработчикам, не было нужды озабочиваться возможностью или невозможностью изготовления изделий той или иной формы – все наши разработки реализовывались. К сожалению, с началом перестройки этот цех был ликвидирован одним из первых. Потом настала очередь участка № 4 (заказов на гидрофоны не стало), а затем и других цехов. Только наше подразделение сумело сохранить технологическую базу для мелкосерийного производства гидрофонов.

7. Комплект измерительных гидрофонов КИГ

Оценив успешные результаты по созданию гидрофонов для ГКУ-75, в 1976 г. нам было предложено подготовить комплект измерительных гидрофонов для участия в национальных выставках СССР за рубежом. И несмотря на то, что это задание имело не коммерческий, а только престижный характер, мы с энтузиазмом взялись за его выполнение. Было

решено, что гидрофоны должны иметь принципиально новую конструкцию, меньшие габаритные размеры и, главное, лучшие метрологические характеристики, чем достигнутые при разработке ГКУ-75. В итоге был разработан комплект измерительных гидрофонов КИГ, состоящий из двух гидрофонов (рис. 21), работающих в частотных диапазонах от 0,1 Гц до 20 кГц (Г1) и от 20 Гц до 200 кГц (Г2).



Рис. 21. Гидрофоны выставочного комплекта КИГ

Для сравнения с характеристиками лучших зарубежных гидрофонов на рис. 22 представлены частотные характеристики чувствительности гидрофона Г2 и одного из наиболее высокочастотных гидрофонов фирмы Brüel&Kjær (В&К 8103), а на рис. 23 – их диаграммы направленности в вертикальной плоскости на частоте 200 кГц. Характеристики гидрофона В&К 8103 взяты из технической документации фирмы на этот гидрофон, а характеристики гидрофона Г2 измерены во ВНИИФТРИ на установке КОГС-1.

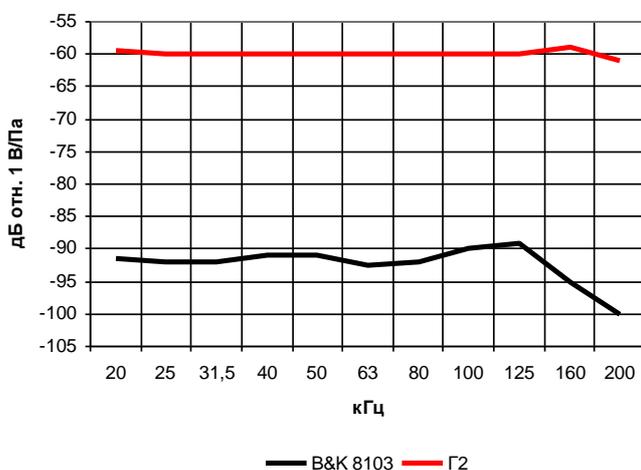


Рис. 22. Частотные характеристики чувствительности гидрофонов В&К 8103 и Г2

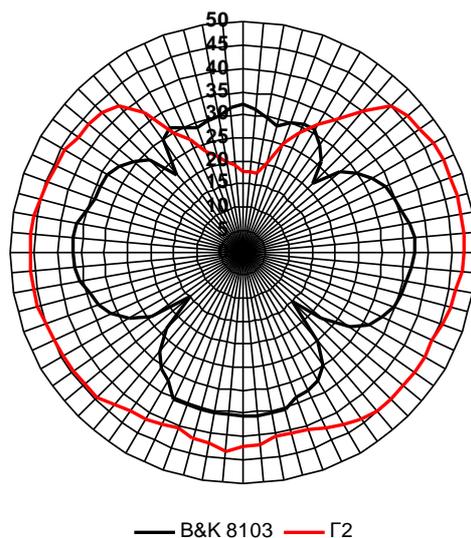


Рис. 23. Диаграммы направленности гидрофонов В&К 8103 и Г2 в вертикальной плоскости на частоте 200 кГц

В состав комплекта включен пульт управления для переключения режимов работы гидрофонов (одного или двух одновременно), подачи электропитания на предусилители (однополярного $+(12-19)\text{В}$) с выходными разъемами типа СР-50. Комплект размещен в двух кейсах (типа «Дипломат»). Комплект был разработан исключительно силами нашего подразделения, им же были полностью изготовлены несколько экземпляров КИГ. Дизайн комплекта представлен на рис. 24.

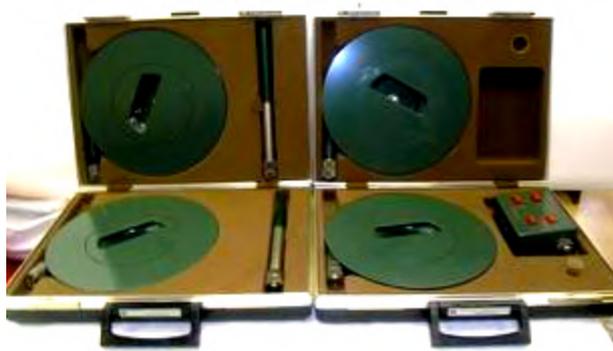


Рис. 24. Выставочный образец комплекта гидрофонов КИГ

Комплект экспонировался на национальных выставках СССР в Париже (1977 г.), Лондоне (1979 г.) и в Барселоне (1981 г.). По свидетельствам участников этих выставок, рекламные проспекты на гидрофоны разбирались

уже в первый день их работы. Стыдно за организаторов выставок, не обеспечивших требуемого количества рекламных листовок, а вот за гидрофоны не стыдно и сегодня. Их характеристики остаются непревзойденными до сих пор, т.е. спустя 40 лет.

8. Акцент на метрологию

В 1978-83 г.г. наше подразделение выполняло две крупные опытно-конструкторские работы. Работы шли параллельно с разработкой поверочной аппаратуры, выполняемой другими подразделениями научно-исследовательского отделения.

Требовалось разработать образцовые и вспомогательные гидрофоны для оснащения ими ведомственных метрологических служб. Учитывая положительный опыт создания выставочного комплекта, было решено выполнить полномасштабную ОКР (с выпуском КД и ее передачей на ОЗ для серийного производства) с внедрением наработок, реализованных в КИГ. Были разработаны два комплекта гидрофонов – КИГ-1 и КИГ-2. Комплект КИГ-1 включал гидрофоны – ГИ-13 и ГИ-14, аналогичные выставочным Г1 и Г2, и гидрофон ГИ-12 с тангенциально-поляризованным цилиндрическим элементом диаметром 10 мм. Последний был добавлен в комплект для того, чтобы при необходимости можно было перекрыть более широкий диапазон частот, чем у двух первых гидрофонов. Отличие КИГ-1 от КИГ заключалось и в том, что в комплект поставки входили только 3 сигнальных трос-кабеля, аккумуляторный блок питания оригинальной конструкции и более функциональный пульт управления (рис. 25).



Рис. 25. Комплект измерительных гидрофонов КИГ-1

Комплект КИГ-2 состоял из одного гидрофона ГИ-15, двух гидрофонов ГИ-11, сигнальных кабелей с вьюшками и соединительной коробки.



Рис. 26. Комплект измерительных гидрофонов КИГ-2

Гидрофон ГИ-15 предназначался для применения в качестве гидрофона сравнения при калибровках методом сравнения в камерах малого объема, а гидрофоны ГИ-11 - в качестве излучателей и обратимых преобразователей при реализации градуировок гидрофонов методом взаимности в свободном поле. Оригинальная составная конструкция ГИ-11 позволяла проводить градуировки гидрофонов в измерительном бассейне во всем его диапазоне частот (от 3,15 до 200 кГц) без трудоемких процедур замены пар преобразователей (обратимого и излучателя) на штангах, что существенно сокращало время, затрачиваемое на калибровку. Основные составные части комплекта показаны на рис. 26.

Работа была завершена в 1982 г. Разработанными в ее рамках гидрофонами намеревались оснастить поверочные установки, разрабатываемые для ведомственных метрологических служб. Но в связи с тем, что эта работа была поставлена существенно позже, чем предыдущая, а сроки ее выполнения затягивались и ее завершение совпало с началом перестройки, то решение о принятии этой аппаратуры в эксплуатацию не состоялось. Это сказалось и на судьбе гидрофонов КИГ-1 и КИГ-2; их серийного производства не производилось.

Целью госбюджетной работы было создание образцовых и вспомогательных гидрофонов для проведения метрологических работ различного назначения, и прежде всего на поверочной аппаратуре: в измерительных камерах и гидроакустических бассейнах. Учитывая большой опыт использования гидрофонов 1ПИ2, 1ПЗ и 1П4 (см. выше), применяемых в организациях государственной и ведомственных метрологических служб, конструктивные особенности используемой градуировочной

аппаратуры, использующей сферические гидрофоны, да и доверие (не всегда оправданное) гидроакустиков к сферическим элементам как ненаправленным приемникам и излучателям, было принято решение разработать новый комплект образцовых и вспомогательных гидрофонов со сферическими пьезоэлементами.



Рис. 27. Внешний вид гидрофонов ГИ-7, ГИ-10, ГИ-8 и ГИ-9 (слева направо)

В итоге был создан ряд гидрофонов ГИ-6, ГИ-7, ГИ-8, ГИ-9 и ГИ-10 со сферическими элементами диаметром 40, 20, 7, 5 и 10 мм соответственно. Внешний вид гидрофонов ГИ-7, ГИ-8, ГИ-9 и ГИ-10 показан на рис. 27.

В частотных диапазонах от 1 Гц до 20 кГц (для ГИ-6), от 1 Гц до 40 кГц (для ГИ-7), от 10 до 200 кГц (для ГИ-8 и ГИ-9) и от 10 до 160 кГц (для ГИ-10) неравномерность частотной характеристики гидрофонов не превышала 5 – 6 дБ. По основным метрологическим характеристикам гидрофоны соответствовали требованиям стандарта МЭК 500 на эталонные гидрофоны. При поставке гидрофоны комплектовались в зависимости от условий заказа, обычно в укладочных ящиках по 2 гидрофона в каждом (см. рис. 28).



Рис. 28. Один из вариантов комплекта поставки

Гидрофоны успешно экспонировались на национальной выставке СССР в Дюссельдорфе (1982 г.) и неоднократно на международных выставках в Москве (до 1986 г.). Гидрофоны серийно выпускались Опытным заводом с 1980 по 1990 г.г.

9. Решение проблем с гидроустойчивостью

Гидрофоны с тангенциально-поляризованными цилиндрическими пьезоэлементами, впервые примененные в ГКУ-75 и ПУ226, предназначались для относительно кратковременного (не более 8 ч) непрерывного пребывания в воде с последующим нахождением на воздухе в течение не менее 8 ч. При таких условиях применения они были вполне гидроустойчивы, т.е. сохраняли в заданных пределах свои характеристики. Однако «аппетиты» потребителей росли, и наши гидрофоны стали использовать в других режимах – с длительным (несколько суток и более) нахождением гидрофонов в воде. Оказалось, что в этих условиях гидрофоны стали изменять свои характеристики: их выходной электрический импеданс стал падать, что проявлялось, прежде всего, в появлении низкочастотного завала на частотной характеристике чувствительности гидрофона. Пошли рекламации и возникла проблема с их погашением. Решение этой проблемы оказалось непростым, к нему мы пришли только в результате многочисленных исследований механизмов проникновения влаги к чувствительному элементу, заключающихся:

1) в проникновении воды (паров воды, молекул воды) через герметизирующее покрытие и, как следствие, в адсорбции влаги на поверхности пьезоэлемента, а затем проникновении влаги в его объем из-за пористости пьезокерамики;

2) в проникновении влаги через конструкционные неоднородности (места склейки, стыковки, уплотнения и пр.);

3) в накоплении влаги во внутреннем объеме преобразователя, что приводит к ее адсорбции на внутренней поверхности пьезоэлемента;

4) в гидrolитической деструкции герметизирующих покрытий, клеевых соединений и пр., проявляющейся в разрушении конструкции преобразователя.

Для исключения воздействия этих механизмов применяют следующие методы:

конструктивный, связанный, прежде всего, с выбором типа пьезоэлемента и способов его заделки в конструкцию преобразователя. Из общих соображений ясно, что радиально-поляризованные чувствительные элементы (сферические или цилиндрические), имеющие сплошную металлизацию на внешней поверхности пьезоэлемента, более гидроустойчивы, чем цилиндрические преобразователи с тангенциальной

Альманах современной метрологии, 2016, №7

поляризацией, на наружной поверхности которых попеременно нанесены электроды противоположной полярности;

технологический, определяемый выбором материала герметизирующего покрытия и способов его нанесения.

Эти методы реализуются различными путями, в том числе, например:

применением маслозаполненных конструкций (например, в американских гидрофонах типа F36, H23 и др. [15]). Этот способ имеет ряд существенных ограничений, связанных с применением жесткого каркаса для формирования маслозаполненной звукопрозрачной оболочки, приводящей все же к искажениям характеристик направленности гидрофона;

использованием различных композитных покрытий, сочетающих относительно толстые слои металла с электроизоляционными жидкостями и полимерными материалами [16]. Этот способ применяется обычно в низкочастотных преобразователях относительно больших размеров, когда наличие толстых промежуточных слоев мало сказывается на характеристиках таких устройств.

Эти способы известны и опубликованы в литературе. Отмечено, что герметизация тангенциально-поляризованных пьезоэлементов с помощью эластичных компаундов, хотя и проницаемых в принципе для молекул воды (вследствие малости последних они диффундируют практически через все полимеры, причем показатели водопоглощения для разных материалов отличаются всего на 1 – 2 порядка [16]), находит, тем не менее, широкое применение вследствие следующих обстоятельств:

изменения параметров преобразователя в процессе его нахождения в воде и последующей просушки на воздухе носят обратимый характер, причем время восстановления параметров при просушке приблизительно равно времени ухудшения его свойств при «замокании»;

при длительном нахождении в воде изменение параметров гидрофона постепенно замедляется по мере насыщения полимера молекулами воды;

после такого насыщения внутреннее сопротивление преобразователя постоянному току может быть все еще достаточно высоким, чтобы обеспечить его работу в звуковой или ультразвуковой области частот.

Такое поведение преобразователей, герметизированных компаундом КТ-102, проиллюстрировано на рис. 29 [17].

Указанные факты дают возможность в некоторых случаях (если, например, время непрерывного нахождения гидрофона в воде не превышает 3 – 7 суток, а продолжительность последующего «просушивания» больше недели или нижняя частота рабочего диапазона частот гидрофона ограничена 50 – 100 Гц) использовать этот способ герметизации и для тангенциально-поляризованных гидрофонов.

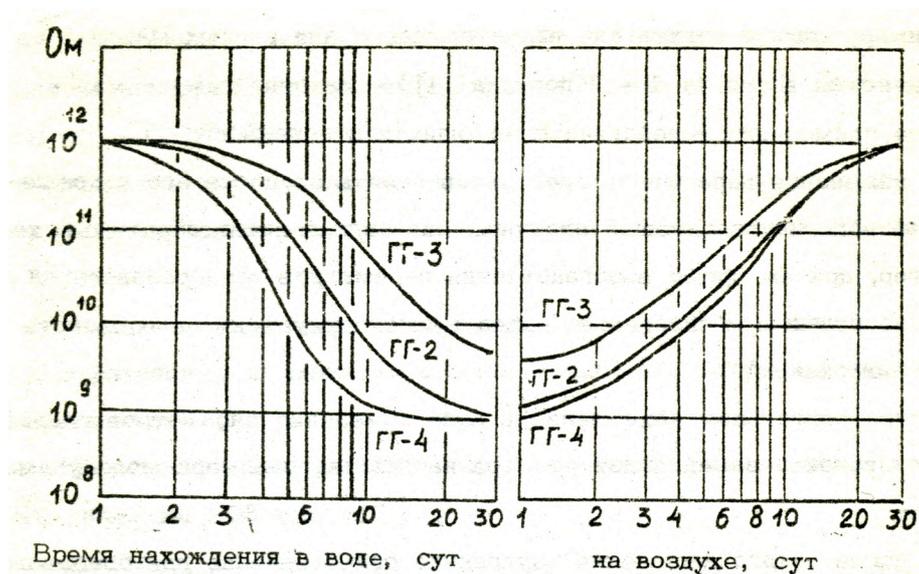


Рис.29. Зависимость внутреннего сопротивления постоянному току от времени нахождения в воде и последующей просушки на воздухе для гидроакустических головок ГГ-2, ГГ-3 и ГГ-4 из состава ГКУ-76 [17]

Однако для кардинального повышения гидроустойчивости высокочувствительных ненаправленных преобразователей без существенного ухудшения их параметров и обеспечения возможности длительного (год и более) нахождения их в воде нами был разработан свой способ, суть которого заключается в нанесении на поверхность герметизирующего пьезоэлемент компаунда с подложкой сплава, состав которого был подобран в результате многочисленных экспериментов. Идея этого метода герметизации принадлежит нашему подразделению, а его технологическая проработка выполнена сотрудниками СКБ ВНИИФТРИ В.Д. Тидебель и В.А. Звездиной. Технология была внедрена на ОЗ ВНИИФТРИ, но сейчас там она утеряна. В нашем подразделении она поддерживается до сих пор.

10. Гидроустойчивые гидрофоны

Разработанный способ герметизации оказался настолько эффективным, что инициировал ряд ОКР по разработке новых гидрофонов, способных непрерывно находиться в воде практически неограниченное время. Для комплектования стационарных приемных систем нами были разработаны гидроакустические головки ГГ-1М, ГГ-24, ГГ-25 и ГГ-26, схожие по конструкции и характеристикам головкам ГГ-1, ГГ-2, ГГ-3 и ГГ-4

соответственно (из состава ГКУ-75), но имеющие металлизированное покрытие между двумя слоями компаунда (рис. 30). Результаты их эксплуатации впечатляют. Например, гидроакустические головки ГГ-26 эксплуатируются в течение 25 лет без существенных изменений их метрологических характеристик. Их планируют использовать и в новых разработках ФГУП «ВНИИФТРИ»: для этого в 2015 г. нашей лабораторией изготовлены и сданы в эксплуатацию 40 экземпляров ГГ-26. Эти головки прошли испытания с целью утверждения типа и включены в Государственный реестр средств измерений, допущенных к применению в Российской Федерации.



Рис. 30. Гидроакустические головки ГГ-25, ГГ-26, ГГ-24 и ГГ-1М (слева направо)

Необходимость в применении такого же способа герметизации возникла и для сферических гидрофонов, пьезоэлементы которых склеены из двух полусфер (см. выше в гидрофонах (ГИ-6 – ГИ-10)). Дело в том, что проникновение влаги через компаунд приводило к выходу гидрофона из строя при его длительном использовании. Для устранения этого недостатка был разработан новый комплект сферических гидрофонов ГИ-19, ГИ-20, ГИ-21, ГИ-22 и ГИ-23, которые стали применяться в качестве эталонных и вспомогательных гидрофонов при проведении метрологических работ. По сравнению с аналогами (гидрофонами ГИ-6 – ГИ-10) их конструкция была несколько изменена (рис. 31).

Усовершенствованная конструкция этих гидрофонов обеспечила высокую временную стабильность их характеристик, поэтому гидрофоны ГИ-19 и ГИ-20 были задействованы в нескольких международных сличениях [18 – 20] в качестве эталонов-переносчиков. Гидрофоны выпускались ОЗ ВНИИФТРИ с 1987 г. до начала 90-х годов прошлого века.



Рис. 31. Гидрофоны ГИ-20 (внизу) и ГИ-21

11. Гидрофонно-кабельное устройство ГКУ-А

В середине 1980-х годов наше подразделение выполняло работу, целью которой было создание судовых приемных устройств для измерения подводного шума морских объектов. Разработка одного из создаваемых устройств – гидрофонно-кабельного устройства ГКУ-А – была полностью завершена (с утверждением ТУ и передачей КД на завод-изготовитель). Особенности изделия были:

- рабочий диапазон частот от 1 Гц до 20 кГц;
- обеспечение двухканального приема двумя гидрофонами, разнесенными в пространстве на заданную дистанцию;
- эффективная система компенсации качки, аналогичная примененной в ГКУ-75;
- автономное питание всей измерительной аппаратуры от аккумуляторов и возможность проведения измерений с любого плавсредства;
- наличие двух сигнальных трос-кабелей с удобными вьюшками;
- низкий уровень собственных шумов приемного тракта за счет использования гидроакустической головки ГГ-16 с двумя соосно расположенными и соединенными параллельно цилиндрическими пьезоэлементами;
- возможность измерения более слабых сигналов за счет повышения пространственной избирательности гидрофона;
- применение металлизации компаундного покрытия преобразователя как для повышения его гидроустойчивости, так и для снижения влияния внешних электромагнитных помех, наводимых судном-носителем;
- брызгозащищенные корпуса для измерительного блока и блока питания.

Разобранный гидрофон с гидроакустической головкой ГГ-16, предварительным усилителем, прочным корпусом и кабелем на вьюшке показан на рис. 32, а на рис. 33 - его укладка для транспортировки, включающая 4 места (один из кейсов для укладки второго гидрофона с

принадлежностями не показан).

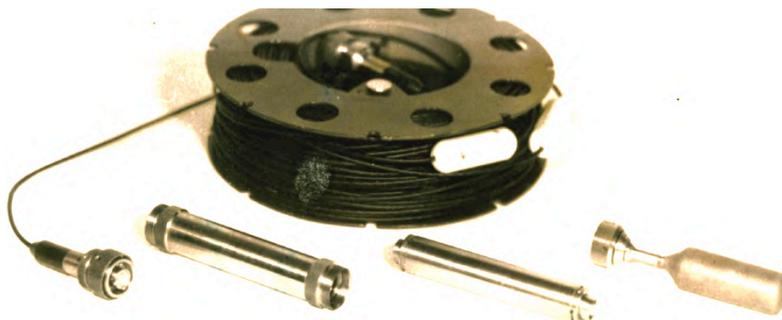


Рис. 32. Гидрофон с гидроакустической головкой ГГ-16, предварительным усилителем и кабелем на вьюшке из комплекта ГКУ-А

Испытания ГКУ-А подтвердили высокую функциональную эффективность устройства как универсального инструмента для измерения подводного шума, возможность проведения с его помощью нестандартных измерений с любого плавсредства, в том числе и измеряемого. Как отмечено выше, гидрофонно-кабельное устройство ГКУ-А успешно выдержало приемочные испытания и было принято в эксплуатацию. Однако с началом перестройки это решение не было подкреплено заказами на серийное изготовление.



Рис. 33. ГКУ-А в упаковке для транспортирования (второй кейс с гидрофоном и принадлежностями не показан)

12. Выпуск гидрофонов в годы перестройки и в настоящее время

В 1990-е годы заказов на изготовление гидрофонов практически не было. Опытный завод ВНИИФТРИ утратил технологические возможности для выпуска гидрофонов. Однако наше подразделение сумело сохранить кадровый потенциал и оборудование для мелкосерийного производства гидрофонов. В этих непростых условиях мы обеспечивали немногочисленные заказы наших подразделений на изготовление гидрофонов, не только разработанных нами в прежние годы, но и новых, по разработкам научно-исследовательских комплексов ВНИИФТРИ. Рассмотрим некоторые из новых конструкций.

Бескорпусные гидрофоны

Это гидрофоны со сферическими пьезоэлементами диаметром 40 мм (ОП-1), 20 мм (ОП-2) и 7 мм (ОП-3), практически не имеющие металлического корпуса и предназначенные для обеспечения метрологических работ в гидроакустическом бассейне в качестве излучателей и обратимых преобразователей при реализации метода взаимности в свободном поле. Их конструкция должна снижать искажения измеряемого поля, вызванные отражениями от самого преобразователя. Конструкция гидрофонов относительно проста. Гидрофоны изготавливались для комплектации рабочих эталонов 2-го разряда, поставляемых ФГУП «ВНИИФТРИ» ведомственным метрологическим службам. Таких гидрофонов выпущено около 50 шт. Внешний вид гидрофонов ОП представлен на рис. 34.



Рис. 34. Гидрофоны ОП-1, ОП-2 и ОП-3 (слева направо)

Гидрофоны ОП-80 были разработаны и изготовлены нами для

обеспечения низкочастотных градуировок в гидроакустическом бассейне ФГУП «ВНИИФТРИ». Использованный в них сферический пьезоэлемент диаметром 80 мм существенно повышал чувствительность преобразователя на прием и излучение, что позволило сдвинуть вниз нижнюю границу градуировок гидрофонов методом взаимности в свободном поле. Для уменьшения искажений измеряемого звукового поля гидрофон сконструирован как бескорпусной. Была изготовлена партия из 10 шт., но велика вероятность их тиражирования при создании гидроакустических эталонов нового поколения. Внешний вид гидрофона ОП-80 показан на рис. 35.



Рис. 35. Гидрофон ОП-80

Эталонные гидрофоны

В конце 1980-х годов было принято решение о расширении метрологического обеспечения гидроакустических измерений в высокочастотную область: с 200 до 1000 кГц. С этой целью в научно-исследовательском комплексе гидроакустических измерений ВНИИФТРИ были поставлены две работы по модернизации Государственного эталона единицы звукового давления в водной среде и по разработке образцовых гидрофонов, обеспечивающих передачу воспроизводимой им единицы нижестоящим (по поверочной схеме) средствам измерений. Первая из этих работ завершилась утверждением Государственного первичного специального эталона ГЭТ 55-91. В результате второй были разработаны два комплекта образцовых гидрофонов: КОГ-1 на диапазон частот от 0,01 Гц до 200 кГц и КОГ-2 на частоты от 0,1 до 1,0 МГц.

Комплект КОГ-1 включал 4 гидрофона с пьезоэлементами сферического типа: ГИ-31, ГИ-32Э, ГИ-33Э и ГИ-34Э, которые являлись логическим развитием разработок гидрофонов ГИ-19, ГИ-20, ГИ-21 и ГИ-22, лишь с тем принципиальным отличием, что в их прочном корпусе размещен соединитель, плату которого, при необходимости, можно заменить на плату предварительного усилителя. Метрологические характеристики гидрофонов были идентичны характеристикам гидрофонов ГИ-19 - ГИ-22, хорошо зарекомендовавших себя в метрологической практике. Еще два гидрофона: ГИ-35 и ГИ-36, включенные в комплект КИГ-1, были, по сути, модернизацией гидрофонов ГИ-13 и ГИ-14 (или Г1 и Г2 – см. выше), суть которой заключалась в герметизации пьезоэлементов по внедренному нами способу. Гидрофоны имели малошумящие предусилители и предназначались для калибровки высокочувствительных гидрофонов методом сравнения. Внешний вид некоторых гидрофонов комплекта КОГ-1 показан на рис. 36.



Рис. 36. Гидрофоны ГИ-31, ГИ-35 и ГИ-36 (сверху вниз) из комплекта КОГ-1

Было изготовлено 3 комплекта опытных образцов этих гидрофонов, которые были переданы в эксплуатацию на Государственный эталон ГЭТ 55-91. К сожалению, эти гидрофоны оказались последними гидрофонными изделиями Опытного завода, который свернул это производство уже в 1991 году.

Спустя только 15 лет были возобновлены работы по созданию эталонных гидрофонов для оснащения ведомственных метрологических служб. Нашей лабораторией был разработан комплект рабочих эталонов 1-го разряда КРЭ-1, предназначенный для передачи размера единицы звукового давления в водной среде рабочим эталонам 2-го разряда и для проведения поверочных работ в соответствии с поверочной схемой для средств измерения звукового давления в водной среде в диапазоне частот от 0,1 Гц до 200 кГц. Комплект состоит из 4-х гидрофонов ГИ-32Э, ГИ-33Э, ГИ-34Э и Г6105. Первые три аналогичны по конструкции гидрофонам комплекта КОГ-1. Обоснования для такого выбора не требовалось, но существовала другая проблема:

Альманах современной метрологии, 2016, №7

сумеем ли мы повторить полный цикл (более 30 технологических операций!) изготовления этих гидрофонов уже не на заводе, а на опытно-технологической базе нашего подразделения. И это нам удалось, что стало результатом наших многолетних усилий по сохранению оборудования лаборатории в действующем состоянии, а также благодаря бесценному профессиональному опыту наших ветеранов. Изготовленные нами гидрофоны ГИ-32Э, ГИ-33Э и ГИ-34Э показаны на рис. 37.



Рис. 37. Эталонные гидрофоны ГИ-32Э, ГИ-33Э и ГИ-34Э (сверху вниз)

Гидрофоны ГИ-32Э, ГИ-33Э и ГИ-34Э прошли испытания с целью утверждения типа и включены в Государственный реестр средств измерений, допущенных к применению в Российской Федерации. Нашим подразделением было изготовлено и отправлено 5 комплектов КРЭ-1 (рис. 38).



Рис. 38. Комплект рабочих эталонов 1-го разряда КРЭ-1

Высокочастотные гидрофоны

Одной из первых попыток перешагнуть 200-килогерцовый рубеж, ограничивающий частотный диапазон калибровки гидрофонов, было создание комплекта образцовых гидрофонов КОГ-2 в конце 1980-х годов (см. выше). При их разработке мы хорошо представляли себе технологические проблемы реализации принимаемых конструктивных решений по миниатюризации всех элементов таких гидрофонов, необходимых для получения достаточно приемлемых параметров гидрофона – его частотной характеристики чувствительности и характеристик направленности. Из опыта изготовления гидрофона Г1 (или ГИ-14, или ГИ-36) с тангенциально-поляризованным цилиндром диаметром 4 мм казалось, что пьезоэлементы меньших размеров изготовить уже невозможно. Однако требовалось, чтобы габаритные размеры цилиндрического чувствительного элемента не превышали 1 – 2 мм. Электронная промышленность не выпускала пьезоэлементов подобной формы и размеров. Поэтому на разработку специальной технологии изготовления таких изделий было потрачено много усилий, и в итоге удалось наладить изготовление радиально-поляризованных цилиндров диаметром от 1 до 2 мм с толщиной стенки от 0,1 до 0,2 мм (рис. 39)



Рис.39. Пьезокерамические цилиндрические элементы с радиальной поляризацией диаметром 2, 1,5 и 1 мм

Гидрофон ГИ-29 с чувствительным элементом в виде полого радиально-поляризованного цилиндра диаметром 1 мм, высотой 1 мм и толщиной стенки 0,1 мм, подвешенного в эластичном звукопрозрачном полиуретановом компаунде (например, КТ-102) на конце длинной (до 140 мм) стальной трубки диаметром 3 мм, предназначен для измерения параметров гидроакустических полей в диапазоне частот от 0,5 до 1 МГц. Чувствительность гидрофона (1 – 2 мкВ/Па) и его электрическая емкость (см. таблицу) обеспечивают измерения относительно низких гидроакустических давлений, генерируемых, например, излучателями аппаратов ультразвуковой терапии, без предварительного усиления.

Комплект КОГ-2 состоял из трех гидрофонов: ГИ-29 (с цилиндрическим чувствительным элементом диаметром 1 мм), ГИ-30 (с элементом диаметром 2 мм) и ГИ-37 (со сферическим чувствительным элементом диаметром 5 мм). Последний был разработан и включен в комплект в связи с тем, что чувствительность ГИ-29 и ГИ-30 на излучение в диапазоне частот 100 – 500 кГц оказалась недостаточной для реализации метода взаимности на высокочастотной установке ГЭТ 55-91. На рис.40 показаны частотные характеристики гидрофонов ГИ-29 и ГИ-30 (с цилиндрическим чувствительным элементом диаметром 1 и 2 мм соответственно), измеренные на Государственном специальном эталоне единицы звукового давления в водной среде ГЭТ 55-91 и приведенные к выходному разъему гидрофонов [21].

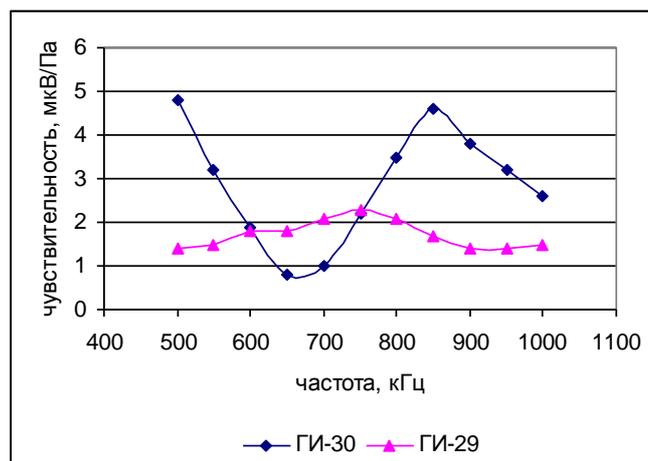


Рис. 40. Частотные характеристики чувствительности гидрофонов ГИ-29 и ГИ-30

Из этого рисунка видно, что частотная характеристика чувствительности гидрофона ГИ-29 в диапазоне частот 0,5 – 1 МГц достаточно ровная: средняя чувствительность составляет 1,73 мкВ/Па с максимальным

отклонением от среднего уровня, не превышающим 2,5 дБ. Неравномерность частотной характеристики чувствительности гидрофона ГИ-30 в этом же диапазоне существенно выше: максимальное отклонение от средней чувствительности (2,87 мкВ/Па) составляет 11 дБ. И хотя размеры чувствительного элемента обеспечивают достаточное пространственное разрешение гидрофона ГИ-30, частотная характеристика его чувствительности существенно ограничивает его применение в рассматриваемом диапазоне частот.

Технологические решения, принятые при конструировании гидрофонов КОГ-2, неоднократно повторялись при разработке и конструировании высокочастотных гидрофонов, изготавливаемых нами небольшими партиями по заказам сторонних организаций. Внешний вид гидрофонов ГИ-29 и ГИ-37 представлен на рис. 41.



Рис. 41. Гидрофоны ГИ-29 (предусилитель отсоединен) и ГИ-37 из комплекта КОГ-2

К началу 1990-х годов, в связи с развитием ультразвуковых методов исследований и лечения в здравоохранении, стала очевидной востребованность гидроакустических измерений и на мегагерцевых частотах, по крайней мере, в диапазоне от 0,5 до 15 МГц [22]. Основным инструментом для измерения параметров ультразвуковых полей этого частотного диапазона по-прежнему оставались гидрофоны, только к ним предъявляются более жесткие требования по временному и пространственному разрешению [21]. Учитывая важность и перспективность этого направления наша лаборатория в инициативном порядке, почти без финансирования, начала заниматься вопросами создания средств гидроакустических измерений в мегагерцевом диапазоне частот. Одним из итогов этой деятельности стало создание Государственного специального эталона единицы мощности ультразвука в воде в диапазоне частот от 0,5 до 12 МГц – ГЭТ 169-2005 [22] и ряда высокочастотных гидрофонов на диапазон частот от 0,5 до 10 МГц [23].

Гидрофон ГУЗ-1 предназначен для измерения параметров гидроакустических импульсов большой амплитуды (до 80 МПа), длительностью 1 – 3 мкс и временем нарастания (100 – 500 нс). Такие

импульсы используются, например, в литотриптерах для дистанционного разрушения камней в почках и других органах [21]. Ударное воздействие гидроакустических волн такой формы и амплитуды требует защиты пьезокерамического элемента от разрушения.

Гидрофон ГУЗ-2 с чувствительным элементом в виде тонкого пьезокерамического диска предназначен для измерения акустического давления в диапазоне частот от 1 до 10 МГц. Его размеры обеспечивают пространственное разрешение тонкой структуры гидроакустического поля, генерируемого, например, медицинскими приборами ультразвуковой диагностики (т.н. ультразвуковыми сканерами). Для увеличения чувствительности гидрофона в его корпус встроен предварительный усилитель.

На рис.42 показана частотная характеристика чувствительности гидрофона ГУЗ-2 с совмещенным предварительным усилителем (усиление 20 дБ) на конце кабеля длиной 1,5 м. Чувствительность измерена на установке плоского сканирования УЛС-1 из состава ГЭТ 169-2005. Из рисунка видно, что в диапазоне частот от 1 до 8,3 МГц гидрофон имеет достаточно плоскую частотную характеристику с максимальным отклонением от средней чувствительности (8,4 мкВ/Па), равным 1,8 дБ. На частотах выше 8 МГц начинается резкое падение чувствительности, и именно это значение частоты следует считать верхней границей рабочего диапазона частот гидрофона ГУЗ-2.

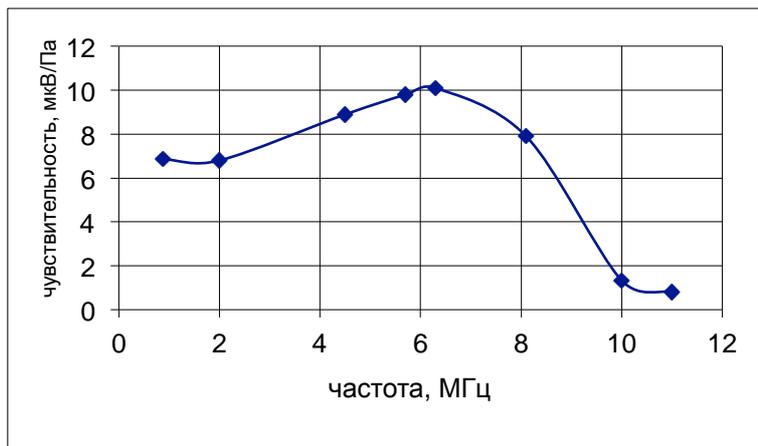
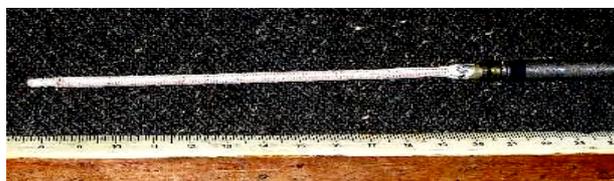


Рис. 42. Частотная характеристика чувствительности гидрофона ГУЗ-2 [21]

Внешний вид гидрофонов ГУЗ-1 и ГУЗ-2 показан на рис. 43.



а)



б)

Рис. 43. Гидрофон ГУЗ-2 (а) и зондовая часть гидрофона ГУЗ-1 (б)

Разработка этих высокочастотных гидрофонов представляется только началом работ по метрологическому обеспечению гидроакустических измерений в мегагерцовом диапазоне частот. Потребности в таких гидрофонах у отечественных потребителей достаточно велики, но их не производит ни одно предприятие у нас в стране. Из-за трудоемкости «ручной» технологии сборки таких гидрофонов мы вынуждены отказываться от заявок многих организаций. Значит, впереди нас ждет совершенствование технологии и создание более высокочастотных гидрофонов (до 15 – 20 МГц).

Современные клоны разработок 30-40-летней давности

С начала 2000 г. вновь появились потребности в измерительных гидрофонах. Их разработку во ВНИИФТРИ возглавили Б.П. Смирнов и В.Н. Зюзин. Появились типы гидрофонов с новыми схемными решениями предварительного усилителя, на новой элементной базе (радиокомпоненты, кабель, разъемы и пр.). Тем не менее, основные принципы их конструкции, внедренные нами более 30 лет назад и проверенные многолетней практикой, типо-размеры используемых пьезоэлементов и способы их герметизации остались неизменными, только теперь их удалось запатентовать [24 – 27]. Эти гидрофоны выпускаются в кооперации с нашей лабораторией. Фото некоторых из них представлены на рис. 44.

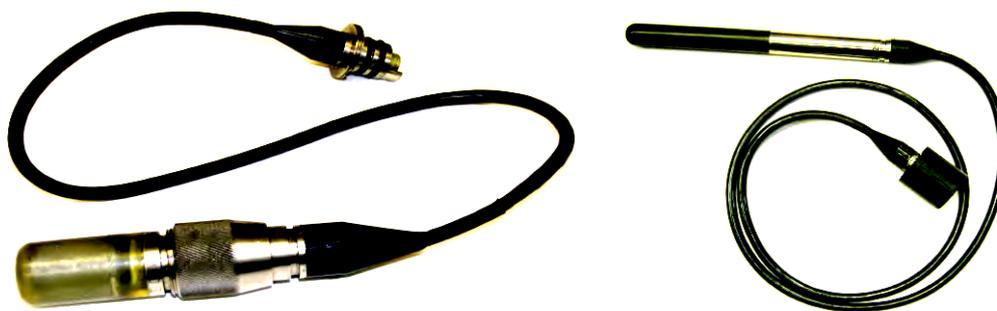


Рис. 44. Гидрофоны ГИ50Э (слева) и ГИ53 (справа) с тангенциально-поляризованными цилиндрическими пьезоэлементами диаметром 20 и 10 мм

Справка

За прошедшие 50 лет подразделение возглавляли: В.А. Черпак (1966-1967), Г.И. Белашенко (1967-1984) и автор этих воспоминаний (с 1984 г. по настоящее время). В подразделении работают или трудились (перечисляю в алфавитном порядке): А.Н. Александрин, В.Г. Алексеев, И.Л. Алещева, Н.И. Анохина, Г.А. Афонина, В.Ф. Беляков, Ю.П. Бычков, В.П. Вершинин, Г.Н. Гарзанова, Е.В. Гусарова, В.А. Гусева, Л.Ф. Дергачева, И.В. Дзюбенко, Н.И. Дудкина, В.М. Житняк, Н.Б. Керимова, Л.А. Киршин, Ю.М. Колбацков, Е.Н. Коломеец, Ю.В. Комличенко, М.И. Конуреева, Р.И. Королькова, А.И. Косицина, Н.И. Кошелев, С.И. Кузнецов, М.И. Кузнецова, Ф.А. Левинзон, Г.Н. Мареева, Ю.И. Моисеев, В.Б. Одесский, В.Ф. Паутов, Н.А. Подольнер, Л.С. Рудниченко, Б.П. Смирнов, Е.Ф. Смирнова, Б.А. Тетеркин, Н.С. Титов, Г.И. Усачева, А.Ф. Федоров, Л.П. Фещенко, А.А. Фролов, Л.Д. Цуканова, Л.И. Хрусталева, В.З. Черников, Ю.И. Шмин, Л.И. Шустрова, Э.Ф. Юрчук, Ю.Г. Ягола.

Вспоминаю всех с добром и благодарностью.

Литература

1. Langevin P.A. //J. Acoust. Soc. Am. 1954, v. 26, 3, p. 421.
2. Ананьева А.А.. Керамические приемники звука. М.: Изд. АН СССР, 1963.
3. Белашенко Г.И., Еняков А.М. Влияние размеров цилиндрического преобразователя на спектр его собственных частот/ Сб. тез. докл. I Всесоюз. конф. "Метрология гидрофиз. измерений", М., 1980, ВНИИФТРИ, с.100-101.
4. Белашенко Г.И., Еняков А.М. Характеристики направленности ультразвуковых цилиндрических гидрофонов// Измерительная техника, 1978, № 6.

5. Фещенко Л.П., Черников В.З.// Измерительная техника, 1975, № 11.
6. Фещенко Л.П., Черников В.З.// Метрология, 1975, № 6.
7. Фещенко Л.П., Черников В.З.// Измерительная техника, 1976, № 1.
8. Белашенко Г.И., Еняков А.М., Фещенко Л.П., Черников В.З. Собственные шумы тангенциально-поляризованных цилиндрических преобразователей// Измерительная техника, 1978, № 8, с. 82-84.
9. Еняков А.М., Исаев Л.К., Фещенко Л.П. Оптимизация параметров системы пьезопреобразователь-усилитель по критерию минимума собственных шумов// Измерительная техника, 1980, № 2, с. 49-50.
10. Подводная акустика. Под ред. Л.М. Бреховских. М.: Мир, 1965.
11. Зюзин В.Н. Эквивалентные шумы широкополосного гидрофона ГИ-26М и его модификаций/ В сб. научн.тр. ВНИИФТРИ. М., 2000, с. 168-176.
12. Зюзин В.Н., Смирнов Б.П. Унифицированный ряд скалярно-векторных измерительных гидроакустических преобразователей // Альманах современной метрологии, 2015, № 4, с.128-142.
13. Белашенко Г.И., Еняков А.М. Влияние компаундных покрытий на характеристики ультразвуковых цилиндрических гидрофонов// Метрология, 1979, № 6.
14. Белашенко Г.И., Еняков А.М. Проверки и испытания в процессе изготовления широкополосных ненаправленных измерительных гидрофонов// Метрология, 1974, № 9.
15. Боббер Р. Гидроакустические измерения. М.: Мир, 1974.
16. Подводные электроакустические преобразователи. Справочник. Л.: Судостроение, 1983.
17. Еняков А.М. О гидроустойчивости пьезокерамических гидроакустических преобразователей с тангенциальной поляризацией/ В сб. научн.тр. ВНИИФТРИ «Метрологические проблемы гидрофизических и гидроакустических измерений».- М.: ВНИИФТРИ, 1990, с. 49-54.
18. Enyakov A. et al. A Russian-Chinese international comparison of hydrophone calibration methods// Metrologia-VIPM, v.36, № 4, 1999, pp.297-303
19. Еняков А.М., Лихачев С.М., Платонов В.А., Вэнчжун Ю., Юэбинь В., Чжун Л. Сличения результатов градуировок гидрофонов на эталонах России и Китая// Измерительная техника, 2000, № 6, с.63-67.
20. Еняков А.М., Лихачев С.М., Юань Вэнчжун, Чэн Джи. Сличения национальных эталонов России и Китая в инфразвуковом диапазоне частот// Измерительная техника, 2004, № 7.
21. Еняков А.М. Проблемы метрологического обеспечения гидроакустических измерений на мегагерцовых частотах/ В кн. «Точные измерения для высоких технологий».- ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008, с.119-250.

22. Еняков А.М. Государственный специальный эталон единицы мощности ультразвука в воде// Измерительная техника, 2006, № 3, с.3-7.
23. Еняков А.М. Метрологическое обеспечение ультразвукового медицинского оборудования. М.: ВНИИФТРИ, 159 с.
24. Еняков А.М., Зюзин В.Н., Некрасов В.Н., Смирнов Б.П. Гидрофон. Патент на изобретение № 2392767. Оpubл. 20.06.2010.
25. Еняков А.М., Зюзин В.Н., Некрасов В.Н., Смирнов Б.П. Гидрофон. Патент на изобретение № 2393643. Оpubл. 27.06.2010.
26. Еняков А.М., Зюзин В.Н., Некрасов В.Н., Смирнов Б.П. Гидрофон. Патент на полезную модель № 88235. Оpubл. 27.10.2009 Бюл. №30.
27. Еняков А.М., Зюзин В.Н., Некрасов В.Н., Смирнов Б.П. Гидрофон. Патент на полезную модель № 88236. Оpubл. 27.10.2009 Бюл. №30.