

ОПЫТ ПОСТРОЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ АНТЕННЫ

© 2013 г. В. Г. Дмитриев

Государственный научный центр, ФГУП ВЭИ

111250 Москва, ул. Красноказарменная 12

E-mail: 177dvg@rambler.ru

Поступила 24.08.2012 г.

Представлены результаты работ по исследованию макета векторной комбинированной гидроакустической антенны, созданной в середине 1980-х годов. Семиэлементная комбинированная антенна была разработана на основе молекулярно-электронных гидроакустических датчиков градиента давления. Согласно экспериментальным данным выигрыш от совместной обработки по суммарным каналам давления и градиента давления превышал 20 дБ. Обсуждаются параметры молекулярно-электронных преобразователей, которые обеспечивали качественные характеристики комбинированной антенны.

Ключевые слова: приемник градиента звукового давления, векторно-фазовые методы, электрокинетический датчик, молекулярно-электронный акустический датчик, молекулярно-электронный преобразователь, комбинированная приемная антенна.

DOI: 10.7868/S0320791913040035

ВВЕДЕНИЕ

Высокая скрытность действия подводных носителей диктует необходимость развития оборудования для обнаружения и мониторинга таких объектов. Методы поиска подводных объектов с помощью различных активных средств решают задачу обнаружения, однако проявляют свою работу и, следовательно, к ним могут быть выработаны активные и пассивные средства противодействия. С этой точки зрения пассивные методы обнаружения часто предпочтительней, так как действуют скрытно и поэтому намного труднее определить как дислокацию, так и их эффективность. Это обстоятельство объясняет серьезный интерес к пассивным методам обнаружения, который проявляется как со стороны потребителей, так и со стороны разработчиков таких устройств.

Потенциальные возможности и потенциальные ограничения таких систем определяются характеристиками конкретного физического поля, которое характерно для данного объекта обнаружения и для регистрации которого создается устройство обнаружения. Условия и дальность распространения такого поля определяют и потенциальные возможности обнаружения объекта по этому параметру. Как известно, морская среда препятствует распространению электромагнитных волн и основными полями, которые сопровождают движущийся подводный объект, являются акустическое и гидродинамическое поля. Характерное шумовое поле от движущегося под

водой объекта, которое формируется большим количеством источников различной мощности, включающих, прежде всего, шумы гидродинамического происхождения, работу винтов и различных механизмов, является своеобразной визитной карточкой каждого конкретного подводного объекта и определяется его конструктивными особенностями. Уменьшить уровень шумов подводных кораблей — мечта каждого кораблестроителя, и в этом направлении велись и ведутся активные работы, что уже привело к появлению очень малошумных объектов. В свою очередь это поставило серьезную задачу по созданию средств, которые могли бы повысить дальность их обнаружения.

Естественными ограничителями дальности действия гидроакустических систем являются внешние шумы, на фоне которых приходит полезный сигнал, а также внутренние шумы приемного устройства. Многие методы борьбы с этими факторами давно известны. В гидроакустике это, прежде всего, селекция внешних шумов с помощью формирования узконаправленных диаграмм приемных систем и снижение собственных шумов первичных преобразователей приемных систем.

Принципиальным вопросом создания системы обнаружения является диапазон частот, в котором требуется или предполагается обнаружение объекта. Основными факторами здесь обычно являются следующие: предполагается ли в этом диапазоне

наличие собственного излучения объекта, какие маскирующие факторы (внешние шумы) имеются в зоне приема и как с ними можно бороться.

Методы борьбы с шумами за счет их пространственной селекции ясны и достаточно хорошо исследованы, в то время как вопрос о частотном диапазоне, в котором обнаружение морского объекта будет наиболее эффективным, остается открытым. Очевидным является только то, что большинство шумов, которые сосредоточены в высокочастотной области излучения (от единиц килогерц и выше) у современных подводных объектов эффективно подавлены. Несмотря на то, что вопросы создания высоконаправленных антенных систем на высоких частотах хорошо проработаны и в системах ближнего действия и активных системах их применение оправдано, для систем дальнего пассивного обнаружения они мало подходят из-за эффективной борьбы, так и из условий распространения высокочастотных сигналов. Таким образом, наиболее перспективным диапазоном частот, на котором можно ожидать увеличение дальности обнаружения, являются низко- и инфранизкочастотный диапазоны, примерно от сотен до единиц герц. Это обусловлено тем, что работающая винто-моторная группа принципиально является источником инфранизкочастотных колебаний, так как низкооборотные винты специально конструируются для борьбы с кавитационным шумом и спектр их шумов смещен в сторону низких частот. Однако сильным маскирующим фактором этого излучения являются инфранизкочастотные шумы открытого моря, имеющие большую величину за счет, с одной стороны, хорошего распространения, а с другой – множества источников излучения: ветровые, дождевые, волновые, судоходство, сеймика и т.д. Таким образом, основной проблемой обнаружения движущегося подводного объекта по его прямому излучению в инфранизкочастотном диапазоне является создание приемного устройства с хорошими селектирующими характеристиками внешних шумов. Собственно, это и является основной проблемой таких устройств. Очевидно, что стандартный гидрофон, применяемый в низкочастотном диапазоне, не может обеспечить пространственную селекцию шумов из-за отсутствия диаграммы направленности, которую можно сформировать только группируя гидрофоны в развитую антенную систему. При стандартном размещении линии гидрофонов через половину длины волны получить приемлемую диаграмму направленности с небольшим уровнем боковых лепестков на частотах в единицы герц можно в антенной группе порядка нескольких сотен метров, а зачастую и нескольких километров. Очевидные трудности создания, постановки и эксплуатации таких антенн сильно ограничивают их применение. К этому необходимо добавить

еще один немаловажный фактор. Наибольшее распространение в распределенных антеннах получили пьезокерамические гидрофоны, обладающие целым рядом положительных характеристик, в том числе емкостным характером своего электрического импеданса. Это приводит к существенному уменьшению собственных шумов на высоких частотах, но именно емкостной характер импеданса приводит к повышению собственных шумов на низких частотах, что предполагает применение гидрофонов с большой собственной емкостью, а следовательно, и больших габаритов [1, 2].

Таким образом, ограничения в использовании инфранизких частот для обнаружения связаны с конструктивными особенностями построения антенных систем из первичных преобразователей, реагирующих на скалярную составляющую гидроакустического поля (давления). Однако известно, что гидроакустическое поле обладает также и векторной составляющей, колебательной скоростью V частиц среды при распространении акустической волны, которая связана с акустическим давлением P через градиент давления по направлению ее распространения. Поэтому первичный преобразователь, который реагирует на колебательную скорость или градиент давления, обладает характеристикой направленности, пропорциональной косинусу угла распространения [3]. Такую характеристику направленности обычно называют дипольной или косинусной характеристикой направленности. Основным преимуществом преобразователя градиента давления является то, что его характеристика направленности не зависит от частоты, так как определяется векторными свойствами самого акустического поля. Это дает возможность не только определять направление прихода акустического сигнала, но и осуществлять селекцию шумов акватории.

КОМБИНИРОВАННАЯ АНТЕННА

Исходя из вышесказанных предположений, в середине 1970-х годов автору, работавшему в то время во ВНИИТе (позднее переименован в НПО КВАНТ), была поставлена задача создания датчика градиента давления на основе электрокинетического эффекта для применения в гидроакустике. Что и было сделано. В работе [4] можно найти историю создания и использования приемников градиента давления, принцип действия которых был предложен С.Н. Ржевкиным еще в начале 1950-х годов. Эта проблема неоднократно освещалась как в публикациях С.Н. Ржевкина, Л.Н. Захарова и других авторов, работавших в этом направлении (например, [1, 5–7]), так и в ряде монографий (например, [2, 8, 9]).

Не вдаваясь в подробности рассмотрения различных типов приемных устройств, осуществляющих регистрацию градиента давления, таких

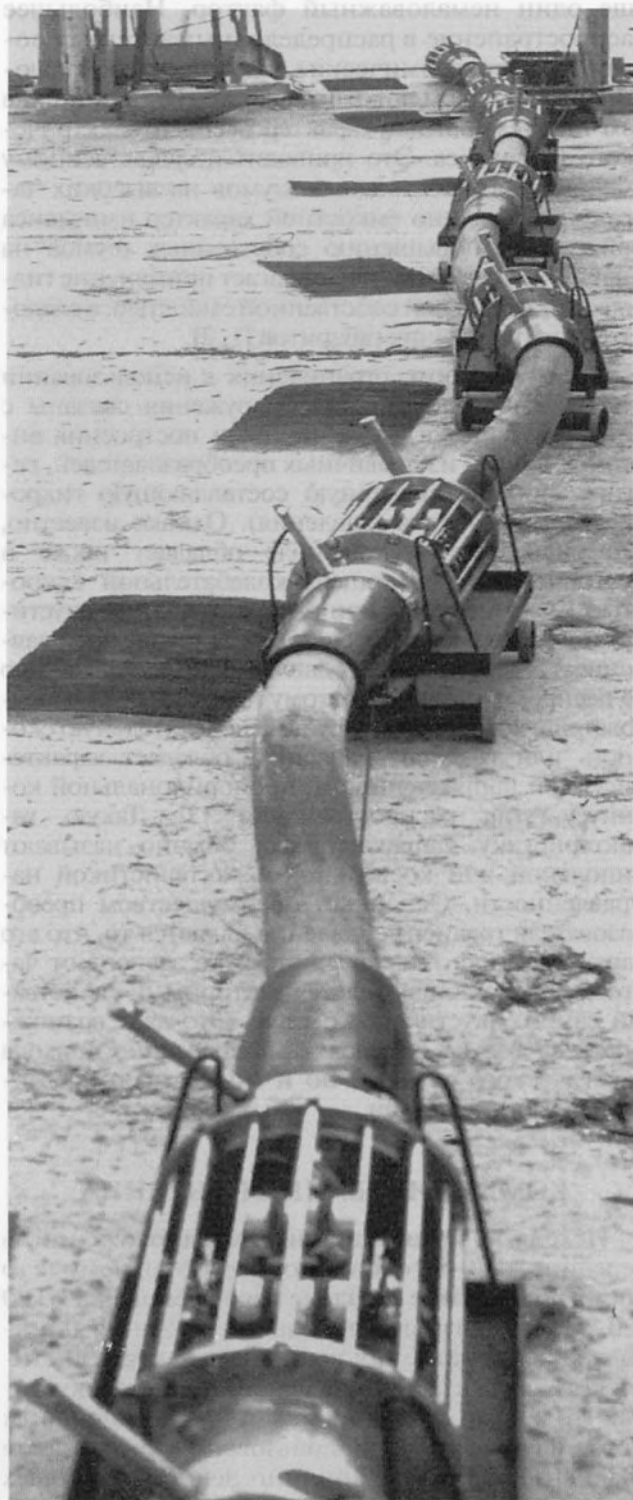


Рис. 1. Семиэлементная комбинированная антенна на базе конструктивов НПО "Атолл".

как дипольный приемник, соколеблющаяся сфера и неподвижные датчики градиента давления, следует сразу отметить, что для конкретного применения датчиков градиента давления на инфра-

низких частотах в силу объективных конструкторских требований реально использовать можно только неподвижные датчики градиента давления. Можно также использовать и дипольный приемник, который состоит из двух разнесенных гидрофонов, сигналы с которых вычитаются, но на инфранизких частотах это приводит к трудностям калибровки и повышению собственных шумов приемника [2]. На средних и высоких частотах предпочтительна соколеблющаяся сфера.

В публикациях [2, 4] описана разработанная под руководством автора в начале 1980-х годов на базе конструктивов НПО "Атолл" реальная семиэлементная комбинированная антенна (рис. 1), созданная на основе электрокинетических преобразователей градиента давления. Эта донная комбинированная антенна прошла большой цикл натурных испытаний, в том числе и с реальными объектами. Однако большинство результатов экспериментов с этой антенной опубликовано не было. Сохранившиеся материалы одного из испытаний показали, насколько в реальных условиях эффективен комбинированный прием.

Комбинированная антенна состояла из семи приемных модулей, каждый из которых содержал три ортогонально расположенных векторных молекулярно-электронных датчика градиента давления и гидрофон (рис. 2). Антенна в период с 1984 по 1986 гг. неоднократно ставилась на грунт путем спуска со слипа судна на глубины от 20 до 100 м, а затем вытягивалась судном в рабочее положение (линию), так как гибкая и прочная конструкция антенны позволяла это делать.

При работе по реальным объектам антенна располагалась на глубине примерно в 80 м и в 3 км от берега в районе г. Геленджик (Голубая бухта). От антенны аналоговые сигналы по многожильному кабелю передавались на берег для записи на многоканальный магнитофон и дальнейшей обработки. На 14-канальный магнитофон записывались одновременно все каналы датчиков давления P и все горизонтальные векторные Y -каналы, расположенные перпендикулярно к оси антенны. Остальные каналы записывались на другой магнитофон. Собственно, выбор количества элементов в антенне и был обусловлен возможностями записывающей аппаратуры. На частоте, равной половине длины волны, определяемой шагом антенны (расстоянием между модулями), что соответствовало частоте примерно 300 Гц, была снята диаграмма направленности антенны (ДН). Исследование ДН проводилось путем обхода судна на расстоянии около 1 км вокруг точки расположения антенны (круговые галсы). Откалиброванный и суммированный сигнал каналов через $1/3$ -октавный фильтр подавался на самописец. На рис. 3 представлены результаты обработки сигналов с комбинированной антенны

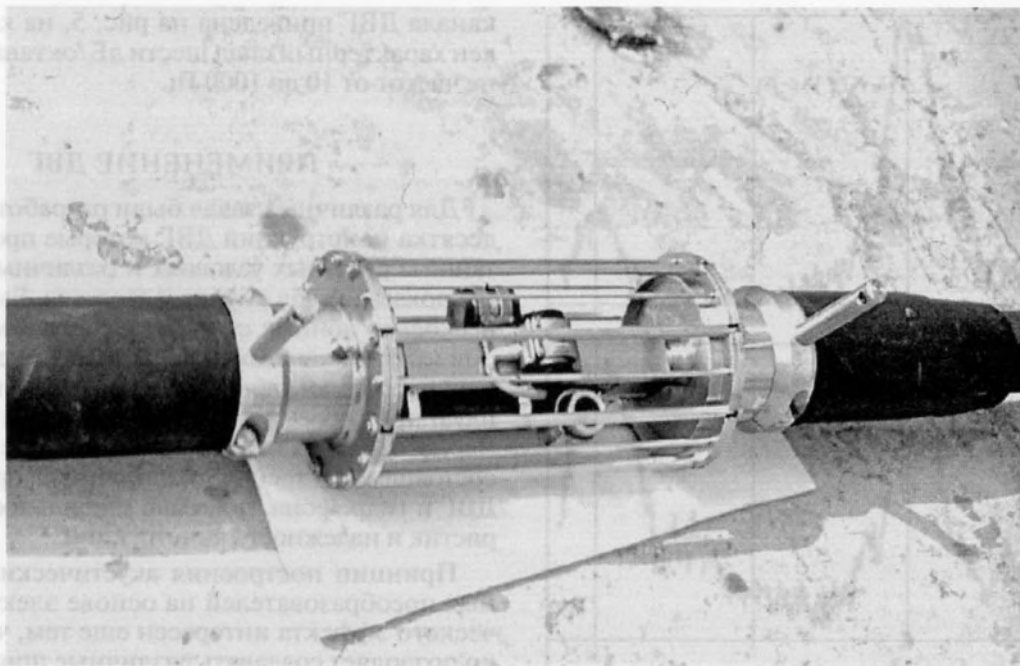


Рис. 2. Приемный модуль, включающий три ортогонально расположенных молекулярно-электронных датчика градиента давления и гидрофон.

одного и того же галса по разным каналам приема, а также суммарная и разностная характеристики скалярного и векторного суммарных каналов.

Это были первые в СССР масштабные испытания комбинированной приемной антенны на базе векторных приемников, результаты которых не только подтвердили возможность и перспективность использования векторно-фазовых методов в гидроакустике, но и показали существенное увеличение дальности регистрации гидроакустических сигналов за счет пространственной селекции шумов по отношению к аналогичной антенне на базе только приемников звукового давления. Это особенно проявляется при совместной обработке канала давления и векторного канала. Из рис. 3 видно, что выигрыш (подавление шумов по направлениям) даже при такой тривиальной операции составляет от 10 до 20 дБ. Еще больший выигрыш получается при корреляционной обработке сигналов по этим каналам (т.е. фактически переход на выделение вектора потока акустической мощности), что обусловлено фактором некоррелированности части шумов по каналу давления и каналу градиента давления. Впоследствии об этом будет написано в работах [1, 8, 9].

МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ВЕКТОРНЫЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК

Успешное создание векторной антенны было основано на разработке и использовании жидкост-

ных молекулярно-электронных датчиков градиента давления с неподвижным относительно звуковой волны корпусом. Разработанные датчики векторные гидроакустические (ДВГ) используют электрокинетический эффект, который проявляется в генерации электрических потенциалов при движении (колебаниях) полярных диэлектрических жидкостей в диэлектрических микрокапиллярах. В литературе такие преобразователи называют электрокинетическими или молекулярно-электронными за характерные размеры двойного электрического слоя, где происходит процесс преобразования механических колебаний в электрические. Простота конструкции преобразователя, полностью залитого жидкостью, отсутствие движущихся частей, активные электрический и акустический импедансы в рабочем диапазоне частот, высокая чувствительность — существенные преимущества преобразователей такого типа, особенно при применении в гидроакустике.

Основным узлом ДВГ служили микрокапиллярные перегородки, что позволило создать датчики, обладающие характеристиками и параметрами высокой степени идентичности. Это, в свою очередь, позволило применять их в различных гидрофизических системах, комбинируя в многоканальные системы обнаружения, в частности в комбинированную антенну. На рис. 4 приведен один из вариантов ДВГ. Диаграмма направленности ДВГ представляет собой косинусоиду с коэффициентом деления не хуже 30 дБ в рабочем диапазоне частот [2]. Измеренная АЧХ одиночного

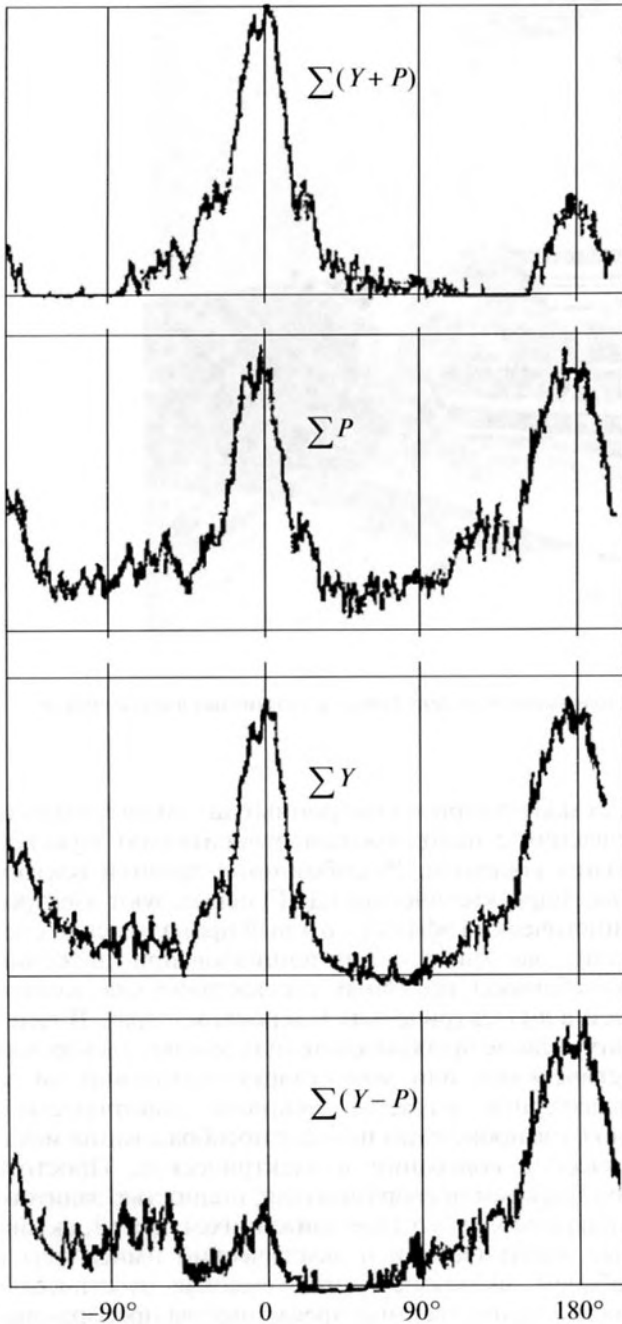


Рис. 3. Результаты обработки сигналов с комбинированной антенны одного и того же галса. (а) Кардиои́дная характеристика направленности в каждом модуле с максимумом ДН в направлении, перпендикулярном линии антенны. (б) Стандартная ДН антенны из гидрофонов. (в) ДН антенны из каналов градиента давления в каждом приемном элементе. (г) Кардиои́дная характеристика направленности в каждом модуле с максимумом ДН, противоположном варианту (а).

канала ДВГ приведена на рис. 5, на котором виден характерный спад шести дБ/октава в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц.

ПРИМЕНЕНИЕ ДВГ

Для различных задач были разработаны свыше десятка конструкций ДВГ, которые прошли испытания в реальных условиях и различных системах, где показали себя с лучшей стороны. Были созданы несколько донных систем с акустическими и сейсмическими каналами с использованием жидкостных преобразователей (рис. 6). При опытной эксплуатации более года донного модуля в условиях Черного моря на глубине 20 м приемное устройство, состоящее из трех расположенных ортогонально ДВГ и гидрофона, показало стабильность характеристик и надежность конструкции.

Принцип построения акустических жидкостных преобразователей на основе электрокинетического эффекта интересен еще тем, что не только позволяет создавать различные приемники, но и дает возможность варьировать свои характеристики, а также позволяет создавать преобразователи с другими интересными для акустики и сейсмологии свойствами [10–14]. Весьма интересным направлением работ по созданию вариантов конструкций датчика явилась разработка в конце 1980-х годов, выдерживающая предельные перегрузки. Известно, что керамические приемные элементы не способны выдерживать их без разрушения. В одном из первых вариантов конструкции приемника, получившего название СПМ-54, удалось реализовать не только устойчивость к таким перегрузкам самого датчика, но и вмонтированной в него электроники (рис. 7). Некоторые аспекты разработки приемников этого типа описаны, например, в работе [15].

По известным причинам в конце 1980-х годов работы в направлении создания стандартного датчика градиента давления на основе электрокинетического эффекта для гидроакустических систем были свернуты. Однако проблема повышения качества акустических комплексов по обнаружению и мониторингу подводных и надводных объектов осталась. И если за прошедшие четверть века электронная схемотехника и компьютерная обработка ушли далеко вперед, то по отношению к первичным преобразователям прогресс не так явно выражен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прошлый опыт применения датчиков градиента давления с неподвижным относительно акустической волны корпусом показывает реальную возможность создания надежной конструкции комбинированных гидроакустических антенн, работающих в низкочастотном диапазоне. Ком-

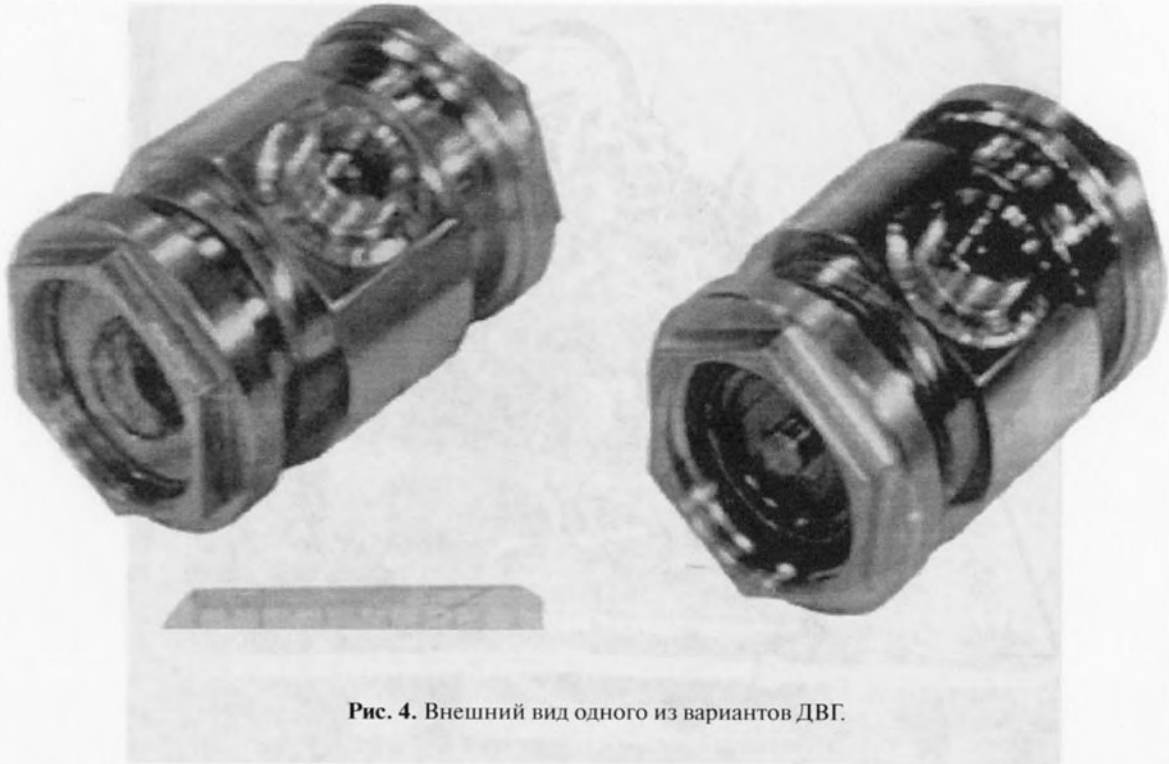


Рис. 4. Внешний вид одного из вариантов ДВГ.

бинированный прием, использующий векторную и скалярную составляющие гидроакустического поля, — мощный способ серьезно улучшить характеристики гидроакустических комплексов самого разного назначения [2, 9]. Использование для первичных преобразователей электрокинетического эффекта дает возможность создания целого ряда акустических и сейсмических преобразователей. Широкий частотный диапазон, равномерная частотная и фазовая характеристики, а также высокая чувствительность датчиков такого

рода оптимальны для применения в распределенных системах.

А.В.Савельев

В процессе работы над созданием сначала молекулярно-электронных датчиков, потом донных модулей, а далее комбинированной антенны и приемного комплекса было решено множество научных, технических, конструкторских и методических проблем. Над решением этих задач трудился большой коллектив сотрудников в Москве, Краснодаре, Севастополе, Геленджике, а также сотрудники НИИ из г. Пушкин Ленинград-

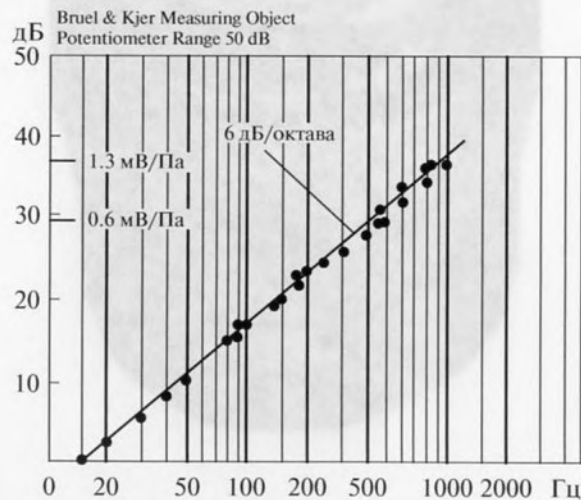


Рис. 5. Результаты калибровки одного канала ДВГ, выраженные в эквивалентных единицах давления плоской звуковой волны.

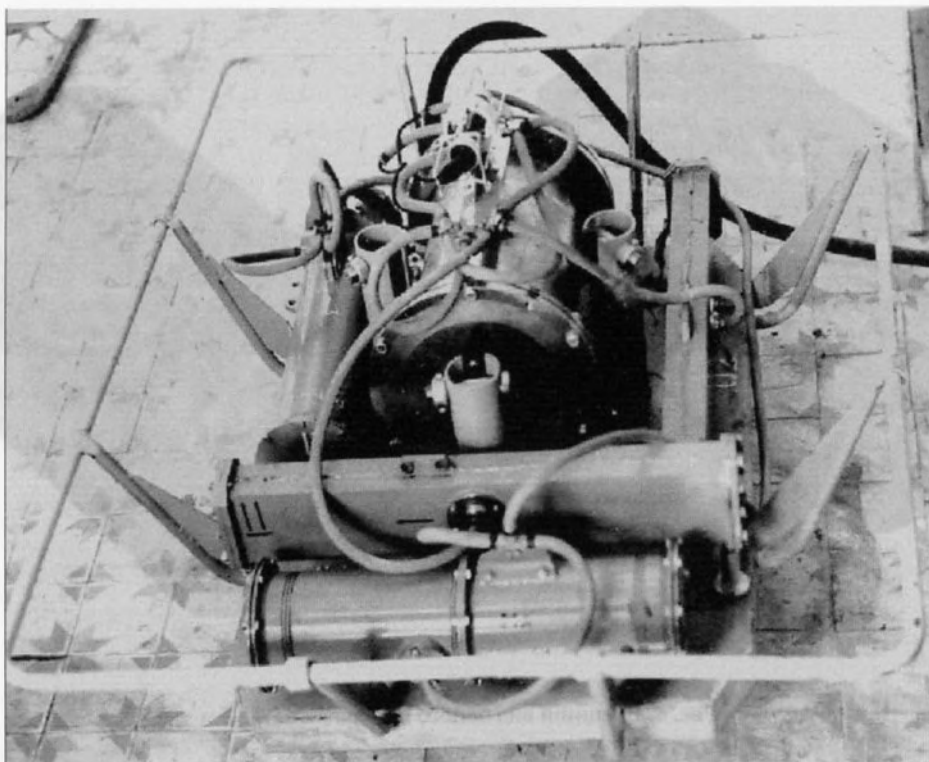


Рис. 6. Вариант донной системы с акустическими и сейсмическими каналами с использованием жидкостных преобразователей.



Рис. 7. Внешний вид электрокинетического приемника СММ-54.

ской обл., которые внесли существенный вклад в получение интересных, новых, положительных результатов. Многих уже нет, в том числе: Петькина Н.В., Андриющенко Ю.М., Гаврилова В.А., Скоробогатова В.Н., Сорокиной Т.Е., Виноградова П.Н., Кургинова Ю.М. Им и всем тем, кто участвовал в этих работах, посвящается эта статья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко В.А., Гончаренко Б.И. Векторно-фазовые методы исследования акустических полей // Вестн. МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 1992. № 6. С. 93–104.
2. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 560 с.
3. Скучик Е. Основы акустики. М.: Мир, 1976. Т. 2. 548 с.
4. Гордиенко В.А. Кафедра акустики МГУ и ее роль в становлении векторно-фазовых методов // Из истории становления отечественной гидроакустики. СПб.: Наука, 1998. 690 с.
5. Захаров Л.Н., Ржевкин С.Н. Векторно-фазовые измерения в акустических полях // Акуст. журн. 1974. Т. 20. № 3. С. 393–401.
6. Иванов В.Е., Ржевкин С.Н. Векторно-фазовые соотношения в поле тонального источника вблизи идеально отражающей плоскости // Акуст. журн. 1974. Т. 20. № 5. С. 787–790.
7. Ермолаева Е.О., Захаров Л.Н., Романюк Б.И. О градуировке приемников колебательной скорости в слое жидкости на низких частотах // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 1. С. 72–76.
8. Гордиенко В.А., Захаров Л.Н., Ильичев В.И. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Наука, 1989. 224 с.
9. Гордиенко В.А., Некрасов В.Н. Векторно-фазовые измерения в гидроакустике (некоторые аспекты использования потока акустической мощности в условиях морских полигонов). М.: ФГУП ВНИИФТРИ, 2007. 452 с.
10. Дмитриев В.Г., Карякин Ю.В., Петькин Н.В., Скоробогатов В.Н. Устройство для измерения колебаний давления. Авт. свид. № 568301. 15.04.1977 г.
11. Дмитриев В.Г., Скоробогатов В.Н. Устройство для измерения колебаний давления. Авт. свид. № 1436625. 09.07.1988 г.
12. Андреев А.Г., Дмитриев В.Г., Запевин И.Л., Москвичев В.Д. Электрокинетический преобразователь перепада давления. Авт. свид. № 1446503. 22.08.1988 г.
13. Брунштейн Ю.Г., Дмитриев В.Г., Троценко А.В. Преобразователь механических сигналов. Авт. свид. № 1477093. 03.01.1989 г.
14. Андреев А.Г., Гаврилов В.А., Дмитриев В.Г., Платонов С.С. Электрокинетический преобразователь акустических колебаний. Авт. свид. № 1578537. 15.03.1990 г.
15. Желонкин А.И. Принципы построения и разработка электрохимических измерительных преобразователей для приборов и систем контроля природных и техногенных динамических процессов. Автореф. дис. ... д.т.н. ФГУП НПП "КВАНТ", 2009.