АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2003, том 49, № 1, с. 30–37

УДК 534

Посвящается памяти моего друга и коллеги, профессора Л.М. Лямшева

ГИДРОАКУСТИКА: ОТ АРИСТОТЕЛЯ ДО НАШИХ ДНЕЙ

© 2003 г. Л. Бьерно

Стендигет 19, Тааструп, DK-2630 Дания
E-mail: prof.lb@get2net.dk

Поступила в редакцию 03.08.2002 г.

Гидроакустика является одной из наиболее быстро развивающихся областей в акустике. В частности, в XX веке был сделан гигантский шаг вперед в понимании гидроакустических явлений. Две мировые войны заставили признать важность исследований в области гидроакустики и темпы развития, набранные во время II Мировой войны, сохранились и после нее. Так называемая "холодная война" и прогресс в компьютерных технологиях внесли значительный вклад в развитие гидроакустики в течение всей второй половины XX века. Однако история гидроакустических исследований, этой широчайшей области, началась почти 2300 лет назад, когда люди заинтересовались фундаментальной природой звука в море. Знания по гидроакустике развились до современного высокого технологического уровня, начавшись с примитивных философских и экспериментальных исследований скорости звука в море и пройдя через века длинный путь, отмеченный как успехами, так и разочарованиями. В частности, развитие гидроакустики от Аристотеля (384–322 до н.э.) до 1960 гг. сформировало основу для широчайших исследований и успешных разработок в наше время, которым мы были свидетелями. Эта статья посвящена, в основном, развитию гидроакустики в этот период длиной почти в 2300 лет и в ней упоминаются только основные тенденции более поздних исследований.

После моего пленарного доклада на 2-м Международном симпозиуме Европейской акустической ассоциации по гидроакустике в Гданьске в мае 1999 г. профессор Л.М. Лямшев попросил меня представить этот доклад в качестве статьи в Акустический журнал, главным редактором которого он был. Я пообещал сделать это, когда у меня будет время. Теперь, когда меня попросили представить статью в специальный мемориальный выпуск журнала, посвященный профессору Лямшеву, я счел, что эта статья, которую он предлагал мне написать, будет наилучшим способом, которым я могу почтить память выдающегося акустика, ученого, пользовавшегося международным признанием, и моего хорошего друга и коллеги, чью скромность и дружелюбие мы будем вспоминать еще долгие годы.

Гидроакустика является одной из наиболее быстро развивающихся областей исследований в акустике, что отражается во все увеличивающемся каждый год количестве статей в международных журналах. Связь гидроакустики с другими важными областями науки и техники, такими как океанография, метеорология, сейсмология и рыболовство, становится все более тесной. Каждый год на гидроакустику тратятся миллиарды долларов, выделяемые добывающей промышленностью (разведка месторождений нефти и полезных ископаемых в океане), компаниями сектора связи и энергетики (прокладка кабелей и трубопроводов, их ремонт и обслуживание), пищевой промышленностью (рыболовство), транспортными фирмами и индустрией отдыха и развлечений (навигация и средства безопасности), а также военно-морскими силами разных стран мира (подводная военная техника). Огромное количество фирм производит и продает гидроакустические приборы и устройства, например, приборы для исследования и картографирования морского дна, подводные средства связи, устройства для управления производственными процессами в море, средства поиска и спасения и т.д.

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДО ПЕРВОЙ МИРОВОЙ ВОЙНЫ

Эта часть всесторонних исследований в области гидроакустики охватывает период более двух тысячелетий и является результатом человеческого интереса к морю и его способности передавать звуковые волны. Насколько это известно сегодня, все началось с древнегреческого философа Аристотеля (384–322 гг. до н.э.), который первым заметил, что звук можно слышать в воде так же, как и в воздухе. В 1490 г. итальянский ученый и художник Леонардо да Винчи (1452–1519 гг.) написал в своей записной книжке: "Если остановить корабль и погрузить конец длинной трубки в воду, а другой конец поднести к уху, вы услышите

корабли, находящиеся на больших расстояниях". Конечно, уровень шумов в озерах и морях тогда был намного ниже, чем сейчас, когда моря загрязнены шумами множества судов и различных морских работ. Приблизительно через сто лет английский философ Френсис Бэкон (1551–1626 гг.) в своей работе "Historia naturalis et experimentalis" выдвинул идею, что вода является основной средой, распространяясь в которой, звук, зародившийся в ней, достигает наблюдателя, находящегося рядом.

В XVIII веке и в самом начале XIX века лишь немногие ученые проявляли интерес к передаче звука в воде. Они измеряли скорость звука в пресной и соленой воде, сравнивая ее со скоростью звука в воздухе, уже измеренной к тому времени. В качестве источников звука они использовали колокола, пороховые заряды, охотничьи рога и человеческий голос. Приемником обычно служило их собственное ухо. В 1743 г. Ж.А. Нолле провел серию опытов, чтобы доказать, что вода сжимаема. Держа голову под водой, он слышал пистолетный выстрел, звон колокола, свисток и громкие крики. Он заметил, что интенсивность звука слабо уменьшалась с глубиной, таким образом, отметив, что потери интенсивности происходили в основном на водной поверхности. В 1780 г. Александр Монро (1733–1817 гг.) проверял возможность слышать звуки под водой. Он использовал большой и маленький колокола, заставляя их звучать как в воздухе, так и в воде. Звон колоколов был слышен в воде, однако он обнаружил, что в воде высокие тона казались более низкими, чем в воздухе. Он также пытался сравнивать скорости звука в воде и в воздухе и сделал вывод, что обе скорости звука были равны.

Прорыв в измерениях скорости звука произошел в сентябре 1826 г., когда швейцарский физик Ж.Д. Колладон (1802–1893 гг.) и французский математик Ж.К.Ф. Штурм (1803–1855 гг.) выполнили на Женевском озере первое широко известное измерение скорости звука в воде при температуре 8°С. В качестве излучателя использовался колокол, опущенный с лодки. При ударе в колокол производилась вспышка света от поджигания небольшого количества пороха. Эту вспышку мог видеть Колладон, находившийся в другой лодке, расположенной на расстоянии 10 миль от излучателя. Он запускал свой секундомер, когда замечал вспышку, и останавливал его, когда слышал звуковой сигнал в воде приблизительно десятью секундами позже. Его приемник представлял собой что-то вроде духовой трубы, один конец которой находился в воде, а другой – у его уха. С помощью этой довольно примитивной установки они измерили значение скорости звука в воде при температуре 8°С, оказавшееся равным 1435 м/с, что всего приблизительно на 3 м/с меньше значения, принятого в наше время [1].

В период с 1830 по 1860 г. ученые начали обдумывать некоторые применения подводного звука. Они задавали себе такие вопросы, как: "Можно ли использовать эхо от звукового импульса в воде для определения глубины или расстояния между судами?" или "Можно ли улучшить связь между судами с помощью передачи звука под водой?" Разочарование в связи с использованием подводного звука для измерения глубины очевидно из слов М.Ф. Мори в главе 12 его книги "Физическая география моря" (6-е издание, 1859 г.), где он пишет: "Были предприняты попытки измерить глубину океана с помощью как звука, так и давления, однако в открытом море каждая попытка заканчивалась неудачей. Для глубоководного зондирования использовались самые замечательные и хитроумные изобретения. Взрывая петарды и звоня в колокол в глубине моря в безветренную погоду и при полном штиле, можно было бы услышать эхо или отражение от морского дна и измерить глубину, исходя из скорости, с которой звук проходит через воду. Однако, хотя взрыв происходил на глубине многих футов под поверхностью, никакого эха не было, и никакого отклика от дна получить не удалось..."

Во второй половине XIX в., когда в морском деле произошел переход от парусных кораблей к судам с механическим двигателем, а в кораблестроении дерево заменила сталь, выражалась озабоченность в связи с безопасностью навигации в тумане и опасностью столкновения с другими кораблями или айсбергами. Джон Тиндалл (1820–1893 гг.) в Англии и Джозеф Генри (1797–1878 гг.) в США, несмотря на то, что они оба независимо обнаружили, что распространение звука в воздухе ненадежно, в 1876 г. рекомендовали властям, отвечавшим за маяки в обеих странах, установить на всех основных маяках мощные предупреждающие сирены, звучащие в воздухе. Начиная с 1873 г. были проведены совместные эксперименты и на маяке Саут Форленд в Англии была построена мощная паровая сирена, работавшая на частотах от 100 до 400 Гц [2]. Однако возникли проблемы, связанные с условиями распространения звука. Градиенты скорости ветра и температуры вдоль пути распространения звука вызывали сильные колебания в дальности его регистрации. Таким образом, этот удар по гидроакустике остался без серьезных последствий. Вопрос о возможных преимуществах передачи звуковых сигналов в воде был поднят снова в конце 1880-х годов Люсьеном Блейком и Томасом Алвой Эдисоном (1847–1931 гг.) в США. Эдисон изобрел устройство подводной связи между судами, однако по каким-то неизвестным причинам правительство США потеряло интерес к его изобретению.

В последние годы XIX века на плавучих маяках широко внедрялись подводные колокола. Звук от этих колоколов мог регистрироваться на

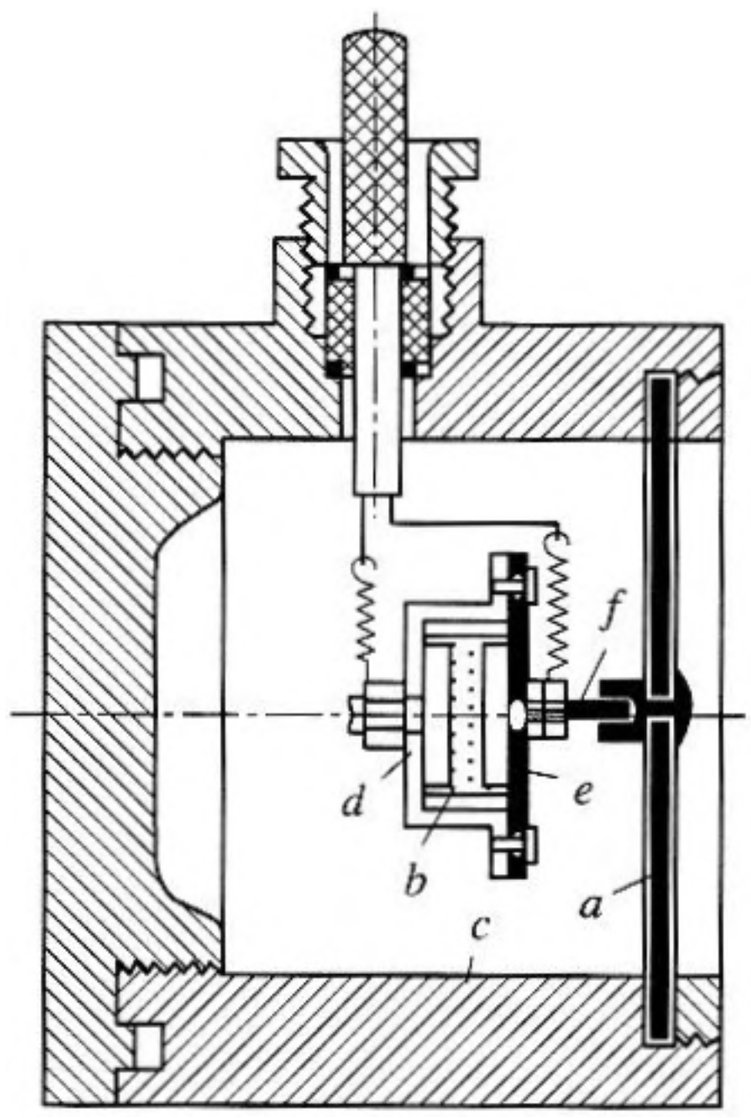

Рис. 1. Угольный микрофон в водонепроницаемом корпусе.

больших расстояниях с помощью стетоскопа или простых микрофонов, установленных на корпусе судна. Более того, когда корабль был оснащен двумя приемниками, по одному с каждого борта, можно было определить возможный курс на маяк, принимая сигналы раздельно на правое и левое ухо наблюдателя. Элиша Грей, работавший вместе с Эдисоном над улучшением телефона, обнаружил, что угольный микрофон в соответствующем водонепроницаемом кожухе может использоваться как гидрофон для приема сигналов подводного колокола (см. рис. 1).

В 1899 г. Грей и А. Дж. Мунди получили патент на электрический колокол для передачи подводных сигналов (см. рис. 2).

Теперь рынок начал стимулировать предпринимаемые усилия. Работа Грея и Мунди привела к учреждению в Бостоне (США) фирмы Сабмарин Сигнал Компани (Submarine Signal Company, в настоящее время она входит в компанию Рэйтеон (Raytheon)). Однако быстрое развитие радиосвязи и пеленгации создавало угрозу рынку гидроакустических навигационных устройств.

В 1912 г. Сабмарин Сигнал Компани приняла на работу канадца Р. А. Фессендена (рис. 3) для разработки источника звука, более эффективного, чем пневматический или электрический колокол.

Фессенден разработал и построил преобразователь с подвижной катушкой для передачи гидроакустических сигналов. Осциллятор Фессендена, который по конструкции был чем-то похож на электродинамический громкоговоритель (рис. 4), позволил кораблям поддерживать связь друг с другом с помощью азбуки Морзе и регистрировать эхо от подводных объектов. Передаваемая в воду акустическая мощность составляла около 2 кВт на резонансной частоте 540 Гц, а электроакустическая эффективность – 40–50%.

В 1914 г. процесс эхолокации, известный также как дальнометрия с помощью отраженных сигна-

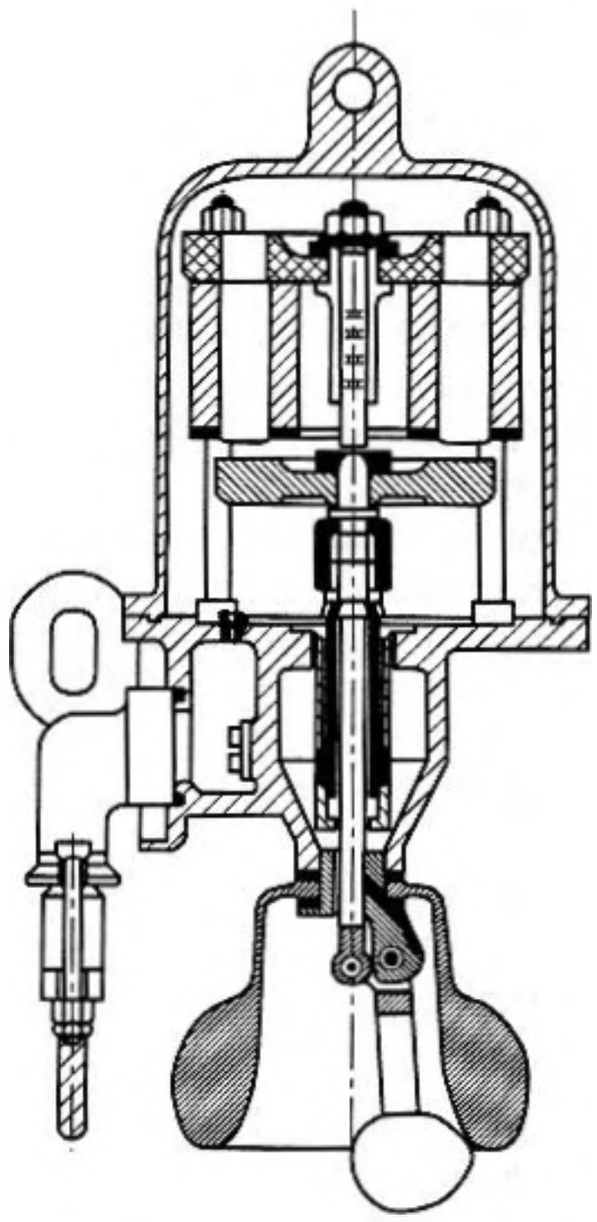

Рис. 2. Электрический подводный колокол.

Рис. 3. Реджинальд А. Фессенден [3].

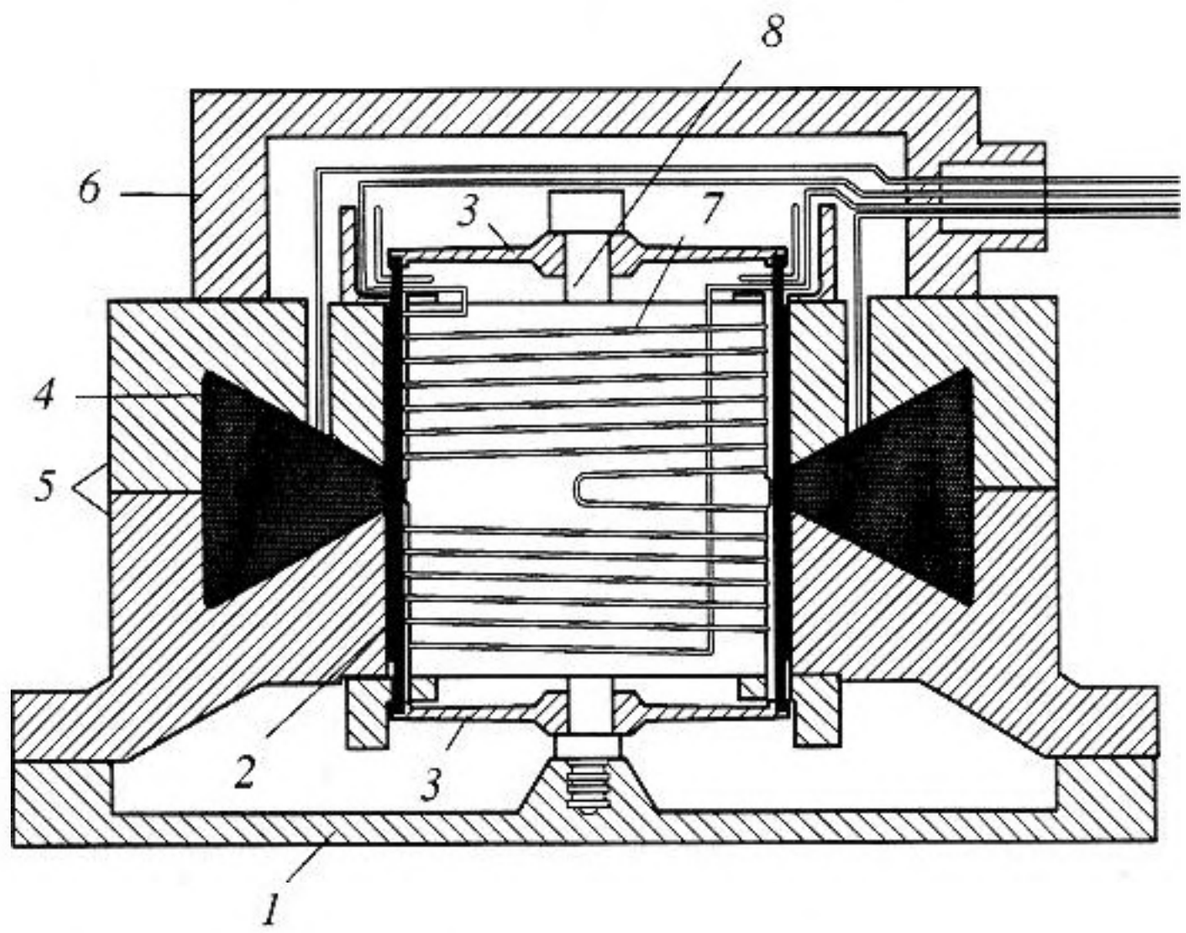

Рис. 4. Рабочая часть осциллятора Фессендена в разрезе: (*1*) диафрагма диаметром около 60 см, (*2*) подвижный проводник из медной трубки, (*3*) гибкие диски, (*4*) катушка, (*5*) электромагнит, (*6*) железный сердечник, (*7*) витки проволоки, (*8*) стальной болт [3].

лов, был достаточно разработан, чтобы обнаруживать айсберги на расстоянии 3.2 км. К сожалению, эти разработки появились слишком поздно, чтобы предотвратить катастрофу "Титаника".

ГИДРОАКУСТИКА В ПЕРИОД I МИРОВОЙ ВОЙНЫ

Начало I Мировой войны и начатая германской стороной несколько позже неограниченная подводная война стали импульсом к развитию многочисленных военных приложений гидроакустики. Во Франции русский инженер-электротехник Константин Шиловский совместно с французским физиком Полем Ланжевеном (1872–1946 гг.) работал над прибором, включавшим в себя конденсаторный (электростатический) прожектор и угольный микрофон, размещенный в фокусе вогнутого акустического зеркала. В 1916 г. они подали заявку на патент, включавшую в себя принцип их метода и приборы. В том же году им удалось передать сигнал под водой на расстояние 3 км и зарегистрировать отражение от железной пластины на расстоянии 100 м. Поскольку после получения патента Шиловский прекратил работу над этим проектом, в 1917 г. Поль Ланжевен обратил свое внимание на пьезоэлектрический эффект, открытый Жаком и Пьером Кюри в 1880 г., для того, чтобы разработать передатчики и приемники для использования под водой. Для своего кварцевого приемника Ланжевен использовал недавно разработанный электроламповый усилитель и в 1918 г. он завершил работу над преобразователем на основе слоев "сталь–кварц–сталь" (рис. 5). С помощью этого источника расстояние односторонней передачи было увеличено до 8 км. Были также слышны четкие сигналы, отраженные от подводной лодки.

Кварцевая пластина была послана Роберту Бойлу в Англию. В 1916 г. он организовал группу для исследований в области подводного ультразвука. Его эксперименты с кварцевым приемни-

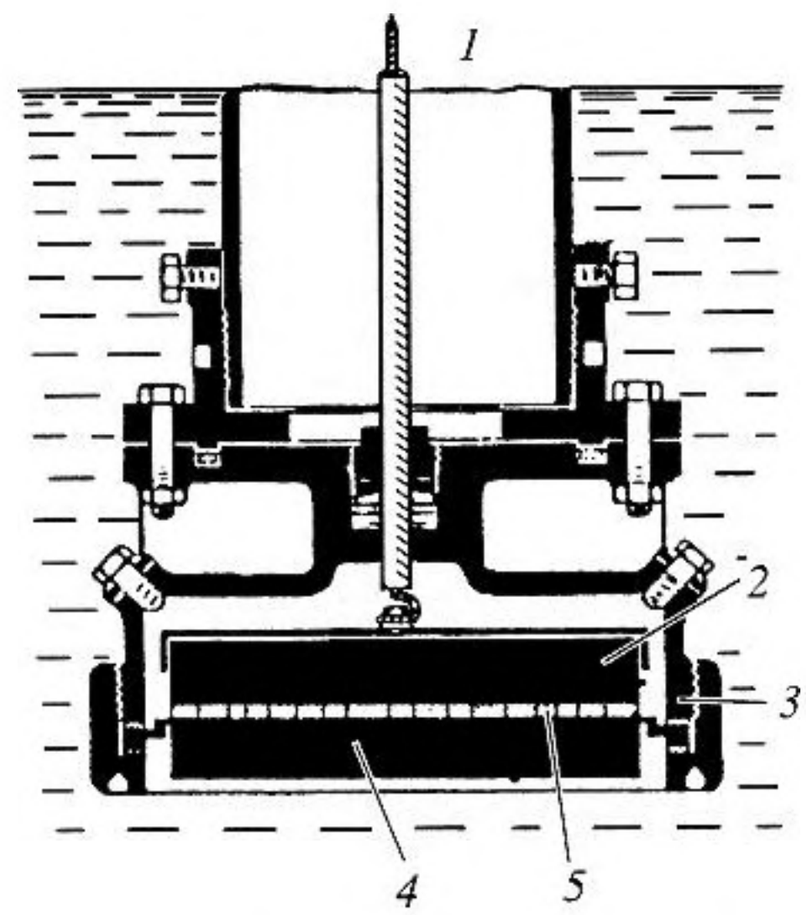

Рис. 5. Излучатель-приемник Ланжевена на основе пьезоэлектрического кварца. Несмотря на случайную изменчивость свойств кварца вдоль оси Y, Ланжевену удавалось при работе в активном режиме обнаруживать подводные лодки на расстоянии более 8 км, благодаря использованию электролампового усилителя. Угол раскрытия луча преобразователя составлял 20° при частоте возбуждения 38 кГц [4].

1. К генератору и приемнику; *2*. Круглый внутренний стальной электрод; *3*. Водонепроницаемый контейнер; *4*. Круглый внешний стальной электрод; *5*. Слой тонких пластинок кварца.

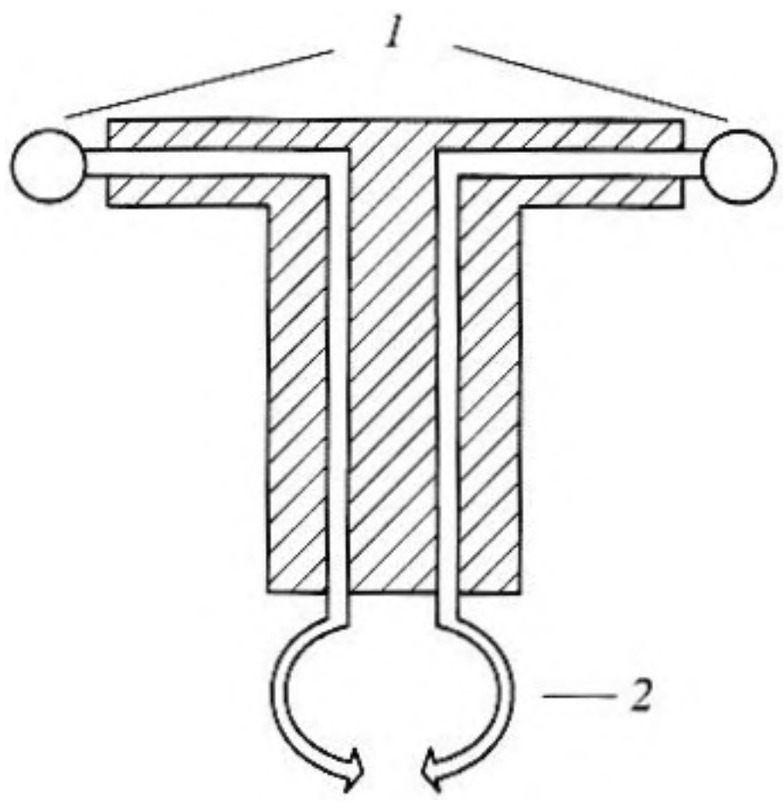

Рис. 6. Простой вращаемый стетоскоп с резиновыми капсулами для прямого прослушивания. С помощью этого устройства можно было регистрировать подводные взрывы на расстоянии 120 км. Он устанавливался на сторожевых катерах и подводных лодках.
1. Резиновые капсулы; *2*. Стетоскоп.

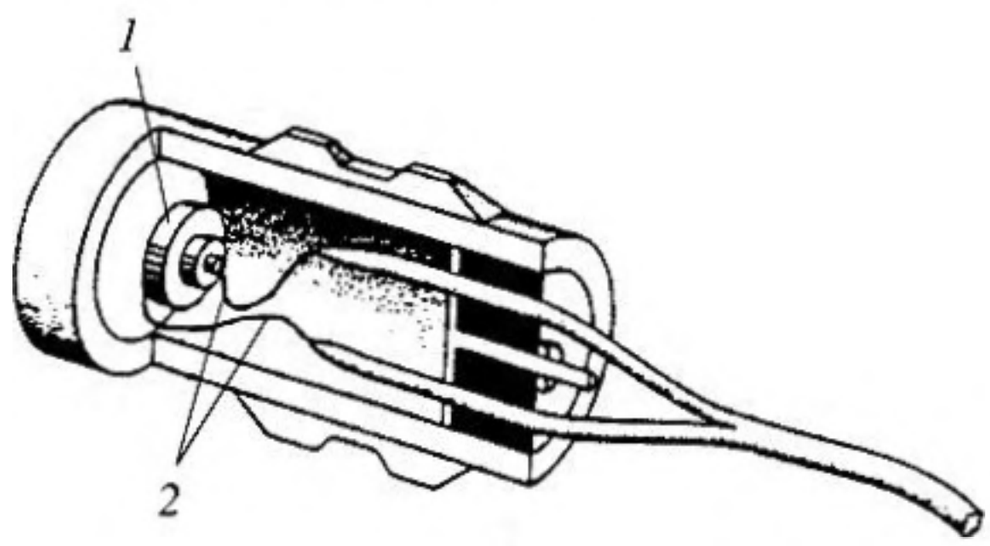

Рис. 7. Американское изобретение времен I Мировой войны, так называемая "Крыса" (из-за схожести с грызуном), состоящее из резиновой диафрагмы и водонепроницаемого корпуса, содержащего угольный микрофон и электрические провода. Нерезонансная диафрагма позволяла получить широкополосный гидрофон, особенно подходивший для работы в диапазоне 500–1500 Гц.
1. Угольный микрофон; *2*. Электрические провода.

ком были так же успешны, как и эксперименты Ланжевена. Название "АСДИК" (ASDIC – Anti-Submarine Detection Investigation Committee – Комитет по исследованиям для обнаружения подводных лодок) для системы подводного обнаружения было придумано именно тогда. Размах и важность подводных военных действий во времена I Мировой войны видны из количества кораблей и их типов, собранных английским адмиралом Джелликоу в ноябре 1917 г., когда в германском флоте было 137 подводных лодок. Для защиты конвоев от немецких субмарин требовался флот из следующих кораблей и воздушных судов: 277 эсминцев, 44 торпедных катера, 65 подводных лодок, 50 дирижаблей, 194 самолета, 849 вооруженных траулеров, 867 сетевых заградителей, 68 катеров береговой охраны, 30 сторожевых кораблей, 77 судов-приманок, 24 минных тральщика и 49 яхт. Тем не менее, во время I Мировой войны подводные лодки потопили более 4800 торговых судов.

В США д-р Харви Хейес собрал группу специалистов на Военно-морской экспериментальной станции в Нью-Лондоне под девизом: "Изобретать наилучшие технологии как можно быстрее для победы над германскими подводными лодками". Хейес и его группа разработали буксируемую антенну из гидрофонов под названием "Угорь". Была испытана пассивная гидролокационная установка из 48 гидрофонов (закрепленная на корпусе корабля и буксируемая). Эта установка была самой прогрессивной пассивной гидролокационной системой, созданной во время I Мировой войны. Некоторые из американских изобретений, сделанных в те времена, показаны на рис. 6 и 7.

В Германии, в г. Киле, Генрих Хехт разработал подводный гидродинамический источник звука (рис. 8) и электромагнитный мембранный излучатель, который во время войны был установлен на нескольких сотнях надводных кораблей и подводных лодок. Кроме того, немецкий инженер Хуго Лихте (1891–1963 гг.) выполнил довольно обширные исследования в области гидроакустики. Он сделал правильные выводы в отношении влияния температуры, солености и давления на скорость звука и в 1919 г. предсказал, что в глубоководных районах рефракция вверх, вызываемая давлением, должна быть причиной слышимости звука на чрезвычайно больших расстояниях. Этот факт был подтвержден много лет спустя.

ГИДРОАКУСТИКА В 1918–1940 ГОДАХ

В период с 1918 по 1940 г. широким фронтом, но медленно, развивались три области гидроакустики, основывавшиеся на опыте времен войны. Это были эхолокация, акустическая дальнометрия и сейсмическая геологоразведка. Огромный толчок их развитию был дан прогрессом в электронике, который сделал доступными новые методы и устройства для усиления, обработки и визуализации регистрируемых гидроакустических сигналов. В 1919 г. М. Марти запатентовал записывающее устройство для звукового зондирования. Это записывающее устройство, оказавшееся чрезвычайно важным для исследования океана с помощью акустических волн, состояло из листа бумаги, медленно двигавшегося под пишущим узлом, оставлявшим на бумаге след при движении по листу в направлении, перпендикулярном его перемещению. Пишущий узел перемещался перпендикулярно направлению движения бумаги под воздействием электрического сигнала, амплитуда которого была пропорциональна сигналу на выходе гидроакустического приемника. Сопоставляя последовательность эхосигналов, можно было по прошествии определенного времени получить профиль морского дна. В 1922 г. при исследовании

трассы для прокладки кабеля между Францией и Алжиром были получены первые протяженные профили глубин.

Необходимость создания нового улучшенного и более прочного мощного источника звука вместо преобразователя ланжевеновского типа на основе кварца или кристаллов сегнетовой соли привела Г.У. Пирса (США) к разработке магнитострикционного осциллятора, работавшего на частоте 25 кГц при мощности излучаемого звука в несколько киловатт без риска поломки излучающего элемента, что часто случалось с преобразователями на основе кристаллов.

В тот же период Управление береговых и геодезических изысканий США при попытках геодезической разведки с применением горизонтальной звуколокации обнаружило сильную изменчивость интенсивности и скорости звука в море. С такой же изменчивостью столкнулась и Военно-морская исследовательская лаборатория США, основанная в 1923 г. по предложению Эдисона, при попытках улучшить способы обнаружения подводных лодок при работе на частотах 20–30 кГц. Был выявлен суточный цикл этой изменчивости, когда утром оборудование работало в соответствии со своими техническими характеристиками, а во второй половине дня не удавалось получить эхосигналов от подводных лодок, кроме как с очень коротких дистанций. Этот "дневной эффект" был обнаружен в нескольких районах океана. Д-р Харви Хейес и ученые из недавно открытого океанографического институт в Вудс-Хоуле, включая главу института Коламбуса Айселина, решили изучить это явление более глубоко.

Вскоре стало ясно, что верхние слои океана в течение дня нагреваются солнечными лучами. Таким образом, создается слой толщиной 4.5–9 м, температура которого на 1–2°С выше, чем у более однородного слоя воды под ним, причем температура постепенно уменьшается с глубиной от поверхности моря. Поскольку появление теплого слоя совпадало с ухудшением приема сигналов, ученые решили, что теплый слой заставляет звук, попадающий в воду, уходить вниз, создавая, таким образом, зону акустической тени, где может спрятаться подводная лодка. Это открытие, сделанное в 1937 г. благодаря сотрудничеству акустиков и океанографов, привело к появлению новой области науки – акустической океанографии. В том же году Ателстан Спилхаус из Массачусетского технологического института изобрел и построил первый батитермограф – небольшое устройство в форме торпеды, в котором находились датчик температуры и элемент, чувствительный к изменению гидростатического давления. К началу II Мировой войны все корабли Военно-морского флота США, предназначенные для борьбы с подводными лодками, были оснащены устройствами Спилхауса.

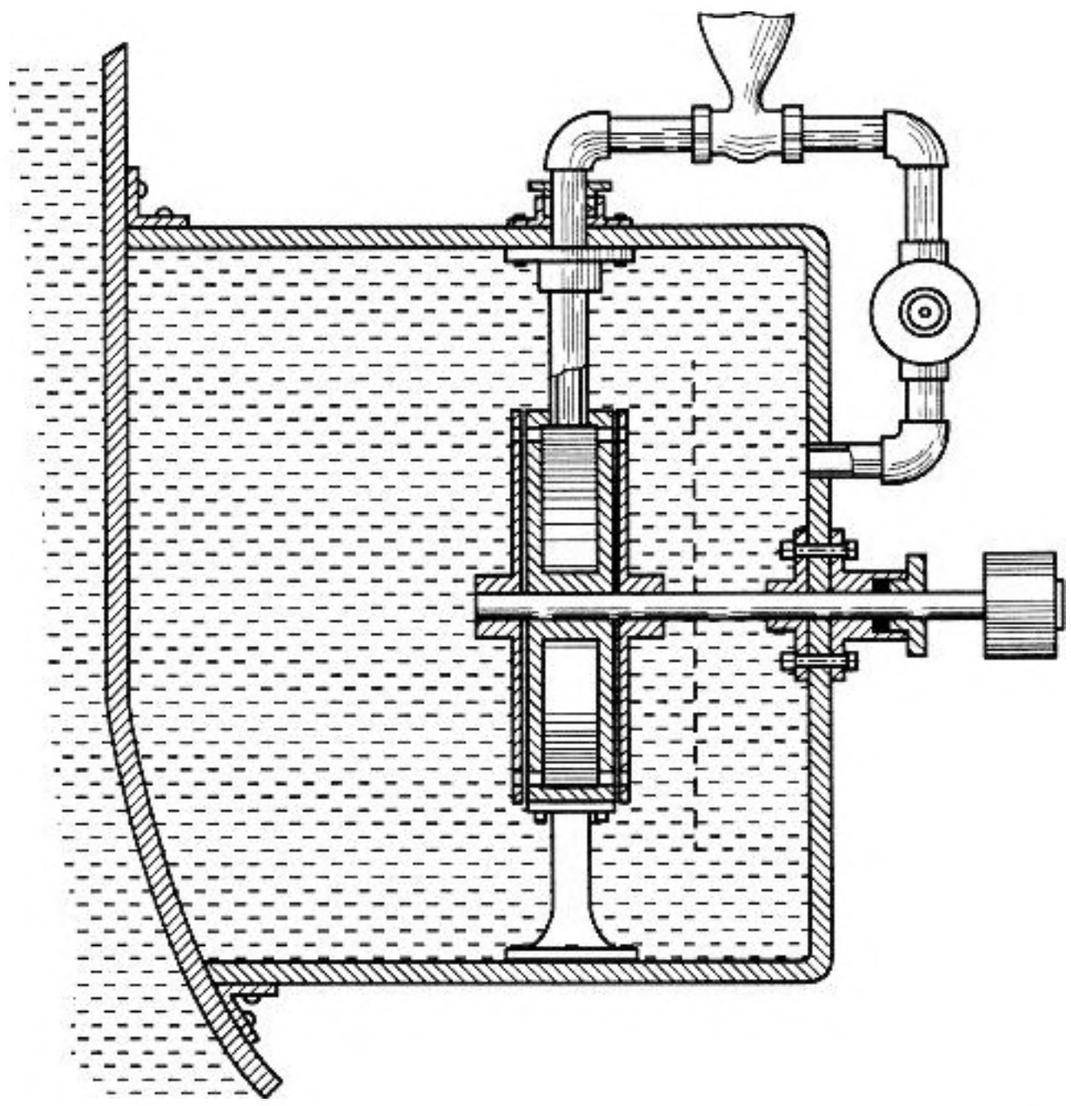

Рис. 8. Гидродинамическая сирена с акустической мощностью до 600 Вт для возбуждения звука под водой на частотах около 1 кГц [5].

В годы перед II Мировой войной работы по гидролокации основывались на использовании кристаллов кварца, сегнетовой соли и турмалина, а также магнитострикционных железо-никелевых сплавов. Были разработаны и испытаны гидрофоны, а также линейные и планарные антенны, которые нашли применение в военно-морских силах основных держав. На рис. 9 показан гидрофон на основе сегнетовой соли, разработанный в 1935 г. в Германии.

ГИДРОАКУСТИКА ВО ВРЕМЯ II МИРОВОЙ ВОЙНЫ

Начало II Мировой войны привело к началу интенсивных гидроакустических исследований в Европе, США и на Дальнем Востоке. Борьба с подводными лодками стала очень важным делом. С помощью совместного использования системы конвоев, воздушного патрулирования и аппаратуры АСДИК удавалось эффективно отражать обычные дневные нападения изначально небольшого количества немецких подводных лодок. Однако вскоре немцы научились нападать на конвои по ночам, используя тактику так называемых "волчьих стай". Разработка самолетного радиолокатора и, в частности, монополия союзников на радиолокатор с длиной волны 10 см, стали большим подспорьем в борьбе с немецкими субмаринами. За время войны Германия потеряла 781 подводную лодку.

Наряду с разработкой систем оружия для подводной войны, таких как торпеды с акустическим наведением, акустические морские мины и сканирующий гидролокатор, стала гораздо понятнее

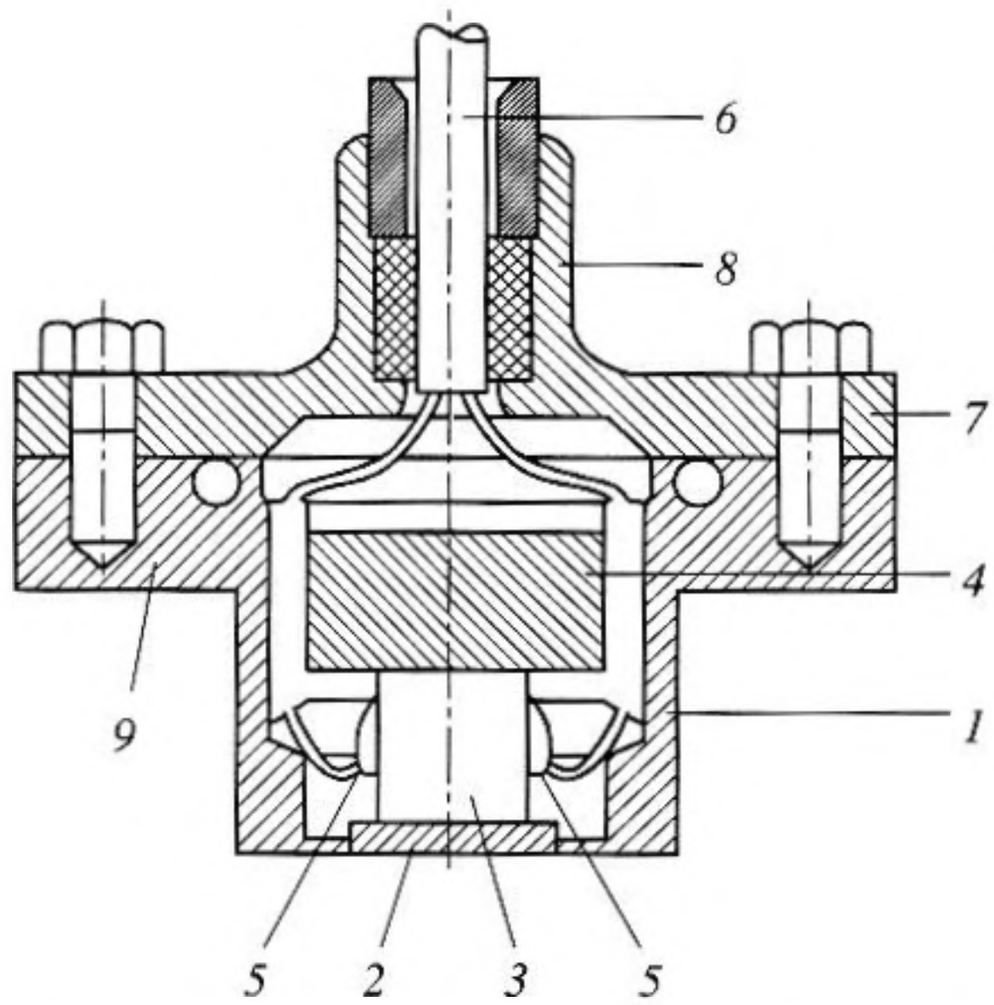

Рис. 9. Разработанный в Германии гидрофон "Gruppen Horch Gerat" (GHG) на основе сегнетовой соли. Использовался как элемент приемных антенн. (*1*) Корпус, (*2*) мембрана, (*3*) элемент из сегнетовой соли, (*4*) тыльная масса, (*5*) электроды, (*6*) кабель. Эти гидрофоны тщательно изолировались от вибрации и монтировались с жесткими допусками заподлицо на корпусе судна.

природа различных факторов, влияющих на подводное распространение звука. В результате исследований были введены такие понятия, как сила цели, собственный шум судна, подводная реверберация и рассеяние, поглощение звука морской водой. Были проведены исследования и разработана модель распространения звука под воздействием вертикальной изменчивости его скорости, использовавшая "лучевую теорию", заимствованную из теории распространения света. Большая часть результатов, полученных в области гидроакустики в годы II Мировой войны, была опубликована сразу после ее окончания в 23 отчетах под общим названием "Итоговые технические отчеты Подразделения 6 Национального комитета оборонных исследований". Один из этих отчетов под названием "Физика звука в море" включает в себя главы по распространению звука в глубоководных и мелководных районах, о флуктуациях интенсивности звука и о подводных взрывах как источниках звука.

ГИДРОАКУСТИКА ПОСЛЕ II МИРОВОЙ ВОЙНЫ И ДО 1960 г.

Морис Эвинг, профессор Университета Лихай, в годы войны занимался исследованиями распространения низкочастотного звука в море. Он был убежден, что в океане звук может распространяться на сотни и, может быть, тысячи километров при условии правильного размещения источника и приемника звука. В 1945 г. ему удалось зарегистрировать звук небольшого взрыва на расстоянии более 3000 км на трассе между Элевтерой на Багамских островах и Дакаром в Западной Африке. Распространение звука происходило в постоянном глубоководном звуковом канале. Эвинг назвал его каналом СОФАР (SOFAR – Sound Fixing and Ranging). Первое применение этого открытия было направлено на создание системы спасения летчиков, сбитых над океаном. Находясь в надувной лодке, летчик должен был сбрасывать за борт небольшие подрывные заряды, отрегулированные на подрыв на оси канала СОФАР в Северной Атлантике, расположенной на глубине 1200 м. Звук от взрыва должен был, отразившись, вернуться на ось канала, и на его распространение влияло бы только цилиндрическое расхождение. Сигналы должны были регистрироваться приемниками, расположенными на оси канала в различных местах за пределами континентального шельфа, что сделало бы возможным определение местоположения их источника путем сравнения времен их прихода. Звуковой канал исследовался не только Эвингом в США, но и академиком Л.М. Бреховских в СССР. Вскоре после войны, анализируя сигналы от подводных взрывов в Японском море, он обнаружил существование звукового канала в Тихом океане.

Эвинг и Дж.Л. Уорзел вместе со своими коллегами из Океанографического института в Вудс-Хоуле исследовали также дальнее распространение звука в мелководных районах. На основе их данных Хаим Пекерис создал свою теорию распространения нормальных волн. Концепция распространения упругих волн позволила гидроакустикам смоделировать и понять сложную акустику мелководных районов. Исследования Эвинга и Уорзела заложили также основу для серии исследований геологической структуры морского дна, выполнявшихся в основном в мелководных районах у Восточного побережья США. Сотрудничество группы Эвинга из Колумбийского университета и ученых из Океанографического института в Вудс-Хоуле оказалось очень плодотворным для развития подводных сейсмологических исследований. Плодами этого сотрудничества стали "рефракционный метод" и "сейсмический профилометр непрерывного действия".

Группа К.Ф. Эйринга из Сан-Диего (США) наблюдала рассеянное эхо из объема водяного столба. Эти эхосигналы приходили в полдень из горизонтальных слоев, расположенных на глубинах порядка 400 м, однако к вечеру они мигрировали к поверхности. К рассвету эти слои сдвигались вниз, что завершало суточный цикл. С помощью морских биологов удалось показать, что причиной такого рассеяния были маленькие рыбы, питающиеся планктоном, имеющие плавательный пузырь и обитающие в глубоководных районах океана. Пик исследований глубоководных рассеивающих слоев пришелся на 1949–1957 гг.

В последующие годы были получены важные результаты в области морской биоакустики.

В это же время были выполнены важные исследования механизмов поглощения звука в море и источников и спектров шума окружающей среды.

Обширные исследования и успешные разработки в области гидроакустики, выполненные до 1960 г., а также развитие компьютерных технологий после 1960 г. сформировали основу для практически взрывного развития гидроакустики в период с 1960 г. до наших дней. Среди основных направлений гидроакустических исследований и разработок необходимо упомянуть моделирование подводного распространения звука с помощью теории мод, методы параболических уравнений и конечных элементов для учета реальных зависимостей от расстояния распространения и влияния морской поверхности и дна, исследования реверберации и направленности шума окружающей среды, подводную акустическую томографию, включая международную программу АТОК (ATOC – Acoustic Thermometry and the Ocean Climate – Акустическая термометрия и климат океана) – совместные исследования по акустике, океанологии и метеорологии для получения надежных долгосрочных прогнозов погоды, изучение биомассы в океане акустическими методами и обширные исследования морского дна и придонных слоев в интересах добычи полезных ископаемых, нефти и газа, а также для прокладки кабелей и трубопроводов.

За 2300 лет гидроакустика продемонстрировала экспоненциальную тенденцию своего развития. Важность влияния военных применений на развитие гидроакустики очевидна, и из-за этой тесной взаимосвязи ее часто связывают с военным делом, что иногда отодвигает на второй план важные гражданские применения результатов гидроакустических исследований. Однако интенсивные гражданские исследования и разработки, финансируемые Европейским Союзом в рамках нескольких морских исследовательских программ MAST (Marine Science and Technology – Морские исследования и технологии) и исследовательскими фондами стран, не входящих в ЕС, вносят значительный вклад в широкомасштабные работы в области гидроакустики, позволяющие адекватно ответить на вызов, бросаемый нам Мировым океаном. Использование автономных глубоководных аппаратов для гидроакустических исследований и работы в труднодоступных и враждебных нам глубинах океана только начинается. Широкополосные преобразователи и интеллектуальные датчики в будущем позволят нам получить новые знания, и интерес ученых к использованию звука для исследования океана никогда еще не был столь высок. Все это указывает на то, что исследования в области гидроакустики будут расширяться, используя все обилие ценнейших знаний, накопленных за более чем два тысячелетия ее развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lindsay R.B.* Acoustics – Historical and Philosophical Development // Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, PA, USA, 1973.
2. *Tyndall J.* On Sound // 3rd Ed., D. Appeton, New York, 1876.
3. *Hersey J.B.* A chronicle of man's use of ocean acoustics // Oceanus. 1977. V. 20. № 2. P. 8–21.
4. *Lasky M.* Review of undersea acoustics to 1950 // J. Acoust. Soc. Amer. 1977. V. 61. № 2. P. 283–297.
5. *Ziehm G.H.* Kiel – Ein frühes Zentrum des Wasserschalls // Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Erganzungsheft, Reihe B, Nr. 20. 1988.
6. *Clay C.S. and Medwin H.* Acoustical Oceanography: Principles and Applications. John Wiley & Sons, 1977.
7. *Brekhovskikh L. and Lysanov Yu.* Fundamentals of Ocean Acoustics // Electrophysics Ser. Vol. 8. Springer-Verlag, 1982.
8. *Urick R.J.* Principles of Underwater Sound // 3rd Ed., McGraw-Hill, 1983.
9. *Apel J.R.* Principles of Ocean Physics // Internat. Geophys. Ser. Vol. 38. Academic Press, 1987.

Features of Underwater Acoustics from Aristotle to Our Time

Leif Bjorno

Stendiget 19, DK-2630 Taastrup, Denmark
e-mail: prof.lb@get2net.dk

Abstract—Underwater acoustics has been one of the fastest growing fields of research in acoustics. In particular, the 20th Century has brought our understanding of underwater acoustics phenomena a great step forward. Two World Wars contributed to the recognition of the importance of research in underwater acoustics, and the momentum in research and development gained during World War II did not reduce in the years after the war. The so-called Cold War and the development in computer technology both contributed substantially to the development in underwater acoustics over the second half of the 20th Century. However, the very wide-spread field of underwater acoustic activities started nearly 2300 years ago with human curiosity about the fundamental nature of sound in the sea. From primitive philosophical and experimental studies of the velocity of sound in the sea and through centuries of successes and failures, the knowledge about underwater acoustics has developed into its high-technological status of today. In particular the development through the period from Aristotle (384--322 b. C.) to 1960 formed the basis for the tremendous research and development efforts we have witnessed in our time. In this paper most emphasis will be put on the development in underwater acoustics through this period of nearly 2300 years duration, and only the main trends in later research will be mentioned.