

## НЕЗЕРКАЛЬНОЕ ОТРАЖЕНИЕ, РЕЗОНАНСНОЕ РАССЕЯНИЕ И ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВУКА УПРУГИМИ ТЕЛАМИ В ВОДЕ

© 1997 г. Л. М. Лямшев

В конце 40-х–начале 50-х годов под руководством Ю.М. Сухаревского на Черном море были начаты систематические исследования отражения звука надводными кораблями и другими объектами. До 1957 года мне нередко приходилось быть его “правой рукой” во время этих испытаний, как их тогда называли. Скоро выяснилось, как и следовало ожидать, что бытовавшее представление о реальном объекте как об абсолютно отражающем звук теле является слишком грубым. “Вспомнили”, что объекты представляют собой упругие оболочки или конструкции из пластин, подкрепленных ребрами жесткости, шпангоутами и стрингерами.

В 1951 г. Ю.М. Сухаревский предложил мне, его аспиранту, заняться изучением отражения звука пластинами и оболочками в воде. Опубликованных работ по этой проблеме к этому времени было очень мало.

Одна работа привлекла наше внимание [1]. Ее автор экспериментально исследовал отражение звука тонкой стальной пластиной в воде. Он обнаружил, что при некоторых больших углах падения звука наблюдается сильное отражение в направлении, обратном направлению падающей волны. Оно было названо незеркальным отражением, поскольку это обратное отражение имеет место при неперпендикулярном падении звуковой волны на пластину. Было установлено также, что это незеркальное отражение сопровождается изгибными колебаниями пластины. Однако полного представления о физическом механизме незеркального отражения не было.

Исследуя подробно отражение звука тонкими латунными, стальными и алюминиевыми пластинками в воде в направлении, противоположном направлению падающей волны, мы обнаружили новый вид незеркального отражения. Как оказалось, оно обусловлено поперечными колебаниями сжатия (продольными колебаниями) пластины [2].

Наши дальнейшие исследования привели к обнаружению эффектов незеркального отражения звука ограниченными цилиндрическими и сферическими оболочками. Была разработана теория незеркального отражения звука пластинами и оболочками. Обнаружено явление пространственно-частотного резонанса при взаимодействии ограниченных пластин и оболочек со звуковым

полем в воде. Введено понятие длины пространственного установления собственных колебаний в пластине (оболочке), погруженной в жидкость. Сформулированы простые критерии, позволившие понять, в каких случаях оболочки или пластины ведут себя в жидкости как ограниченные или безграничные. Результаты исследований были опубликованы в [3–5] и других работах автора.

Из анализа физической природы и теории незеркального отражения звука пластинами и оболочками следовало также, что незеркальное отражение возникает при таких углах падения, когда фазовая скорость распространения падающей звуковой волны вдоль пластины или оболочки совпадает со скоростью нормальной волны в пластине или оболочке в жидкости. Эксперименты с тонкими стержнями, толстыми стержнями (упругими цилиндрами) и толстыми пластинами также подтвердили это заключение. Были обнаружены незеркальные отражения, обусловленные продольными и изгибными волнами в тонких стержнях, волнами Лэмба в толстых пластинах и упругих цилиндрах [6–8].

Было выяснено также, что с явлением пространственно-частотного резонанса связана тонкая структура незеркального отражения и резонансное рассеяние звука цилиндрическими, сферическими оболочками и упругими телами в жидкости. Резонансное рассеяние наблюдается и при перпендикулярном падении звуковой волны на цилиндрическую оболочку, если собственная частота одной из форм колебаний (мод) совпадает с частотой падающей звуковой волны, а длина периферических волн, образующих моду, больше длины звуковой волны в жидкости на этой резонансной частоте. Понятие длины пространственного установления колебаний в пластине или оболочке вытекало не только из физических представлений [3], но из строгой теории о дифракции звука на краю полубесконечной пластины [9] и полубесконечной цилиндрической оболочки [10]. Это понятие оказалось важным также и для понимания роли неоднородностей – ребер жесткости, стрингеров и шпангоутов в формировании незеркального отражения и рассеяния звука. Действительно, если размеры части пластины (оболочки), ограниченной ребрами жесткости, малы по сравнению с длиной пространственного установления, то эта часть пластины ведет себя как ограниченная,

что приводит к росту амплитуд незеркального отражения.

Представление о том, что явление незеркального отражения всегда связано с возбуждением нормальной волны в упругой пластине или оболочке, позволило понять роль кривизны пластины или оболочки в формировании незеркального отражения. При отражении звука плоской пластиной незеркальное отражение наблюдается в области двух углов падения, когда в пластине возбуждаются либо продольные, либо изгибные колебания (волны). При наличии в одном из направлений кривизны пластины незеркальное отражение может возникнуть и при других углах падения, поскольку в пластине обладающей кривизной, могут существовать нормальные волны продольного и изгибного типа, скорости распространения которых отличаются (больше) скорости распространения, соответственно, продольных и изгибных волн в плоской пластине.

Главным результатом исследований незеркального отражения звука пластинами и оболочками в жидкости явился вывод о том, что нередко в практически важных случаях отражение звука реальными объектами имеет природу незеркального отражения. Этот вывод оказался особенно важным для низких частот. На низких частотах незеркальное отражение и резонансное рассеяние приводит к значительному возрастанию сечения рассеяния объекта по сравнению с его т.н. "геометрическим" сечением рассеяния. Очень важно при этом то, что незеркальное отражение и резонансное рассеяние на низких частотах не удается устранить традиционными "пассивными" методами вибродемпфирования, вибропоглощения и звукопоглощения.

Уже в середине 50-х годов стала очевидной необходимость исследований излучения звука оболочками в жидкости. К этому времени многое из физики отражения звука оболочками и пластинами было понято. Возникла мысль использовать акустический принцип взаимности, чтобы продвинуться и в проблеме излучения звука оболочками, опираясь на результаты исследований отражения звука. Выяснилось, что строгого математического обоснования принципа взаимности в акустике не существовало, несмотря на то, что со времени опубликования Гельмгольцем первой работы о принципе взаимности (1860 г.), а затем и публикаций Рэлея прошло около ста лет. На основе теории самосопряженных операторов и формулы Грина строгое математическое доказательство принципа взаимности было получено. Об этом впервые сообщалось в нашем докладе на IV-й Всесоюзной акустической конференции в 1958 г. [11]. В 1959 г. оно было опубликовано в работе [12]. Одним из центральных результатов [12] явилось новое интегральное соотношение

взаимности, связывающее поля излучения и дифракции звука оболочками. Из этого соотношения строго следовало, что все эффекты, наблюдавшиеся ранее при отражении звука упругими телами в воде, присутствуют и в полях излучения пластин и оболочек: пространственно-частотный резонанс и наличие характерных максимумов излучения в угловой характеристике поля излучения, обусловленных нормальными волнами, резонансное излучение и др. Этот вывод был подтвержден в экспериментах [13].

На основе интегрального соотношения взаимности [12] был предложен метод решения краевых задач излучения звука пластинками, оболочками и, вообще, упругими телами [14], а также разработаны методы исследования акустических полей излучения (см., например, [15–17]). Работа [12] получила широкую известность за рубежом. Ее нередко цитировали сразу после классических работ Гельмгольца и Рэлея (см., например, [15–17]). Что касается работ, в которых были опубликованы результаты исследований незеркального отражения звука пластинами и оболочками, то, по-видимому, некоторые из них в какой-то мере "опередили свое время". Этим возможно объясняется, что некоторые из опубликованных нами результатов были почти через 30 лет как бы "открыты" заново. Так, например, в статье [18], опубликованной в 1984 г., полностью повторяются результаты нашей работы [8] о незеркальном отражении звука толстой пластиной в воде, обусловленном волнами Лэмба. Можно было бы привести и другие примеры.

Начиная с 60-х годов в СССР и за рубежом публикуются многочисленные статьи и монографии по проблеме отражения и излучения звука оболочками [19]. Сформировалось научное направление или ветвь гидроакустики – акустика оболочек. Необходимо сказать, что у истоков этого направления, как и многих других ветвей гидроакустики, был Ю.М. Сухаревский. Следует отметить важную роль Г.Д. Малюжинца – физика-теоретика и сподвижника Юрия Михайловича в развитии этого направления. Его советы, многочисленные дискуссии и дружеская критика всегда оказывали стимулирующее влияние и часто помогали глубже понять физическую природу отражения и излучения звука оболочками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Finney W.Y.* Reflection of Sound from Submerged Plates // *JASA*, 1948. V. 20. № 5. P. 626.
2. *Лямшев Л.М.* Отражение звука тонкой пластинкой в воде // *ДАН СССР*. 1954. 99. № 5. С. 719.
3. *Лямшев Л.М.* Отражение звука тонкими пластинками и оболочками в жидкости. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 71 с.

4. Лямшев Л.М. Незеркальное отражение звука тонкими ограниченными пластинами в жидкости // *Acta Phys. Academical Scientarum Hungarical.* 1956. V. 6. № 1. P. 56.
5. Лямшев Л.М. Незеркальное отражение звука тонкой цилиндрической оболочкой // *Акуст. журн.* 1956. Т. 2. № 2. С. 188.
6. Лямшев Л.М. Отражение звука тонким стержнем в воде // *ДАН СССР.* 1956. Т. 110. № 1. С. 48.
7. Лямшев Л.М. Рассеяние звука упругими цилиндрами // *Акуст. журн.* 1959. Т. 5. № 5. С. 58.
8. Лямшев Л.М., Рудаков С.Н. Отражение звука толстыми ограниченными пластинами в жидкости. *Акуст. журн.* 1956. Т. 2. № 2. С. 228.
9. Лямшев Л.М. Дифракция звука на полубесконечной упругой пластине в движущейся среде // *Акуст. журн.* 1966. Т. 12. № 3. С. 240.
10. Лямшев Л.М. Рассеяние звука полубесконечной цилиндрической оболочкой в движущейся среде // *Акуст. журн.* 1967. Т. 13. № 1. С. 90.
11. Лямшев Л.М. Излучение и рассеяние статистических звуковых полей тонкими упругими оболочками и пластинками // *Сб. реф. докл. IV Всесоюз. конф. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1958.*
12. Лямшев Л.М. К вопросу о принципе взаимности в акустике // *ДАН СССР.* 1959. Т. 125. № 6. С. 1231.
13. Лямшев Л.М., Рудаков С.Н. Излучение звука пластинками и оболочками в воде // *Акуст. журн.* 1961. Т. 7. № 3. С. 380.
14. Лямшев Л.М. Об одном способе решения задач излучения звука тонкими упругими оболочками и пластинками // *Акуст. журн.* 1959. Т. 5. № 1. С. 122.
15. ten Wolde T. On the Validity and Application of Reciprocity in Acoustical, Mechano-Acoustical and other Dynamical Systems // *Acustica.* 1973. V. 28. № 1. P. 23.
16. Steenhoek H.F., ten Wolde T. The Reciprocal Measurement of Mechanical-Acoustical Transfer Functions // *Acustica.* 1970. V. 23. № 6. P. 301.
17. Fahy F.Y. The Reciprocity Principle and Applications in Vibro-Acoustical Measurements // *Proc. Inst. Acoust.* 1990. V. 12. № 1. P. 1.
18. de Billy M., Adler L., Quentin G. Measurements of Back-Scattering Leary Lamb Waves in Plates // *JASA.* 1984. V. 75. № 3. P. 998.
19. Музыченко В.В. Дифракция звука на упругих оболочках. М.: Наука, 1993. 380 с.

УДК 534.231

## ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОЙ СРЕДЫ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

© 1997 г. Г. И. Приймак

Начиная с шестидесятых годов в Акустическом институте АН СССР по инициативе Л.М. Бреховских и Ю.М. Сухаревского началась систематическая комплексная исследования статистических характеристик акустических полей, обусловленных статистическими неоднородностями морской и океанической сред.

Теоретическая часть исследований проводилась профессором Л.А. Черновым, экспериментальная под руководством профессора Ю.М. Сухаревского в экспедициях АКИН на Сухумской морской станции, а затем и в океанических рейсах на э/с АКИН "Сергей Вавилов" и "Петр Лебедев". Результаты этих исследований вошли составной частью в большое число научно-исследовательских работ, выполнявшихся в период 1954–90 гг., а также в рекомендации по созданию гидроакустической техники, выполняемой институтами и предприятиями промышленности. Многие результаты нашли свое отражение также в различных печатных публикациях и докладах. При проведении этих исследований был создан и использован большой набор экспериментальной техники. Так, например, были построены объем-

ные антенны, типа пространственных крестов для измерения характеристик тепловых неоднородностей, турбулентных пульсаций скорости, течения, параметров внутренних волн. Положение антенны непрерывно регистрировалось дистанционными глубиномерами, датчиками крена в двух плоскостях, компасами. Все измерения выводились многожильными кабелями в места регистрации на судно или берег и записывались в единой системе времени на шлейфовые осциллографы высокой чувствительности, магнитофоны и другие регистраторы. Затем все материалы подвергались статистической обработке. Звуковые сигналы регистрировались на одиночные гидрофоны и различные гидроакустические антенны. За время исследований был накоплен значительный материал и получены результаты в следующих основных направлениях:

– статистические зависимости параметров тепловых флуктуаций и турбулентных пульсаций от средних характеристик теплового и скоростного режимов среды;

– оценки характеристик флуктуаций параметров акустических сигналов, обусловленных ста-