

ОБ ИСТОРИИ КАФЕДРЫ АКУСТИКИ И РАЗВИТИИ НАУЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ НА КАФЕДРЕ

В. А. Красильников

Первые 10 лет, до переезда в новое здание в 1953 г., кафедра ютилась в небольшом подвальном помещении старого здания на Моховой улице, построенного еще при участии Н. А. Умова. Штат состоял из проф. С. Н. Ржевкина, двух доцентов, трех ассистентов и лаборанта. Исследования проводились в области архитектурной акустики и гидроакустики (С. Н. Ржевкин, В. С. Нестеров, К. А. Велижанина), а также в области атмосферной акустики и приборостроения (В. А. Красильников, К. М. Иванов-Шиц).

Были получены новые результаты по теории резонансных звукопоглотителей и совершенствованию звукопоглощающих систем, в основу чего были положены предыдущие исследования С. Н. Ржевкина [1]. Начавшиеся работы по гидроакустике дали многое для разработки методов измерения поглощения звука дном различных водоемов и моря.

Во втором из указанных направлений были получены важные результаты по распространению звука, света и радиоволн в турбулентной атмосфере [2]. Это были первые работы в проблеме «волны и турбулентность», получившей далее большое развитие. Результаты подытожены в докторской диссертации В. А. Красильникова [3].

С переездом в новое здание факультета кафедра получила в распоряжение специально сконструированные уникальные помещения: большую звукомерную и реверберационную камеры, гидроакустический бассейн с двумя аппаратными, а также комнаты для лабораторий. Кроме того, кафедра располагала полигоном на Пироговском водохранилище канала «Москва—Волга», где проводились гидроакустические измерения. Велась также большая работа в морских экспедициях.

За время существования кафедры по ряду направлений выполнены оригинальные основополагающие исследования, получившие широкое признание в нашей стране и за рубежом, что поставило кафедру в число ведущих коллективов в области акустики.

Охарактеризуем кратко наиболее важные (с моей точки зрения) результаты, полученные в основных направлениях работы сотрудников кафедры.

1. Физика нелинейных колебаний и волн

К этому разделу прежде всего относится нелинейная акустика — одно из основных научных направлений кафедры. Работы, начатые в 1950-е гг., стимулировались как пробелами в фундаментальных основах акустики, так и потребностями практики, связанными с существованием источников интенсивного звука в лабораторных исследованиях, в технике, промышленности, а также в природных средах. В дальнейшем мощные волны стали предметом исследований в других областях физики, что привело к формированию нового раздела науки — теории нелинейных волн.

В середине 1950-х — начале 1960-х гг. В. А. Красильников и Л. К. Зарембо впервые экспериментально обнаружили большие нели-

нейности жидкостей и твердых тел [4, 5, 3*, 12*]*), сильно проявляющиеся даже при умеренных интенсивностях звука. Эти работы стимулировали развитие нелинейной акустики у нас в стране и за рубежом.

Сейчас на кафедре эти работы широко ведутся как в экспериментальном, так и в теоретическом плане. Обнаружение в 1963 г. в твердых телах «запрещенных» фонон-фононных взаимодействий показало [5], что нелинейные эффекты чувствительны к структурным несовершенствам (дефектам) твердых тел. Эта концепция подтверждена экспериментами, показавшими, что сложные в структурном отношении тела (чугун, горные породы и др.) имеют большие значения нелинейных модулей упругости, превышающие соответствующие значения для хорошо звукопроводящих тел и кристаллов на 2-3 порядка.

Резкое увеличение нелинейных модулей наблюдается в сегнетоэлектриках и сегнетоэластиках в области фазового перехода второго рода (О. Ю. Сердобольская). В настоящее время нелинейная диагностика применяется при прогнозировании прочности твердых тел на основе малоамплитудных измерений нелинейных модулей упругости.

Удалось создать чрезвычайно чувствительный метод определения квадратичных поправок к закону Гука (Л. К. Зарембо с сотр.) на основе двойных нелинейных резонансов.

Развитая теория дипольной параметрической антенны с шумовой накачкой (Л. К. Зарембо) позволила установить эффект трансформации характеристики направленности, имеющий значение для низкочастотной части спектра шумов винта самолета или корабля.

Впервые экспериментально и теоретически изучены нелинейные свойства капиллярных волн (Л. К. Зарембо, В. А. Красильников). Обнаружены эффекты генерации гармоник в таких волнах, имеющих сильную дисперсию.

В. Е. Лямов одним из первых обратил внимание на то, что пьезоэффект должен обладать нелинейностью. Его теоретические работы дали возможность измерить нелинейные параметры пьезоэффекта в ряде кристаллов. Эта нелинейность сегодня используется в акустоэлектронных устройствах обработки сигналов (свертка, корреляция и т. д.). Он исследовал также нелинейные поляризационные эффекты в пьезокристаллах. Будучи тяжело больным, он подготовил докторскую диссертацию, которая вышла в виде монографии [10*].

Особое внимание на кафедре было обращено на нелинейные свойства поверхностных акустических волн (ПАВ), поскольку именно они наиболее широко используются в приложениях. В 1970 г. И. Ю. Солодов одним из первых исследовал нелинейность рэлеевских ПАВ. В последние годы он изучает нелинейности границ раздела твердых тел, чему посвящена его докторская диссертация [6]. Им впервые наблюдалось нелинейное отражение звука для различных механизмов нелинейности твердых тел — гуковской, концентрационной (в акустоэлектронике) и магнитоакустической. Экспериментально обнаружен новый механизм нелинейности при отражении звука и распространении ПАВ вдоль контактной (несклеенной) границы.

В. Г. Можаяев теоретически предсказал существование нового типа ПАВ в твердых телах, обусловленных упругой нелинейностью среды. Эта работа вызвала большой интерес специалистов, работающих в области акустики твердого тела, и широко цитируется [7].

В середине 1960-х гг. были начаты работы по акустоэлектронике.

* Звездочкой здесь и далее отмечены ссылки на работы из списка литературы предыдущей статьи О. В. Руденко в этом номере журнала.

Были получены важные результаты по усилению волн и акустоэлектрическому эффекту, которые способствовали развитию этого направления. В 1970-е гг. интересные результаты получены в нелинейной акустоэлектронике. Экспериментально показано, что имеются широкие возможности корреляционной обработки сигналов на поверхностных волнах. Впервые наблюдался эффект акустической памяти (Б. А. Коршак, В. Е. Лямов, И. Ю. Солодов) на встречных ПАВ, предсказанный А. А. Чабаном. Эти результаты нашли применение в системах обработки радиосигналов.

Цикл теоретических работ выполнен В. И. Павловым. Им развит метод нахождения канонических переменных для неоднородных сред в рамках гамильтоновского формализма. Этим способом исследованы волны в стратифицированной среде, в среде с шумом и турбулентностью. Сформулирован гамильтоновский подход к задачам излучения объемных и поверхностных волн движущимися источниками и дана теория взаимодействия волн на поверхности жидкости. Эти методы изложены в его докторской диссертации [8] и обзоре [9].

Научные исследования по нелинейной акустике значительно расширились после того как кафедру акустики в 1987 г. возглавил О. В. Руденко, ученик академика Р. В. Хохлова. До прихода на кафедру его научные интересы лежали в области нелинейных волновых процессов, в особенности в области акустики, где им был развит ряд новых направлений, из которых отметим такие, как статистическая нелинейная акустика (мощные шумовые волны и взаимодействие их со звуковыми волнами) и лазерная генерация интенсивного звука. Это были первые работы в указанных областях [4*, 8*, 11*, 10].

За прошедшие с 1987 г. годы О. В. Руденко со своими сотрудниками (О. А. Сапожников, Ю. Н. Маков, В. А. Хохлова) выполнил ряд фундаментальных исследований. Разработаны теория взаимодействия пилообразных волн в слабодиспергирующих средах, теория распространения мощных одиночных ударных импульсов, получен ряд новых эволюционных и кинетических уравнений, даны точные решения и развиты асимптотические методы их анализа. Создана уникальная экспериментальная установка, позволяющая получить мощный сфокусированный сигнал (давление более 1000 атм) за счет сильного поглощения лазерного пучка в жидкой среде. При помощи этой установки проведен ряд исследований по выяснению особенностей, возникающих при фокусировании акустического импульса в жидкости (влияние нелинейной рефракции, тепловой самофокусировки). В частности, найдены условия оптимального выбора параметров лазерного оптоакустического генератора [11] для целей медицины (литотрипсия).

В 1988 г. на кафедру пришла П. С. Ланда, которая в последние годы работала в области нелинейной динамики и в области генерации звуковых колебаний. Результаты частично отражены в книге [16*]. В частности, ею были развиты эффективные методы диагностики динамических систем на основе данных эксперимента [12]. Использование этих методов помогло развить новый взгляд на природу турбулентности.

2. Физическая акустика твердого тела

Выполнено много ценных работ по этому разделу, в которых участвовали В. А. Красильников, Л. К. Зарембо, В. Е. Лямов, И. Ю. Солодов, А. И. Коробов, В. В. Крылов, В. Г. Можяев, В. М. Прохоров, К. В. Гончаров, О. Ю. Сердобольская, Т. А. Маматова, Б. Б. Воронов,

С. Н. Карпачев и др. Большая часть этих работ имеет прикладное значение.

Получены новые результаты по поляризации сдвиговых волн, влиянию анизотропии кристаллов, влиянию наложения электрического поля и т. д.

Ряд работ по рассеянию и излучению поверхностных волн Рэлея на реальных поверхностях (шероховатость, трещины, топографические волноводы и т. д.) выполнен В. В. Крыловым. Результаты обобщены в его докторской диссертации [13]. В. В. Крылов сформулировал граничные условия для напряжений и смещений с учетом поверхностного натяжения, а также поверхностных упругости и плотности. Натяжение на поверхности твердого тела приводит к появлению дисперсии рэлеевских волн, по измерениям которой можно определить константы, ответственные за натяжение [14].

В. В. Крыловым и В. Г. Можаяевым развита теория волн, бегущих по ребру клина. Интерес к ним вызван малой скоростью распространения и возможными практическими применениями.

Фонон-электронные взаимодействия изучены в группе А. И. Коробова и Б. Б. Воронова. Создана автоматизированная установка для ультразвуковых измерений скорости звука, его поглощения, нелинейных параметров среды методом эхо-импульсов. Установка позволяет измерять одновременно амплитуду (с точностью 1%) и время распространения сигнала (с точностью 0,05 нс) в диапазонах частот 1—400 МГц и температур 4,2—300 К, в магнитных полях до 5 Тл. Выявлены особенности свойств сплава висмут—сурьма в области электронно-топологического перехода [15]. Данные согласуются с теорией электронно-топологических переходов, созданной И. М. Лифшицем. Другой пример — тщательные измерения свойств высокотемпературной сверхпроводящей керамики в области фазового перехода. Удалось определить все независимые компоненты тензора упругих модулей и вычислить параметр Грюнаизена [16].

Исследования по магнитоакустике проводятся в группе Л. К. Заембо и С. Н. Карпачева. К числу интересных эффектов следует отнести нелинейный магнитоакустический резонанс, проявляющийся в резком увеличении эффективной магнитоупругой нелинейности в условиях синхронизма спиновой и упругой мод. Показано, что в монокристаллах железо-иттриевого граната нелинейность увеличивается на 5—6 порядков. Развита новая методика дефектоскопии магнитоупорядоченных кристаллов, основанная на эффекте нелинейного магнитоакустического резонанса. Разработан автоматизированный спектрометр для измерения характеристик магнитоупорядоченных материалов (с точностью 1 Э) и машинной обработки данных для получения скорости и поглощения ультразвука [24*].

3. Гидроакустика

С начала 1960-х гг. под руководством С. Н. Ржевкина и Л. Н. Захарова сформировалось новое направление, развитие которого было стимулировано созданной ими аппаратурой для одновременного измерения звукового давления и трех ортогональных компонент колебательной скорости. Специальная обработка сигналов, полученных в результате векторно-фазовых измерений, позволяет определить свойства среды и ее границ, а также тел, находящихся в воде. Разработаны способы определения импеданса морского грунта на низких частотах и производительности источника звука путем измерения потока мощ-

ности через замкнутую поверхность, характеристик направленности сложных излучателей. С помощью этих устройств исследовались акустические свойства модели слоистого грунта, а также анизотропия шумов моря. Важной особенностью векторно-фазовых методов является возможность их использования на предельно низких частотах. При диаметре векторных приемников около 10 см они могут работать на частотах порядка нескольких герц и обеспечить точность пеленгования в реальных условиях 1° [19*].

Исследования акустических полёй этими методами продолжаются в группе В. А. Гордиенко и Б. И. Гончаренко. Были выяснены особенности формирования структуры естественных шумов океана и шумов судоходства на протяженных трассах. Оказалось возможным выделить приемной системой сигнал при отношении сигнал/помеха на входе гидрофона — (10—20) дБ. Выявлены особенности флуктуаций акустического поля, связанных с внутренними волнами и мелкомасштабными неоднородностями.

Близкие по характеру работы проводились О. С. Тонакановым, Ф. В. Рожиным, К. В. Чернышевым и П. Н. Кравчуном. В результате теоретических и экспериментальных (в том числе натуральных) исследований были созданы разновидности низкочастотных излучателей и приемников малых волновых размеров (0,1—0,01 от длины волны). Преобразователи построены на основе активных дискретных структур с сосредоточенными параметрами, где инерционные элементы являются пьезоактивными, а упругие — пассивными. Разработана также методика оптимального синтеза линейных антенн по заданной диаграмме направленности и критерию максимального отношения сигнал/шум, причем оптимизируемыми параметрами являются не только амплитуда и фаза приемных элементов, но и места их расположения в антеннах. Исследовано влияние океанических течений на характеристики антенн. Предложена модель низкочастотных шумов глубокого океана [17].

Проводились теоретические и экспериментальные исследования волнового распространения звука в клиновидных областях (прибрежном шельфе). Результаты, полученные В. К. Кузнецовым, позволяют, в частности, определить структуру поля, а также рефракцию квазимод в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Проблемы статистической гидроакустики решаются в группе В. А. Бурова (Е. Я. Тагунов, А. В. Сасковец, О. Д. Румянцева). Развивается общий подход к задачам акустического лоцирования (гидроакустика, океанология, медицинская диагностика, дефектоскопия) как к обратным задачам излучения и рассеяния. Эти проблемы связаны со сложными разделами математической физики, поскольку в них сочетаются свойственная обратным задачам некорректность, а также нелинейность, обусловленная процессами многократного рассеяния. Разработаны функциональные методы, позволяющие выйти за рамки обычно используемого борновского приближения. Созданы и апробированы также итерационные алгоритмы решения обратных задач, выяснены условия сходимости, методы ее улучшения [18*] (см. также статью В. А. Бурова и др. в этом номере журнала).

Прикладная сторона этих работ связана с томографией океана, медицинской томографией и дефектоскопией высокой информативности. Развитые методы применимы в задачах томографии нелинейного параметра среды, что дает новые информативные возможности, а также могут быть полезными для изучения гидродинамических полёй (например, океанических течений).

Это направление, позволяющее на основании самых общих посылок найти оптимальные методы обработки статистических сигналов, успешно развивается на кафедре для решения важных прикладных задач.

4. Аэроакустика

К числу задач этого раздела относятся традиционные задачи, решаемые на кафедре. В последние годы исследования звукопоглощающих систем сконцентрировались на проблеме создания малогабаритных резонансных поглотителей для низких частот. Предложено устройство в виде специального дифракционного экрана, позволяющего увеличить присоединенную массу и понизить резонансную частоту резонатора фиксированных размеров почти на порядок. Рост инерционного сопротивления не приводит при этом к росту добротности и снижению относительной ширины полосы поглощения, поскольку одновременно растут и потери (К. А. Велижанина, В. А. Оборотов) [18]. Поведение звукопоглотителей в сильном акустическом поле, существенно отличающееся от их поведения при малых амплитудах, исследуется И. В. Лебедевой. Ею разработаны новые методы измерений, в частности, с помощью термоанемометра исследуется поле скорости вблизи отверстия в экране, где развиваются нелинейные эффекты, ответственные за эти изменения [19].

Другие направления работ связаны с понижением шумов непосредственно в источнике. Так, для выяснения механизма генерации и снижения инфразвуковых шумов в салоне легковых автомобилей успешно применена система векторно-фазовых измерений. В работах, проводимых в содружестве с автозаводом им. Лихачева, было выяснено, что в салонах некоторых автомобилей возникают колебания на частотах 9—12 Гц, которые по интенсивностям находятся на пределе допустимых для человека. Даны рекомендации по снижению таких шумов (Л. Н. Захаров, О. С. Тонаканов) [19*].

Проводились также теоретические и экспериментальные (лабораторные, стендовые) исследования многомодовых интерференционных глушителей шума типа расширительных камер в каналах. Предложены конструкции глушителей, удобные для применения в системах кондиционирования и вентиляции, различных трубопроводах и т. п. (К. В. Чернышев, П. Н. Кравчун) [22*].

К кругу задач аэроакустики можно отнести также работы О. В. Руденко и П. С. Ланды по генерации звука. Так, созданы модели голового источника звуков Короткова, возникающих при измерении кровяного давления [20], развита теория самовозбуждения звуковых волн при их взаимодействии с источниками тепла. Следует упомянуть также работу О. В. Руденко и К. Л. Хирных, в которой предложена нелинейная модель резонатора Гельмгольца как поглотителя интенсивности звука [21].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ржевкин С. Н. //ЖТФ. 1936. 6, № 12. С. 2103. [2] Красильников В. А. //Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз. 1949. 12, № 1. С. 33. [3] Красильников В. А. О влиянии пульсаций коэффициента преломления в атмосфере на распространение звуковых и электромагнитных волн: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1953. [4] Зарембо Л. К., Красильников В. А. //УФН. 1959. 18, № 4. С. 687. [5] Зарембо Л. К., Красильников В. А. //УФН. 1970. 102, № 4. С. 549. [6] Солодов И. Ю. Нелинейные акустические и акустоэлектронные взаимодействия на границах раздела твердых тел: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1989.

- [7] Mozhaev V. G.//Phys. Lett. 1989. 139A, № 7. P. 333. [8] Павлов В. И. Разработка и применение гамильтоновских методов к акустическим задачам взаимодействия и излучения волн: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1982. [9] Павлов В. И., Сухоруков А. Н.//УФН. 1985. 147, № 1. С. 83. [10] Руденко О. В.//УФН. 1986. 149, № 3. С. 413. [11] Андреев В. Г., Вероман В. Ю., Денисов Г. А. и др.//Акуст. журн. 1992. 38, № 4. С. 588. [12] Landa P. S., Rosenblum M. G. Physica D. 1991. 48, № 1. P. 232. [13] Крылов В. В. Волны Рэлея на реальных поверхностях и связанные проблемы излучения и рассеяния звука: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1987. [14] Krylov V. V.//Prog. in Surf. Sci. 1989. 32. P. 39. [15] Буга С. Е., Воронов Б. Б., Зарембо Л. К., Коробов А. И.//ФТТ. 1985. 27, № 8. С. 2291. [16] Воронов Б. Б., Коробов А. И., Мошалков В. В.//Сверхпроводимость: физика, химия, технология. 1990. 3, № 2. С. 2733. [17] Кравчун П. Н., Пестов К. А., Тонаканов О. С.//Акуст. журн. 1992. 38, № 5. С. 886. [18] Велижанина К. А., Оборотов В. А.//Акуст. журн. 1983. 29, № 1. С. 5. [19] Лебедева И. В.//Акуст. журн. 1980. 26, № 4. С. 599. [20] Landa P. S., Rudenko O. V., Bakscis B. F.//Opt. and Acoust. Rev. 1990—1991. 1, N 3. P 277. [21] Rudenko O. V., Khizhnykh K. L.//Opt. and Acoust. Rev. 1990. 1, N 1. P. 141.